

La rivoluzione scientifica del XVII secolo

Viola Schiaffonati

Dipartimento di elettronica e informazione

1. Introduzione

La natura della conoscenza scientifica, gli ambiti e i limiti della scienza costituiscono le tematiche di partenza per comprendere di che cosa tratti la riflessione filosofica sulla scienza, ovvero la filosofia della scienza. In questo testo, dopo avere chiarito i problemi connessi alla portata delle teorie scientifiche e alla natura di una teoria filosofica della scienza (paragrafo 2), si affronta la nascita della scienza moderna a partire dalla rivoluzione astronomica promossa da Niccolò Copernico (paragrafo 3). In seguito si analizza il passaggio dalla rivoluzione astronomica alla rivoluzione scientifica (paragrafo 4), si presenta la natura e il funzionamento del metodo scientifico concepito da Galileo Galilei (paragrafo 5) per arrivare alla visione della scienza così come promossa da Isaac Newton (paragrafo 6). Si discutono, infine, le caratteristiche della scienza moderna, così come l'entrata in crisi dell'ideale stesso su cui la scienza moderna si fonda (paragrafo 7).

2. Filosofia della scienza e scienza

Secondo la prospettiva qui adottata, la filosofia della scienza offre gli strumenti concettuali per comprendere i fondamenti e lo sviluppo della conoscenza scientifica e tecnologica. Per questo motivo si cerca di dare una prima generale caratterizzazione della filosofia della scienza per poi cominciare ad affrontare una delle domande fondamentali di questo corso: che cos'è la scienza, come funziona e quali sono i suoi obiettivi.

2.1 Che cosa c'entra la filosofia con la scienza?

La caratterizzazione del rapporto fra filosofia e scienza non è facile compito e costituisce essa stessa un problema filosofico (Dorato 2007). Si tratta certamente di un problema filosofico stabilire se la scienza ci offra conoscenza oggettiva, e formi dunque un insieme di credenze giustificate e intersoggettivamente valide. Inoltre, anche il problema di valutare se e come il sapere scientifico si distingue da altre tradizionali forme di interpretazione del mondo, quali quelle offerte dalla religione, dal mito, dall'arte, e dalla filosofia stessa, ha un carattere filosofico. Non va inoltre dimenticato che molti dei grandi filosofi del passato furono anche scienziati, così come molti filosofi della scienza contemporanei siano in primo luogo degli scienziati professionisti. Tuttavia, ora che la divisione del lavoro intellettuale fra gli scienziati, e a maggior ragione quella fra scienziati e filosofi, si va accentuando non sono pochi i filosofi che non tengono in alcun conto le teorie scientifiche contemporanee. D'altra parte, l'esaltazione critica del sapere scientifico è solo l'altra faccia della stessa medaglia e costituisce una superficiale reazione all'acritica svalutazione della scienza.

I legami fra scienza e filosofia si caratterizzano in vari modi. In primo luogo si deve riconoscere la presenza di un contributo "inconsapevole" che viene direttamente dalla scienza a questioni filosofiche tradizionali (come per esempio la natura dello spazio e del tempo, della materia, della probabilità, dei numeri, della coscienza, della razionalità e del libero arbitrio). Tuttavia, non ci si deve soffermare solo sull'importanza che le scoperte scientifiche hanno per le tradizionali questioni filosofiche, ma

analizzare anche il rilievo che queste ultime hanno per l'interpretazione della scienza. In generale si potrebbe dire che le teorie scientifiche contemporanee interagiscono con la filosofia in un duplice senso. Da una parte teorie scientifiche ben confermate hanno notevoli ripercussioni su questioni tradizionalmente filosofiche; si pensi per esempio all'impatto dell'evoluzionismo darwiniano sulle domande tradizionali intorno all'origine dell'essere umano o persino delle nostre regole morali. Dall'altra in quella che tecnicamente si chiama "interpretazione" di una teoria scientifica o di una teoria fisica – che è il tentativo di capire che cosa essa ci dica sulla realtà o sul mondo – è indispensabile usare in modo appropriato gli strumenti dell'analisi concettuale tipici della filosofia. Ad esempio l'attenta analisi del significato "a è simultaneo con b" sta alla base della teoria della relatività speciale di Einstein ed è una questione eminentemente filosofica.

Secondo questa prospettiva il filosofo della scienza dovrebbe non solo riflettere *ex post* sul lavoro scientifico compiuto dagli scienziati di professione, ma anche contribuire a una più profonda comprensione, se non all'effettivo progresso, di singole teorie scientifiche, proprio grazie alla sua peculiare abilità nell'analisi di concetti fondamentali (quali ad esempio quelli di numero, probabilità, legge di natura, forza, causa, spiegazione, conferma, ...).

Attualmente esistono due modi di intendere la filosofia della scienza contemporanea.

Filosofia della scienza. In questo modo più generale di intendere la disciplina, la filosofia della scienza cerca di dare risposta a problemi che sono di diretta pertinenza del sapere scientifico nella sua globalità e generalità (Esiste un progresso scientifico? Che cos'è una teoria scientifica? La scienza spiega i fenomeni che descrive? Esiste un limite alla conoscenza scientifica della realtà?). Si tratta generalmente di interrogativi ai quali la scienza non sa e non intende risondere.

Filosofie delle scienze. In questo caso, si tratta della filosofia delle singole discipline scientifiche che affronta le domande che sorgono direttamente dal lavoro degli scienziati, e che coinvolgono quindi dispute più interne a singole discipline scientifiche (Come può essere fatto il mondo microscopico se la meccanica quantistica è vera? Qual è l'unità sulla quale ha operato la selezione naturale, il gene, l'individuo o la specie?). In questo caso la filosofia si occupa di analizzare i fondamenti delle particolari discipline scientifiche.

Questi due modi di intendere la filosofia della scienza non si escludono a vicenda, ma anzi si integrano in maniera proficua. È solo grazie a una ricerca filosofica più concreta e aderente al lavoro delle scienze (fondamenti delle singole scienze) che si possono trarre delle generalizzazioni plausibili nell'ambito della filosofia della scienza in generale.

2.2 Che cos'è la filosofia della scienza

La filosofia della scienza è quella particolare branca della ricerca filosofica che ha per oggetto i *problemi più generali posti dal sapere scientifico*. Tradizionalmente la filosofia della scienza è vicina, ma si distingue anche dalla *sociologia della scienza*, dalla *psicologia della scienza* e dalla *storia della scienza*. Non si tratta certo di confini netti, anche se delle differenze esistono ed è importante capire quali siano per chiarire la natura della filosofia della scienza.

In primo luogo bisogna notare che sociologia, psicologia e storia della scienza sono discipline prevalentemente empiriche; ciò significa che ognuna di esse parte da *dati di osservazione*: la sociologia studiando come gli scienziati interagiscono come gruppi sociali, la psicologia analizzando quali siano i processi di ragionamento utilizzati dagli scienziati, la storia valutando come questi processi siano avvenuti nella storia e come i diversi stili di ragionamento si siano modificati nel corso degli anni.

In che cosa, quindi, si distingue la filosofia della scienza da queste discipline? Senza dubbio la prima distinzione riguarda il fatto che la filosofia della scienza non è una disciplina esclusivamente empirica, sebbene studi empirici siano rilevanti anche per la filosofia della scienza. L'obiettivo primario del filosofo della scienza è, infatti, la *chiarificazione concettuale*, attraverso l'adozione di un approccio critico e analitico di investigare la scienza e il suo modo di funzionare.

Per capire meglio quanto appena detto è interessante vedere quale sia il tipo di domanda che il filosofo della scienza generalmente si pone e sul quale lavora. Eccone alcune: che cos'è la metodologia scientifica e in che cosa differisce da altre procedure che si utilizzano per acquisire conoscenza? Quali ragioni abbiamo per pensare che le procedure seguite dagli scienziati siano corrette e portino effettivamente all'acquisizione di conoscenza? Gli scienziati scoprono qualcosa che effettivamente esiste nella realtà o costruiscono invece qualcosa di nuovo? Abbiamo basi sicure per future aspettative? La scienza è in grado di spiegare qualcosa (e quindi ci aiuta a comprendere) oppure semplicemente descrive? La scelta di una particolare teoria scientifica è oggettiva oppure dipende da fattori culturali, storici o soggettivi? Se i fattori storici giocano un ruolo, la scienza può essere ancora vista come una ricerca della verità?

2.3 Sulla natura di una teoria filosofica della scienza

La filosofia della scienza è caratterizzata, oltre che da un insieme di domande, anche da una serie di *obiettivi* che concorrono a dare forma alla struttura che una teoria filosofica della scienza dovrebbe avere. Questi *obiettivi* possono essere distinti all'incirca in quattro gruppi (Godfrey-Smith 2003).

- *Capire come funziona il pensiero scientifico*: analizzare che cosa e come pensano gli scienziati quando inventano una teoria o quando fanno una scoperta scientifica.
- *Costruire una teoria (logica) della scienza*: interrogarsi su quale sia la natura astratta delle teorie scientifiche e quali siano le relazioni fra teorie ed evidenza.
- *Definire una metodologia*: stabilire un insieme di regole e procedure che gli scienziati dovrebbero seguire nelle loro attività.
- *Analizzare la struttura del cambiamento scientifico*: individuare una teoria sottostante che spieghi la natura e l'evoluzione dei cambiamenti nella scienza.

2.4 La portata delle teorie scientifiche

La prima e più generale domanda dalla quale possiamo partire per cominciare a fare filosofia della scienza è: ma che cos'è la scienza? Se ci si interroga su cosa sia la scienza, ciò che senza dubbio stupisce è vedere quanto grande sia il disaccordo sulle questioni basilari relative alla natura e allo *status* della conoscenza scientifica. Tale stupore è aumentato dal fatto che la scienza sembra funzionare assai bene all'atto pratico senza essere toccata da questi disaccordi teorici. Tuttavia è opportuno ricordare che in alcuni significativi casi tali dibattiti hanno influenzato il corso stesso della scienza. E' chiaro, inoltre, che discutere su che tipo di conoscenza sia la conoscenza scientifica ha estrema importanza per le discussioni generali relative alla conoscenza umana e al cambiamento culturale.

Per rispondere alla domanda su che cosa sia la scienza sono possibili due strategie (Godfrey-Smith 2003). Chiedersi dove cominci e termini la scienza, ossia quale sia il suo raggio di attività; oppure cercare di identificare quali attività sono classificate come scienza. Per rispondere a questa seconda domanda si può partire dall'elencare quelle che si considerano scienze. Nessuno dovrebbe avere dei dubbi nel sostenere che fisica e biologia molecolare siano scienze. In questo caso ciò che accomuna le due attività è il processo di *testare* delle *ipotesi*. Ci sono, però discipline il cui *status* scientifico non è chiaro né accettato da tutti: nel passato è stato il caso, ad esempio, della psicologia e dell'economia. Oggi anche queste sono entrate nel novero delle scienze e, a ricordo della passata ambiguità, vengono chiamate scienze *soft* per distinguerle da quelle *hard*, quali fisica e biologia molecolare. Assai significativo è il fatto che ormai anche discipline tradizionalmente umanistiche, quali l'antropologia, ambiscano allo *status* di scienza. In questo caso si parla di *scienze umane*, quasi a volere sottolineare che la dignità di una disciplina deve necessariamente essere associata a qualche caratterizzazione di 'scientificità'.

La complessità della situazione è aggravata dal fatto che anche le teorie filosofiche divergono nel valutare la scienza. Alcune usano il termine scienza o l'aggettivo scientifico per ogni processo che

risolve problemi in un modo guidato dall'evidenza osservativa. In questo senso la scienza è un tipo di attività che possiamo trovare in tutte le culture, trasversale a un luogo o a un periodo determinato. Altre teorie considerano la scienza come localizzata in un determinato spazio e in un determinato tempo: solo la Rivoluzione Scientifica del XVII secolo nata in Europa e le attività sorte in seguito possano essere chiamate scienza a tutti gli effetti. In questo senso la scienza è trattata come un'istituzione sociale speciale con una storia ben definita che deve essere distinta da altri tipi di investigazione del mondo per essere compresa in tutta la sua portata. La prospettiva probabilmente più interessante da adottare in questo dibattito è considerare la scienza da entrambi i punti di vista.

2.5 Qual è l'obiettivo della scienza?

Per integrare quanto detto sopra, è bene chiedersi quali siano gli obiettivi della scienza. Naturalmente ve ne sono diversi; cominciamo a considerarne alcuni.

- *Descrizione*: alcune parti della scienza (per esempio settori della biologia) consistono principalmente in una collezione di dati. È chiaro che ciò non è sufficiente per fare scienza e che la scienza è qualcosa di più di una lunga lista di fatti. Anche supponendo di avere una descrizione completa di ogni fatto particolare del mondo, passato e presente, ci sentiremmo di dire che questo è un resoconto scientifico del mondo?
- *Predizione*: il problema di una lunga lista di fatti è che questa ci dice poco o nulla sul futuro; nella scienza invece si vuole sapere non solo come le cose sono e come sono andate, ma anche come *saranno* nel futuro. Anche aggiungendo alla lista sopra l'elenco di tutti i fatti futuri, sembra comunque che manchi qualcosa e che non sia corretto parlare di resoconto scientifico del mondo.
- *Controllo*: il fatto è che quando si fa scienza non solo si vogliono poter fare delle previsioni sul futuro, ma anche potere intervenire su di esso. Ad esempio, non si vuole solo predire le condizioni sotto le quali uno si ammalerà, ma anche fare in modo di *prevenire* la malattia o di curarla nel caso si manifesti.
- *Organizzazione*: una delle ragioni per cui la semplice lista di fatti può apparire non interessante è che la scienza è interessata anche alle *regolarità* nei fatti, al modo in cui i fatti sono connessi fra loro, alla loro *organizzazione* intrinseca ed estrinseca.
- *Spiegazione*: nel caso della spiegazione si va oltre la pura e semplice descrizione e si cerca di capire il perché delle cose. Il modo migliore per sapere se un evento si verificherà in futuro è conoscere perché questo sia avvenuto nel passato. Sembra così esserci una forte connessione fra *spiegazione* e *predizione*. Tanto più che le spiegazioni generalmente coinvolgono processi di organizzazione sistematica dei fenomeni naturali.

2.6 Come funziona la scienza?

Oltre a cercare di chiarire l'obiettivo della scienza, sembra essere interessante ora considerare il suo funzionamento. In generale, si possono considerare tre possibili risposte (Godfrey-Smith 2003): le tre idee presentate di seguito possono essere viste come in conflitto fra loro, come risposte alternative alla stessa domanda, ma anche come porzioni differenti di una domanda generale e più complessa.

La prima risposta è l'*empirismo*, un'etichetta che rappresenta un insieme diversificato di teorie filosofiche, tutte asserenti l'importanza fondamentale dell'esperienza nello spiegare la conoscenza, la giustificazione e la razionalità. L'esperienza in questa ottica è la sola fonte di vera conoscenza sul mondo. L'empirismo non si occupa in particolare della conoscenza scientifica, ma della conoscenza in generale. Nella prospettiva empirista, la differenza fra il pensiero scientifico e quello quotidiano è una questione di grado e di dettaglio. La scienza è la migliore manifestazione della nostra capacità di investigare e conoscere il mondo perché è organizzata, sistematica e, soprattutto, corrispondente all'esperienza. L'empirismo non è così semplicistico come sembra; infatti deve affrontare il problema fondamentale delle esperienze contrarie alle teorie. Per questo motivo gli empiristi non negano che il

ragionamento sia necessario per rendere sensato ciò che osserviamo, anche se insistono che l'esperienza sia primaria rispetto all'analisi e al ragionamento.

Un secondo insieme di possibili risposte al funzionamento della scienza enfatizza il ruolo dei *metodi matematici*. Ciò che rende la scienza diversa dagli altri tipi di investigazione, e di particolare successo secondo questo approccio, è il suo tentativo di comprendere il mondo naturale usando strumenti matematici. La matematica permette di differenziare il pensiero scientifico dalle altre forme di pensiero come tentativo di quantificare i fenomeni e di trovare regolarità nel flusso degli eventi. Si tratta di una visione alternativa a quella empirista? Non è detto. Proprio il caso di Galileo Galilei, infatti, evidenzia come la matematica possa essere usata in combinazione con un approccio empirista. Una domanda legittima in questa prospettiva è perché la matematica si applichi così bene alla realtà? A tale domanda si può rispondere in molti modi, primo fra tutti che la struttura stessa della realtà è matematica, ed è per questo che la matematica è così efficiente nello spiegare la realtà. Tuttavia, nonostante l'estrema importanza della matematica per la scienza, ci sono casi di teorie scientifiche rilevanti in cui la matematica non ha alcun ruolo (come nel caso dell'evoluzionismo di Darwin). Ciò significa che il ricorso alla matematica non è sempre necessario per comprendere il mondo.

Vi sono, infine, risposte che si concentrano sulla *struttura sociale* della scienza. Ciò che rende la scienza diversa da altri tipi di investigazione, e che spiega il suo successo, è la sua struttura sociale unica e peculiare. Questa visione è divenuta particolarmente importante quando la filosofia della scienza si è aperta alla storia e alla sociologia della scienza. *Cooperazione e fiducia* sono elementi essenziali affinché la scienza possa avere luogo: se si analizza in dettaglio la Rivoluzione Scientifica, si vede che essa ha soprattutto a che fare con lo sviluppo di nuovi modi di controllare e coordinare le azioni di gruppi di persone durante la loro attività di ricerca. Altri studiosi insistono maggiormente sull'idea di *competizione* o, perlomeno, sul bilanciamento che dovrebbe esserci fra cooperazione e competizione. Secondo questo approccio, una buona teoria dell'organizzazione sociale della scienza è una migliore teoria della scienza di quelle sostenute dagli empiristi. In ogni caso, non è ormai raro che visioni empiriste più tradizionali siano state integrate negli ultimi anni nella direzione dell'analisi delle organizzazioni sociali che caratterizzano la scienza.

3. La rivoluzione astronomica

Per affrontare la nascita della scienza moderna la rivoluzione astronomica offre una prospettiva privilegiata. In questo paragrafo viene presentata la cosiddetta rivoluzione astronomica, che ha preso avvio in Europa a partire dal XVI secolo e si è caratterizzata come rivoluzione copernicana, a partire dalla discussione delle concezioni astronomiche dell'antichità, dei loro punti critici e delle posizioni proposte per cercarne di superarli (Kuhn 1972).

3.1 Le concezioni astronomiche dell'antichità

La cosmologia costituisce da sempre un'esigenza per l'umanità e fornisce una struttura in grado di dare senso alle osservazioni relative alla natura dell'universo e all'osservazione dei cieli e delle stelle. Tra le concezioni cosmologiche dell'antichità l'universo a due sfere rappresenta il modello cosmologico più diffuso e influente.

L'antico universo a due sfere (dal IV secolo a.C)

Secondo questo impianto cosmologico la Terra è una minuscola sfera sospesa e ferma nel centro geometrico di una sfera molto più grande e ruotante che porta le stelle. Il Sole si muove nel vasto spazio fra la Terra e la sfera delle stelle fisse. Al di fuori della sfera esteriore non vi è nulla: né spazio né materia. Come è noto, non si tratta dell'unica descrizione dell'antichità, ma di quella che ebbe più seguaci e della quale il mondo medievale e moderno ebbero in eredità una versione sviluppata. L'universo a due sfere è una spiegazione abbastanza soddisfacente e semplice rispetto alle osservazioni possibili a occhio nudo e rispetta i criteri di semplicità, perfezione e simmetria così importanti nel pensiero greco.

Si può senz'altro affermare che l'universo a due sfere costituisce il primo modello di spiegazione della struttura celeste: è uno schema concettuale prodotto dall'uomo che deriva dalle osservazioni ma, al contempo, va al di là di esse: nuove informazioni (quelle che saranno chiamate nella modernità *previsioni*) infatti possono essere ricavate sulla base del modello. La complessità dei fenomeni viene ridotta, e tale riduzione logica è componente essenziale della spiegazione; le informazioni ricavate dal modello forniscono allo scienziato notizie su regioni del mondo dove egli non è mai stato. Per questo motivo, con l'introduzione dell'universo a due sfere si può cominciare a parlare della prima forma di cosmologia scientifica.

L'evoluzione dell'universo a due sfere in Aristotele

Nel *De Coelo* Aristotele (384-322 a.C.) elabora la sua teoria cosmologica in accordo con il più generale modello a due sfere. Rispetto ai modelli precedenti, il numero delle sfere contenute nell'universo aristotelico aumenta a cinquantacinque: si tratta di un cosmo autocontenuto, autosufficiente, formato di materia e spazio (non esistono né buchi né vuoto), composto di *etere* (solido cristallino), il cui movimento è dato dalla frizione fra sfera e sfera che assicura anche la trasmissione del moto all'intero sistema. Accanto alla visione cosmologica, Aristotele definisce anche le leggi del moto che derivano dalla sua *teoria dei luoghi naturali* (un corpo si sposta verso la sua posizione naturale per starvi in riposo, a meno che non sia spinto): una tale teoria presuppone la necessità di una terra centrale e stazionaria.

Nell'impianto cosmologico aristotelico una distinzione fondamentale è quella fra *mondo lunare* e *mondo sublunare*. Essi costituiscono non solo due diverse porzioni dell'universo (il primo la porzione che comprende la sfera della Luna fino alle sfere delle stelle fisse che delimita i confini dell'universo; il secondo la porzione che comprende la sfera della Terra), ma mondi strutturalmente diversi e accessibili con diverse modalità. Il mondo lunare è composto di corpi eterni, immutabili, di forma sferica che, nel pensiero greco, rappresenta la più perfetta delle forme. Il mondo sublunare è invece corruttibile, soggetto al divenire e imperfetto. Date queste caratteristiche, del mondo lunare si può avere una conoscenza certa, indubitabile e universale (quella che i greci antichi chiamavano *epistéme*), del mondo sublunare invece si può avere solo una conoscenza di opinione (quella che i greci antichi chiamavano *dòxa*) che non ha i caratteri della regolarità e dell'universalità attribuibili alla conoscenza scientifica. Come conseguenza non può esistere una fisica esatta degli enti del mondo sublunare che non sono soggetti alle stesse leggi degli enti del mondo lunare, cui la fisica può invece applicarsi.

Il problema dei pianeti

Nonostante la proficuità del modello dell'universo a due sfere, già dal III secolo a.C. cominciano a essere osservate irregolarità, ossia osservazioni che non concordano con le previsioni proposte dal modello. Il modello a due sfere (e i suoi raffinamenti successivi) concorda con le osservazioni del movimento delle stelle, ma non dei pianeti. Il cosiddetto problema dei pianeti emerge fin dall'antichità e costituirà per Copernico lo stimolo da cui prendere le mosse per proporre un Sole centrale e stazionario e risolvere così definitivamente le discrepanze nelle osservazioni. I pianeti, infatti, durante certe fasi della loro traiettoria, descrivono un apparente modo retrogrado: se essi normalmente si muovono verso est, in alcuni punti della traiettoria invertono la loro orbita dirigendosi verso ovest per poi tornare verso est. Come è possibile accordare questa osservazione con la struttura generale della spiegazione basata sull'universo a due sfere?

Apollonio e Ipparco (III-II secolo a.C.), due famosi astronomi dell'antichità, propongono un sistema basato su *epicicli* e *deferenti* che si rivela assai fecondo e in accordo piuttosto preciso con le osservazioni. L'apparente moto retrogrado è spiegato dalla composizione di due o più orbite circolari. La perfezione del movimento circolare dei pianeti, nonché la loro regolarità, è salva e il modello in accordo con le osservazioni.

Il sistema tolemaico

Il primo a collegare una serie particolare di cerchi composti per spiegare non soltanto i moti del Sole e della Luna, ma le regolarità e le irregolarità quantitative osservate nel moto apparente dei pianeti è

Claudio Tolomeo (100 ca-170). L'*Almagesto* è il libro che compendia le più grandi conquiste dell'astronomia antica e offre una spiegazione completa, particolareggiata e quantitativa di tutti i moti celesti. Tale sistema, diventato ormai molto complesso rispetto alle origini, è assai efficace nelle previsioni ma non concorda perfettamente con le osservazioni. Tuttavia l'osservazione non è mai assolutamente né compatibile né incompatibile con una teoria e questo è uno dei motivi per cui il sistema tolemaico ha potuto essere accettato per un periodo assai lungo, nonostante il grande numero di anomalie.

La struttura cosmologica non è più in questo caso solo una struttura di tipo scientifico, ma è una struttura dell'universo che fa riferimento anche a concetti fisici e religiosi. I fondamentali concetti alla base di questa astronomia divengono elementi di una più grande struttura di pensiero: di fatto da questo momento in poi gli elementi non astronomici risultano tanto importanti quanto quelli astronomici nel vincolare l'immaginazione degli astronomi.

3.2 La rivoluzione copernicana

Il periodo medievale è caratterizzato dalla quasi unanime adozione del sistema tolemaico e dalla sua progressiva complicazione per cercare di trovare accordo con le osservazioni che, anche se a occhio nudo, divengono sempre più precise. Solo verso la fine del periodo medievale, nonostante la predominanza del sistema tolemaico e delle concezioni aristoteliche sottostanti, vi è anche chi comincia a indagare strade alternative. Nicola D'Oresme (1325-1382), ad esempio, nello scrivere un commento al *De Coelo* di Aristotele, avanza varie critiche nei confronti della concezione aristotelica. D'Oresme, insieme ad altri commentatori del periodo, comincia così a preparare il terreno alla rivoluzione copernicana.

Il lavoro di Copernico rappresenta in questo contesto un vero e proprio punto di passaggio che, tuttavia, viene variamente interpretato. Per Koyré (1970) la rivoluzione copernicana è la storia della distruzione del cosmo e dell'infinitizzazione dell'universo. Per Kuhn (1972) si tratta, invece, di uscire dal mondo aristotelico e di matematizzare la realtà secondo una visione neoplatonica. Nella realtà perché si riesca ad arrivare ad una visione eliocentrica sono, tuttavia, necessari almeno due elementi: la possibilità del moto della Terra e l'unificazione leggi terrestri e celesti su cui proprio Copernico comincia a lavorare sistematicamente.

Il *De Revolutionibus Orbium Caelestium*

Nel 1543 viene dato alle stampe, proprio quando Niccolò Copernico (1473-1543) è ormai sul letto di morte, il *De Revolutionibus Orbium Caelestium*. Il *De Revolutionibus* è un'opera di difficile lettura, la cui importanza consiste meno in ciò che l'opera afferma che in quello che fece affermare ad altri (Kuhn 1972). Copernico è infatti legato ancora ad alcune vecchie concezioni aristoteliche, nonostante sia aperto al nuovo. L'opera è scritta in origine per risolvere il problema dei pianeti, dato che Copernico considera non soddisfacente e forzata la soluzione tolemaica, soprattutto a causa della complicazione del modello e dell'impossibilità di raggiungere un certo grado di precisione nelle previsioni. Il moto della Terra nella visione copernicana è in realtà un corollario alla nuova soluzione del problema dei pianeti.

Per comprendere appieno la transizione verso un modello del tutto diverso da quello tradizionale, è importante considerare lo *spirito neoplatonico* che anima Copernico. Il neoplatonismo è una delle filosofie dominanti del periodo. Tra gli elementi, la semplicità delle spiegazioni e la credenza in una struttura matematica profonda della realtà sono quelli che maggiormente influenzano gli astronomi del periodo. In accordo con questa visione a Copernico non pare naturale avere una spiegazione cosmologica in cui devono essere continuamente aggiunti epicicli e deferenti per rendere conto delle osservazioni. Il sistema copernicano con il Sole al centro, al contrario, ha un vantaggio di tipo "estetico": una nuova semplicità che Copernico difende in tutta l'opera.

Almeno inizialmente, il grado di precisione del sistema copernicano è molto inferiore a quello del sistema tolemaico; Copernico non ha ancora sviluppato appieno la matematica in grado di supportare la nuova visione della Terra in movimento e le categorie concettuali che utilizza sono ancora vincolate

a quelle di Aristotele (anche se ora l'universo ha confini molto più estesi). La nuova visione della Terra in movimento si accorda con le osservazioni da un punto di vista esclusivamente qualitativo. Tuttavia, quanto Copernico propone è più semplice strutturalmente e più rispondente alla semplicità e all'ordine che il neoplatonismo va predicando. La Terra è soggetta a tre moti: la rotazione assiale quotidiana, il moto orbitale annuale e il moto conico annuale dell'asse. Nel *De Revolutionibus* le prove fisiche a favore del moto della Terra sono piuttosto deboli: si tratta, infatti, di motivazioni più estetiche che fisiche. Secondo Copernico la sfericità della Terra implica movimento circolare e il valere delle stesse leggi che regolano gli astri dato che si tratta della stessa forma. Il Sole ha una funzione esclusivamente ottica, ossia quella di rischiarare l'universo, mentre non ha alcun ruolo dal punto di vista meccanico. Per molti versi Copernico è ancora aristotelico sotto diversi punti di vista. L'universo è ancora visto come cosmo ordinato, gerarchico (di cui Sole e stelle fisse sono i due poli principali), finito, anche se molto più grande di quanto sia mai stato considerato in passato (*immensum*, secondo Copernico, in quanto non misurabile).

Con l'opera di Copernico, il copernicanesimo è ancora una questione tecnica e non cosmologica, anche se comincia ad avere un progressivo influsso in contesti non scientifici (in primo luogo nella letteratura). Nello stesso periodo sono ancora presenti molti accesi oppositori alla nuova teoria copernicana. Uno dei più noti è certamente Tycho Brahe (1546-1601), l'autorità preminente dell'astronomia del periodo, soprattutto per quanto riguarda le tecniche di osservazione astronomica (a occhio nudo) e la precisione dei dati raccolti. Il suo sistema rappresenta una sorta di compromesso rispetto ai problemi sollevati nel *De Revolutionibus*. Dal punto di vista geometrico è, però, equivalente a quello copernicano: conserva così i vantaggi matematici del sistema copernicano senza gli inconvenienti fisici, cosmologici e teologici ad esso connessi. Si tratta in sostanza di un sistema misto che cerca di conservare la centralità della Terra pur sfruttando alcuni elementi di vantaggio del sistema copernicano. La Terra è ferma nel centro geometrico di una sfera stellare, la cui rotazione quotidiana spiega i circoli giornalieri delle stelle: Sole, Luna e pianeti ruotano quotidianamente con le stelle in direzione ovest dalla sfera esterna delle stelle. I circoli della Luna e del Sole sono centrati sul centro della Terra. Il centro delle altre cinque orbite è trasferito dalla Terra al Sole.

L'astronomia Nova

Le argomentazioni qualitative di Copernico sono sviluppate per esteso e con disegni particolareggiati da Johannes Keplero (1571-1630) nella *Astronomia Nova* pubblicata nel 1609. Keplero prende le mosse dalla critica ad alcuni aspetti del sistema matematico di Copernico, essendosi reso conto delle sue incongruenze, e risolve il problema dei pianeti adattando i procedimenti matematici eccessivamente tolemaici di Copernico alla visione copernicana di un universo dominato dal Sole. L'unione del copernicanesimo con i nuovi dati prodotti da Tycho Brahe permette una soluzione di successo al problema dei pianeti e la definitiva dimostrazione della superiorità della visione copernicana. Con la proposta di orbite ellittiche per i pianeti, Keplero risolve definitivamente il problema del moto dei pianeti con una singola curva. Le conoscenze realizzate da Keplero sono sintetizzate le sue tre famose leggi.

- *I legge*: i pianeti si muovono in orbite ellittiche intorno al Sole che si trova in uno dei fuochi dell'ellisse;
- *II legge*: la velocità orbitale di ciascun pianeta varia in modo tale che una linea retta che congiunge il Sole e il pianeta spazza in uguali intervalli di tempo uguali porzioni di superficie dell'ellisse;
- *III legge*: i quadrati dei periodi di rivoluzione dei pianeti sono direttamente proporzionali ai cubi dei semiassi maggiori delle loro orbite.

Alla base di questi risultati stanno la convinta fede nel copernicanesimo e il neoplatonismo di fondo per cui tutti i fenomeni fisici devono spiegarsi con leggi matematicamente semplici. Non è inoltre da sottovalutare l'apporto fornito dai dati di Brahe che, data la loro correttezza e vastità, permettono di fondare la nuova conoscenza.

Con Keplero la superiorità del sistema copernicano rispetto a quello tolemaico è ormai provata. Si tratta in sostanza di una dimostrazione matematica che, proprio per la sua natura, rimane predominio dei pochi che hanno gli strumenti per comprenderla e non può quindi essere ancora accettata da tutti. Quali sono gli elementi principali che aprono all'opera di Galileo e alla definitiva unificazione di fisica celeste e fisica terrestre? In sostanza si tratta di una nuova teoria del moto che nasce sia dall'analisi sperimentale (condotta in parte anche con l'uso del cannocchiale) sia da una nuova struttura teorica che muove la pratica sperimentale stessa. Con Galileo Galilei (1564-1642) si ha il definitivo superamento delle concezioni antiche e la dimostrazione, anche empirica (e quindi accessibile a tutti), della correttezza del sistema copernicano.

4. Dalla rivoluzione astronomica alla rivoluzione scientifica

Se la rivoluzione astronomica costituisce il punto di avvio per una diversa concezione dell'universo, è altrettanto vero che le problematiche astronomiche, per essere risolte, richiedono fin dall'inizio un cambiamento radicale delle modalità di pensiero allora dominanti. Per tale motivo in questo paragrafo affrontiamo il passaggio dalla rivoluzione astronomica a una più generale rivoluzione scientifica, cercando di mettere in luce come questo ampliamento di prospettiva sia avvenuto a partire da alcuni problemi specifici.

4.1 Il *Sidereus Nuncius*

Il *Sidereus Nuncius* (pubblicato esattamente nel marzo del 1610) raccoglie le osservazioni fatte al cannocchiale nell'inverno 1609-1610, quando Galileo è ancora ospite nella Repubblica veneziana. Il cannocchiale non è stato inventato da Galileo: cannocchiali abbastanza sofisticati erano realizzati dai maestri vetrai olandesi e servivano principalmente per scopi bellici. Galileo è, però, il primo a puntare il cannocchiale verso il cielo e a raccogliere minuziosamente il risultato di queste osservazioni. Proprio a partire da tali osservazioni ha avvio il processo che porta alla definitiva unificazione della fisica terrestre e della fisica celeste e al superamento della visione aristotelica. Le osservazioni condotte da Galileo per mezzo del cannocchiale sono le seguenti: le macchie solari e lunari; i satelliti di Giove (*planeti medicei*); le osservazioni delle asperità della superficie lunare; un numero maggiore di stelle assai più lontane di quanto si era fino allora creduto. Tali osservazioni conducono principalmente a due risultati: un'estensione dell'universo ben al di fuori dei confini tradizionali e la corruttibilità dei cieli (come per esempio il fatto che la Luna abbia montagne e crateri, che l'ombra del Sole sulla Luna si comporti come durante un tramonto terrestre) che sono del tutto incompatibili con la visione aristotelica della incorruttibilità del mondo lunare. Tutto ciò contribuisce a provare che sulla Terra e sui pianeti valgono le stesse leggi fisiche e che non ha più senso sostenere la divisione aristotelica fra mondo lunare e mondo sublunare così a lungo adottata.

La visione rilevata dal cannocchiale è profondamente copernicana: le prove matematiche della validità del sistema copernicano erano già offerte da Keplero, il cannocchiale in questo senso contribuisce a diffondere il copernicanesimo e funziona da strumento di propaganda per convincere anche chi non ha le conoscenze matematiche necessarie a comprendere la soluzione kepleriana. Esiste però un problema di non poco conto: le critiche mosse a Galileo sull'uso del cannocchiale che potrebbe distorcere la nostra visione, facendoci vedere le cose in modo sbagliato o addirittura facendoci vedere quello che non c'è. Perché il cannocchiale possa essere accettato, deve esistere un'equazione fra fisica lunare e fisica terrestre che gli aristotelici negavano e che è proprio il cannocchiale, invece, a volere dimostrare come valida. È questo uno dei motivi che porta Galileo a sviluppare una nuova fisica che fornisca le basi per questa equazione non solo mostrandola empiricamente, ma dimostrandola razionalmente con le sofisticate argomentazioni della ragione.

Sebbene il *Sidereus Nuncius* sia un'opera molto pacata nel tono dell'esposizione, Galileo da questo momento deve affrontare numerosi problemi. Con il cannocchiale il copernicanesimo cessa di essere una teoria esoterica e diviene una teoria alla portata di tutti, che tutti possono comprendere ed, eventualmente, accettare. I confini dell'universo si estendono ben al di là dei confini tradizionali,

anche se Galileo non si pronuncia sull'eventuale infinità dell'universo, non si capisce bene se perché timoroso di ulteriori ripercussioni sulla sua posizione di fronte alla Chiesa oppure solo perché non è ancora arrivato a concepirla.

4.2 Il Dialogo sopra i due massimi sistemi

Il Dialogo sopra i due massimi sistemi (1632) presenta la sintesi della nuova fisica e del nuovo metodo scientifico così come proposti da Galileo Galilei. Il *Dialogo* pone le basi del metodo scientifico inteso nel senso moderno, mentre riflette sui compiti e sui caratteri della scienza fisica.

Anche il *Dialogo* nasce da preoccupazioni cosmologiche e, in particolare, i problemi di cui Galileo si occupa e a cui deve dare una soluzione sono:

- il problema della persistenza del movimento nel caso dei pianeti;
- gli argomenti contro il moto della Terra;
- la caduta dei gravi.

Comincia così a farsi strada l'idea che per modificare la fisica aristotelica sia necessario modificare la sua concezione cosmologica. Dal punto di vista astronomico nel *Dialogo* Galileo utilizza ed espande gli argomenti del *Sidereus* per criticare la concezione cosmologica aristotelica.

L'opera

Il libro è scritto in forma di dialogo, probabilmente per ovviare alle critiche che già il Santo Uffizio aveva cominciato a muovere a Galileo. I personaggi sono Salviati, che rappresenta l'alter ego di Galileo, Sagredo, colui che incarna il buon senso comune e Simplicio, l'aristotelico dogmatico e poco riflessivo. Tuttavia, anche se le posizioni galileiane non sono direttamente espresse, esse sono facilmente riconoscibili. È da notare, inoltre, che si tratta di un testo scritto in italiano volgare (e non in latino), il che ha certamente contribuito ad accrescere le schiere dei lettori, mettendo quindi Galileo in una posizione sempre più difficile. Dal punto di vista retorico utilizza un metodo pedagogico socratico, fatto di domande e risposte, che dovrebbe portare il lettore a realizzare passo per passo la validità delle tesi sostenute da Salviati.

Il libro si apre con l'attacco alla distinzione aristotelica fra mondo lunare e mondo sublunare. Gli argomenti di Aristotele sono argomenti seri e vanno discussi seriamente. Per Aristotele il punto di partenza è dato dalla percezione sensibile per cui la teoria fisica non può mettere in dubbio il dato immediato della percezione; al contrario per Galileo il reale fisico non è dato ai sensi, ma è invece conosciuto dalla ragione.

I risultati a cui Galileo arriva, passo per passo e in modo maieutico, sono (Koyré 1976):

- La relatività ottica e fisica del movimento: non solo il movimento della Terra non è percettibile, ma non ha neppure effetto su quello che accade sulla Terra;
- La conservazione del movimento: nella nuova fisica di Galileo non è più soltanto il moto di rotazione che si conserva, ma è il movimento che si conserva da sé medesimo. In questo modo scompare il carattere privilegiato del moto naturale e cade quindi la distinzione fra moti violenti e naturali; il movimento si conserva non perché è naturale, ma perché è un movimento. Tuttavia, anche se dal punto di vista teorico il carattere privilegiato del moto circolare è energicamente combattuto, dal punto di vista pratico Galileo non riesce a trarne tutte le conseguenze possibili fino a giungere al principio di inerzia.

Per illustrare la relatività ottica e fisica del movimento, Galileo, oltre alla trattazione teorica, utilizza una serie di esempi, tra i quali anche quello assai noto della nave. Dove atterra un sasso lasciato cadere dalla cima dell'albero di una nave in movimento? si domanda Salviati, e Simplicio risponde che il sasso cadrà sul ponte della nave a una distanza dall'albero pari a quella percorsa dalla nave nel tempo che il sasso ha impiegato a raggiungere terra. Chiede ancora Salviati: chi ha fatto questa esperienza? E la risposta è nessuno, perché tutti si sono rimessi all'autorità, all'autorità dei libri, o meglio di una certa tradizione scolastica, che prescrive questa risposta. L'esperienza infatti mostrerebbe

qualcos'altro, dice Salviati: "*Perché chiunque la farà, troverà l'esperienza mostrar tutto 'l contrario di quel che viene scritto: cioè mostrerà che la pietra casca sempre nel medesimo luogo della nave, stia ella ferma o muovasi con qualsivoglia velocità*" (Galilei 1996 (1642): 153). Ma è proprio necessario fare quest'esperienza? E qui la risposta di Salviati sembra essere quanto meno contraddittoria. Salviati infatti ritiene che la buona fisica si faccia a priori, e non mediante l'esperienza. E' Simplicio, portavoce dell'aristotelismo, a rappresentare il campione dell'esperienza, un'esperienza che, laddove non sia correttamente interpretata, può facilmente ingannare. Dice Salviati: "*Io senza esperienza sono sicuro che l'effetto seguirà come vi dico, perché così è necessario che segua; e più v'aggiungo che voi stesso ancora sapete che non può seguire altrimenti, se ben fingete, o simulate di fingere, di non lo sapere. Ma io sono tanto buon cozzon di cervelli, che ve lo farò confessare a viva forza*" (Galilei 1996 (1642): 153).

Dalla nave alla Terra il passo è breve: "*Onde, per esser la medesima ragione della Terra che della nave, dal cader la pietra sempre a perpendicolo al piè della torre non si può inferir nulla del moto o della quiete della Terra*" (Galilei 1996 (1642): 162). Meno scontato, ma supportato dalle osservazioni raccolte nel *Sidereus*, il passaggio dalla Terra ai cieli: le stesse leggi della fisica valgono sulla Terra e nei cieli e la distinzione fra mondo lunare e mondo sublunare cessa di valere.

Nonostante questi risultati fondamentali Galileo non arriva a formulare in maniera chiara e distinta il principio di inerzia (Koyré 1976), per il quale un corpo, abbandonato a se stesso, persiste nel suo stato di immobilità o di movimento finché qualcosa non intervenga a modificare questo stato. Una delle possibili cause è probabilmente la mancanza di una completa geometrizzazione dello spazio e della definitiva distruzione del cosmo, ossia di un mondo ordinato in cui i corpi fisici hanno come carattere costitutivo la gravità. La fisica di Galileo è una fisica dei gravi; vi è ancora confusione fra gravità e massa, dato che la gravità non è una forza che agisce sul corpo, ma qualcosa di cui il corpo è dotato, qualcosa che appartiene al corpo stesso.

Non è qui il luogo per fare un riassunto di tutta la fisica galileiana e dei suoi risultati. Ciò che importa è focalizzare quegli elementi concettuali che permettono di capire la nascita della scienza moderna e il metodo utilizzato da Galileo. Possiamo così cominciare ad osservare come la nascita della scienza moderna avvenga come fisica matematica (che comprende matematismo fisico e matematizzazione della natura secondo i quali la natura è scritta con un linguaggio matematico) a partire dall'emancipazione del movimento, dalla disgregazione del cosmo e dalla geometrizzazione dello spazio, nonostante ciascuno di questi passaggi non sia ancora completo in Galileo.

5. Il metodo scientifico galileiano

Non esiste nessuna opera specifica di Galileo sul metodo; ciò che si può dire deve quindi essere estrapolato dai vari scritti di Galileo, in particolare dal *Dialogo*. In questo paragrafo ci occupiamo di presentare le linee direttrici della metodologia scientifica galileiana, che stanno alla base della scienza moderna e del suo funzionamento, nonché le sue conseguenze sulla visione del mondo sottostante.

5.1 Il metodo sperimentale galileiano

La caratteristica principale del metodo galileiano consiste nel suo essere alla confluenza di due poli, nessuno dei quali singolarmente lo esaurisce. Abbiamo, da un lato, il carattere matematico-razionalistico (*certe dimostrazioni*) e dall'altro il carattere empirico (*sensate esperienze*) (Galilei 1996 (1642)).

Quale delle due è predominante? Dipende dalle interpretazioni. Ad esempio per Koyré (1976) l'istanza matematico-razionalista è assolutamente primaria. Tuttavia, qui non è importante capire come l'una possa prevalere sull'altra, quanto come esse possano essere combinate per dare luogo a quel razionalismo empirista che è la cifra della metodologia galileiana.

La natura va interrogata per scoprire le leggi dei fenomeni: bisogna però saperla interrogare. La matematica esercita un ruolo fondamentale sia nel guidare questa interrogazione sia nel costruire le

teorie. Il metodo è chiamato *sperimentale* non in quanto si basa sull'esperienza (che come abbiamo visto può ingannare e quindi deve essere correttamente interpretata), ma sull'*esperimento*: il concetto di esperienza muta radicalmente e il passaggio dall'esperienza all'esperimento deriva dalla radicale messa in crisi dell'autorità del senso comune.

Esperimento vuol dire esperienza regolata e controllata e quindi proprio quel processo di andare al di là di ciò che è dato immediatamente ai sensi: un processo di interpretazione. L'ideale di sapere scientifico che ne consegue è quello che vede la propria ragione d'essere nella confluenza fra fatti sperimentali e apparati concettuali.

Anche il linguaggio della scienza si rinnova: è il linguaggio della matematica, con cui la natura è scritta e attraverso cui la natura deve essere interrogata. La natura parla con linguaggio matematico, un linguaggio le cui lettere e le cui sillabe sono triangoli, cerchi e rette. Perciò è in questo linguaggio che bisogna porre le domande, afferma Galileo in un giustamente famoso passo del *Saggiatore*.

Altra caratteristica importante del metodo sperimentale è l'osservazione precisa dei dati che si traduce nell'uso di un linguaggio quantitativo anziché qualitativo, in strumenti di misura che potenziano i sensi umani (come per esempio il cannocchiale e il microscopio) e nell'introduzione di accorgimenti che permettono di ripetere l'esperienza in condizioni di più agevole controllo (esperimento).

5.2 Teoria ed esperimento

Secondo una prima e generale definizione, una teoria può essere considerata come un insieme di definizioni generali, assiomi e teoremi, espressi talvolta con linguaggio matematico, dai quali può essere dedotto il comportamento dei fenomeni stessi. Qual è la sua relazione con l'esperienza? Secondo Galileo gli assiomi e le definizioni generali, nella maggior parte dei casi, non sono ricavati dall'esperienza e neppure possono venire totalmente controllati dall'esperienza. Ad esempio, il controllo nell'esperienza è impossibile per il concetto di moto naturalmente accelerato che usa concetti infinitesimali come quelli di velocità all'istante e di accelerazione. Inoltre, non è necessario che tutte le proposizioni di una teoria siano aderenti ai fatti (anzi questo nella realtà si verifica raramente); è necessario invece che tutti i fatti del campo dei fenomeni studiati risultino inquadrabili nella teoria, quindi interpretabili e spiegabili alla luce della teoria stessa.

La teoria fisica è certamente diversa dalla matematica pura. La matematica non richiede il controllo dell'esperienza e continua a valere indipendentemente dal fatto che le figure studiate esistano o meno in natura. La fisica si propone di giungere ai fenomeni e se le sue conseguenze non trovano conferma cessa di avere valore scientifico. Tuttavia, per Galileo, la matematica gioca un ruolo essenziale per la fisica. La funzione della matematica nella fisica è quella di permetterci di formulare con esattezza i principi delle teorie e di determinare con assoluto rigore le conseguenze da essi deducibili. E' possibile non ripudiare una teoria per il solo fatto che essa appare a prima vista contraria all'esperienza: prima di decidere se essa corrisponda o meno ai fatti, occorre precisare il significato delle conseguenze particolari ricavabili dalla teoria stessa.

Nell'analizzare le relazioni fra teoria ed esperimento, non può essere dimenticato che uno dei tratti distintivi della rivoluzione scientifica è il graduale passaggio dall'esperienza all'esperimento. L'esperimento può essere definito come l'insieme di azioni e osservazioni, condotte nel contesto della risoluzione di un particolare problema, per supportare o falsificare un'ipotesi o una ricerca concernente i fenomeni. Occorre ricordare che gli esperimenti sono sempre svolti in condizioni controllate; in altre parole essi consistono nel produrre circostanze controllate in cui può essere assunto che una relazione oggetto di studio non dipende da cambiamenti in fattori controllabili, o perché questi fattori sono costanti oppure perché la relazione investigata è stata resa indipendente dalle variazioni dei fattori non controllati. Il fenomeno investigato, quindi, deve essere trattato come un oggetto isolato in cui gli altri fattori, che non sono oggetto di indagine, non influenzano la relazione studiata.

Tra i tratti caratteristici dell'esperimento vi sono:

- Il controllo delle condizioni sperimentali.

- Il fatto che i risultati di un esperimento non sono mai isolati ma sono frutto di una serie di ripetizioni in tempi e luoghi diversi (ripetibilità).
- Il fatto che i risultati di un esperimento debbano potere essere riprodotti da parte di qualsiasi altro scienziato che metta in atto le condizioni iniziali e i processi precedentemente seguiti (replicabilità).
- L'uso di strumenti di osservazione e di misura capaci di potenziare i sensi e andare al di là di quanto direttamente osservabile.
- La possibilità di usare un linguaggio rigoroso in grado di conferire rigore e precisione ai dati sperimentali.
- La precisione delle misurazioni.

La mera osservazione dell'esperienza non è più sufficiente per confermare o non confermare una teoria: l'esperienza infatti può ingannare e per questo motivo deve essere adeguatamente interrogata per mezzo di esperimenti e correttamente interpretata alla luce di una teoria. Per questo motivo per progettare correttamente un esperimento è già necessaria una teoria, o perlomeno della conoscenza teorica, che guidi nella sua costruzione.

5.3 Conseguenze

La metodologia galileiana può essere vista come una terza via rispetto all'istanza razionalistica (elaborazione di teorie generali tese a scoprire i principi primi della realtà) e a quella empirista (semplice descrizione di un settore limitato dell'esperienza). Le teorie sono legate costantemente e sistematicamente all'esperienza: se il legame con l'esperienza potrebbe sembrare costituire una forma di provvisorietà, di fatto il ruolo dell'esperienza non è mai per promuovere una radicale sostituzione delle teorie, ma solo una loro revisione. Le conseguenze che ne derivano sono il rigore verso l'indagine scientifica e la promozione di alti standard di razionalità.

Come conseguenza di questo mutato contesto che vede la nascita della fisica-matematica, intesa in senso moderno, anche le relazioni fra scienza e tecnica mutano radicalmente. Teoria e pratica non risultano più separate come in passato (dove *epistème* e *téchne* nella concezione antica sono viste come sapere dimostrativo e sapere pratico che utilizzano metodologie completamente differenti), ma sono in continuo scambio. La situazione di reciproco scambio è ben evidente nel caso della creazione dei primi strumenti di osservazione (come cannocchiali e microscopi) e della nascita dell'ottica moderna. Gli strumenti di misura non sono semplici prolungamenti dei sensi umani, ma strumenti che permettono di andare al di là dei sensi umani e quindi di ciò che è dato in modo immediato: i fatti visibili sono differenti dai fatti osservabili. Più precisamente, gli strumenti di misura sono teorie realizzate tecnicamente e non più semplici utensili perfezionati per prove ed errori, il cui corretto funzionamento è regolato teoricamente prima che praticamente. La tecnica è scienza applicata e quindi non funziona per caso, ma è guidata da una precisa conoscenza teorica.

Da questa visione discende la progressiva importanza delle scienze applicate e del loro ruolo nella società con una conseguente modifica della figura del filosofo della natura. L'obiettivo della scienza non è più solo la descrizione ma anche l'applicazione. Ciò porta a una progressiva importanza delle scienze applicate e a una modifica del loro ruolo nella società: nascono le figure degli ingegneri scienziati. Inoltre, il carattere pratico della conoscenza non viene più visto in modo svalutativo, ma come prova ulteriore del valore della conoscenza teorica e della sua universalità applicativa.

6. La scienza moderna

Nei paragrafi precedenti abbiamo già tratteggiato gli elementi distintivi del pensiero scientifico moderno. In questo paragrafo ci proponiamo di approfondirne alcuni, mostrando tradizioni di ricerca alternative a quella di Galileo e che, tuttavia, hanno contribuito alla mirabile sintesi della scienza moderna, così come espressa dai risultati di Isaac Newton.

La rivoluzione scientifica e il modo in cui si caratterizza la scienza moderna non può certo dirsi esaurita dalla figura di Galileo Galilei. Se a Galileo è riconosciuto il merito del metodo scientifico sperimentale, dal punto di vista conoscitivo il traguardo della scienza moderna è raggiunto con Newton. Sebbene tra Galileo (1564-1642) e Newton (1642-1727) non intercorrano molti anni, i risultati di Newton non possono essere compresi se letti in un'ottica esclusivamente galileiana.

In realtà sono due le principali correnti di pensiero, in parte antitetiche, che hanno dominato la rivoluzione scientifica del XVII secolo e che affondano entrambe le loro radici nel pensiero antico (Westfall 1984):

- la tradizione platonico-pitagorica (quella per intenderci cui fa riferimento Galileo) per cui la natura è considerata in termini geometrici e il cosmo è costituito secondo i principi dell'ordine matematico;
- la filosofia meccanicista per cui la natura è concepita come un'immensa macchina e obiettivo della scienza è spiegare i meccanismi nascosti dietro ai fenomeni.

L'idea qui non è di fare un'analisi approfondita della filosofia meccanicistica né dei risultati di Newton ma, ancora una volta, è quella di delineare un percorso di pensiero che ci aiuti a comprendere i tratti della scienza moderna e le sue caratteristiche.

A concepire la filosofia meccanicista non fu un solo uomo, ma una serie di persone con posizioni anche molto diverse fra loro. Tuttavia, il nome a cui la filosofia meccanicista è maggiormente legato è quello di Cartesio (1596-1650). Alla base della filosofia meccanicista, che riprende alcune idee dell'atomismo antico, sono le seguenti idee:

- i corpi comprendono soltanto particelle di materia in movimento e tutte le loro qualità apparenti (ad esempio colore) non sono che sensazioni suscitate da corpi in moto che urtano i nervi (atomi);
- il mondo è una macchina, composta da corpi inerti, mossa da necessità fisica, indifferente all'esistenza di esseri pensanti; anche i fenomeni organici sono meccanici;
- tutti i fenomeni naturali possono essere fatti risalire a due principi universali: materia e moto;
- solo i rapporti fisici di causa ed effetto valgono e devono essere considerati "scientifici"; in questo senso la tradizione meccanicista è in contraddizione con la tradizione di descrizione matematica della natura e costituisce un ostacolo alla completa matematizzazione della natura.

Come conseguenza di questa visione, nel corso del XVII secolo si può dire in generale che i filosofi meccanicisti tendevano non a verificare le teorie ma a cercare meccanismi atti a spiegarle. Newton risolve la tensione, ponendo su base sperimentale ciò che Cartesio aveva collocato esclusivamente su una base speculativa. Nell'ottica, in particolare, dalla sperimentazione sorgono nuovi fenomeni o proprietà inintelligibili per i modelli meccanicisti di spiegazione della natura della luce.

Newton, tuttavia, non deve essere visto come alternativo alla filosofia meccanicista, bensì come suo emendatore e colui nel quale le due tendenze (platonico-pitagorica e meccanicista) si risolvono (Westfall 1984). Il riconoscimento newtoniano dell'esistenza di forze (come qualcosa di non materiale) che agiscono fra particelle di materia costituisce, infatti, una rottura importante con la prevalente filosofia meccanicista della natura. Newton stesso considera le forze fra particelle non una negazione della filosofia meccanicista, ma la concezione necessaria per perfezionarla. Aggiungendo una terza categoria – la forza – a materia e a moto Newton cerca di riconciliare la meccanica matematica con la filosofia meccanicista. È in questo scenario che Newton arriva a formulare la legge di gravitazione universale e la scienza naturale viene posta ad un livello di sofisticatezza che da allora costituisce il paradigma di una dimostrazione scientifica. Secondo la definizione newtoniana il concetto di forza è ciò che produce un cambiamento di moto, più precisamente una quantità astratta che può misurare il cambiamento di moto di un corpo.

Philosophiae naturalis principia mathematica

L'opera principale di Newton, pubblicata per la prima volta nel 1687, ha tra gli obiettivi quello di dimostrare non soltanto che le forze che mantengono in orbita numerosi satelliti sono identiche in natura, ma anche che sono identiche ad una forza nota a tutti sulla Terra, ossia quella che fa cadere a terra una mela. La concezione newtoniana dell'universo è per un verso meccanicista, ma per un altro è assai più dettagliata e raffinata della concezione cartesiana. L'universo è composto da particelle di materia che si attraggono tutte tra loro con una forza proporzionale ai prodotti delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza che le separa. La legge di gravitazione universale è la legge che definitivamente unifica la meccanica celeste e terrestre, dopo che Galileo ha contribuito a porre la questione. Sebbene anche l'universo di Newton abbia una natura meccanica, tuttavia, c'è una sostanziale differenza rispetto ai filosofi meccanicisti tradizionali: l'accettazione da parte di Newton di un ideale scientifico che ammette l'imprescrutabilità ultima della natura, ossia il fatto che non tutto può essere ricondotto a relazioni materiali di causa ed effetto.

A questo proposito è interessante considerare lo *Scolium generale* (una sorta di corollario) che Newton aggiunge alla seconda edizione dei *Principia* pubblicata nel 1713. La domanda principale riguarda la causa della gravità. La risposta di Newton è riassunta nella celebre frase *hypotheses non fingo*, ossia "non avanzo ipotesi". Infatti tutto ciò che non viene dedotto dai fenomeni deve essere chiamato ipotesi; e le ipotesi, siano esse metafisiche o fisiche, siano di qualità occulte o meccaniche, non trovano posto nella filosofia sperimentale di Newton. Anche se in realtà non è del tutto vero che Newton non avanzi ipotesi, è importante vedere però che mantiene sempre una rigida distinzione fra conclusioni dimostrate e ipotesi volte a spiegarle e rifiuta di inquinare le dimostrazioni con speculazioni. Così per Newton la forza è un concetto necessario per descrivere i fenomeni in termini meccanicisti, la cui validità si basa sull'utilità nelle dimostrazioni, non su ipotesi che ne possano spiegare l'origine. Nella visione di Newton la scienza non può sperare di ottenere una conoscenza certa delle essenze delle cose. Se nella filosofia meccanicista lo stimolo costante era stato immaginare meccanismi invisibili, sulla base della convinzione che una spiegazione scientifica fosse valida esclusivamente quando riconduceva i fenomeni ad entità prime, Newton crede che lo scopo della fisica sia una descrizione esatta dei fenomeni del moto in termini quantitativi: così può ammettere il concetto di forza nelle dimostrazioni scientifiche anche se non ne comprende la realtà ultima.

7. Le caratteristiche della scienza moderna

Con Newton il pensiero scientifico moderno assume la sua forma più completa, facendo confluire in un unico approccio la tradizione platonico-pitagorica e quella meccanicista. In questo paragrafo sono prima riassunte le caratteristiche del pensiero scientifico, poi se ne valuta l'evoluzione e, infine, l'entrata in crisi di alcuni suoi presupposti.

7.1 I caratteri della scienza moderna

La scienza moderna presenta una serie di caratteristiche che la distinguono da altre forme di conoscenza. Quelle elencate di seguito sono le più significative.

- *Sperimentabilità*: l'esperimento, e non la mera osservazione dell'esperienza, è alla base della scienza moderna. L'esperimento è esperienza correttamente interrogata, controllata e, in un certo senso, analizzata e interpretata alla luce di una teoria; inoltre l'esperimento definisce precisamente i criteri di testabilità e controllo.
- *Verità*: la conoscenza scientifica è una forma di conoscenza vera, ma non assoluta né omnicomprensiva. Galileo ritiene, infatti, che solo nella conoscenza matematica l'intelletto umano raggiunga la perfezione stessa dell'intelletto divino.
- *Oggettività e universalità*: la conoscenza scientifica pretende di giungere a un sapere universalmente valido, accessibile e condivisibile da tutti.

- *Linguaggio universale e quantitativo*: il linguaggio della scienza è comune a tutti gli scienziati, quindi intersoggettivo, preciso e misurabile. Sulla base di questo linguaggio condiviso, la conoscenza può essere rigorosamente messa a confronto.
- *Valore della critica*: la conoscenza scientifica è una forma di conoscenza dinamica che apre a nuovi confronti coi fatti, a nuove estensioni e a nuove rimodulazioni del sapere. La critica è un elemento essenziale e costituisce parte determinante di questo tipo di conoscenza.
- *Scientia activa et operativa*: nella conoscenza scientifica funzione conoscitiva e funzione pratica si fondono e la scienza supera l'antica distinzione fra *epistème* e *téchne*.
- *Strumenti di misura e di osservazione*: gli apparati strumentali sempre più sofisticati assumono un'importanza fondamentale e consentono di superare i limiti dei sensi umani.
- *Ruolo della ragione e rifiuto dell'autorità*: questa nuova conoscenza si basa sulla fiducia nella ragione (che è di tutti) e sul rifiuto dell'autorità, promuovendo una nuova visione dell'uomo e il valore della scienza come elemento propulsore e rinnovatore della società.

7.2 Istituzionalizzazione

Se fino a questo punto sono state esaminate le condizioni per la formazione dell'ideale moderno di scienza, ossia la riforma della filosofia naturale, occorre ora concentrarsi sulle condizioni per la sua accettazione. Da questo punto di vista si può dire che la scienza contemporanea così come si presenta oggi sia sorta da due processi: l'istituzionalizzazione e la professionalizzazione della ricerca derivante dalla sua industrializzazione (Amsterdamsky 1981).

Per potere mettere in atto un processo di *istituzionalizzazione* di un'attività sono necessari tre diversi fattori:

- Il riconoscimento ad opera della società della validità e dell'importanza sociale di una data attività. Nel caso della scienza si tratta di riconoscere piena validità conoscitiva al metodo che viene utilizzato e che trova la sua legittimazione nella concezione dell'autonomia conoscitiva del soggetto.
- La definizione di norme relative al comportamento di coloro che svolgono quella determinata attività. Nel caso della ricerca scientifica ciò esige l'osservanza di norme quali: la ricerca disinteressata della verità; la pubblicità dei propri risultati sia per rendere possibile il controllo e la critica da parte di altri sia per rendere utilizzabili i risultati in altre ricerche; il principio che il valore delle asserzioni scientifiche non dipende dal loro autore: il rispetto di questa norma rende possibile il costituirsi di una collettività internazionale di scienziati; lo scetticismo di fronte ai risultati altrui, ossia la responsabilità personale per l'uso dei risultati ottenuti da altri e la pubblicità di ogni riserva critica sui lavori altrui.
- L'adattamento alle norme che regolano il funzionamento di altri sistemi sociali alle norme cui tale attività è subordinata. Nel caso della ricerca scientifica ciò implica che al di fuori del sistema siano soddisfatte determinate condizioni, quali la libertà di parola e di pensiero, la libertà di comunicare, oltre a una disponibilità sociale alle trasformazioni che possono derivare dalla stessa libertà di ricerca e dall'applicazione dei suoi risultati. Naturalmente esiste sempre la possibilità di conflitto fra i valori interni alla scienza e i valori della società al cui interno la scienza è inserita (condizione ottimale sarebbe che i due sistemi di valori coincidessero).

Dal punto di vista sociale, l'istituzionalizzazione crea, a partire dal XVII secolo, un nuovo ambiente intellettuale composto da uomini di cultura capaci di valutare i loro risultati, di partecipare alle loro discussioni e interessati al loro lavoro. Una delle prime forme di istituzione scientifica sono i musei della scienza. I musei della scienza non sono solo luoghi di conservazione e raccolta, ma anche e soprattutto luoghi di discussione e ricerca (Beretta 2002). Possono essere visti come i primi esempi di laboratori in cui si vede come l'attività scientifica esiga forme di ricerca collegiali. In Italia si hanno importanti collezioni naturalistiche, in particolare i giardini botanici (come quello fondato

dall'Aldovrandi a Bologna nel 1561) sono sedi privilegiate delle ricerche naturalistiche. Solo dal XVIII secolo le collezioni naturalistiche cominciano a essere usate anche a fini didattici (ciò non elimina però la loro funzione di luoghi di ricerca scientifica e sperimentale).

Le vere e proprie accademie sorgono solo in un secondo momento, e proprio sulla scorta dei musei scientifici (Beretta 2002). Esse sono la conseguenza della nuova organizzazione istituzionale e sociale del sapere dopo la rivoluzione scientifica del XVII secolo. Le accademie scientifiche, che nascono simultaneamente in varie parti di Europa, sono basate più sull'organizzazione collegiale della ricerca che sulla creatività e l'intraprendenza individuali. Nel caso dell'Accademia dei Lincei (1603), il ruolo dell'accademia è più per promuovere la pubblicazione e diffusione dei risultati scientifici ottenuti singolarmente, piuttosto che come luogo di una collaborazione comune. L'Accademia del Cimento (1657) è la prima accademia ad essere organizzata secondo una struttura sociale e istituzionale che prefigura la nascita e lo sviluppo delle accademie moderne (*Royal Society* 1660, *Académie des Sciences* 1666).

In generale si può dire che la nascita delle accademie supporta un nuovo modo di fare scienza: esse sono la condizione per la collaborazione fra diversi membri di un gruppo unito da interessi scientifici omogenei e per la sperimentazione pubblica come mezzo di persuasione dell'oggettività e utilità delle scoperte. Tra le varie novità che rivoluzionano il modo di praticare e intendere la scienza, promosse anche dalla nascita delle accademie, spiccano: la standardizzazione dei risultati che avviene con la pubblicazione dei primi periodici (*Philosophical Transactions* 1665) che hanno scopi di diffusione e controllo e formano una comunità internazionale di scienziati; la valorizzazione della specializzazione delle discipline.

A partire dalla fine del XVIII secolo, e dopo la critica alle accademie durante il periodo della Rivoluzione francese, si assiste a un declino del ruolo istituzionale e scientifico delle accademie a favore dei laboratori e delle università. Nella prima metà del XIX secolo nascono le prime associazioni scientifiche disciplinari che rivelano come lo scenario della scienza europea stia profondamente mutando in favore di organismi più snelli e più incisivi sul piano decisionale e politico.

Un'istituzione importante che segna anche il passaggio dal processo di istituzionalizzazione a quello di professionalizzazione è, senza dubbio, l'università. Si tratta generalmente di strutture ancora legate al mondo medievale e rinascimentale, dedicate solo alla didattica (in cui si verificano progressivamente vari cambiamenti), mentre la ricerca scientifica rimane ancora questione privata. Il ricercatore scientifico è visto ancora come dilettante e non come professionista: la scienza come l'arte è una vocazione spirituale e non un mestiere. Così fino al XIX secolo, nonostante i progressi e alcune eccezioni, l'università non riesce a imporsi come luogo privilegiato della ricerca scientifica.

In generale l'impresa scientifica in questo momento ha ancora pochi contatti con economia e politica: nella maggior parte dei casi la nuova scienza è ancora apprezzata in generale come valore fine a se stesso e come ricerca indipendente e disinteressata della verità.

7.3 Professionalizzazione

Per *professionalizzazione* si intende quell'insieme di processi che ebbero l'effetto di trasformare la ricerca da questione privata dell'individuo in impegno formale professionalizzato. A differenza dell'istituzionalizzazione, la professionalizzazione non avrebbe potuto compiersi senza l'esistenza di organizzazioni aventi per fine la ricerca e disposte a fornire i mezzi necessari per svolgerla. Divenne possibile solo quando lo sviluppo delle conoscenze, da un lato, e le trasformazioni sociali, dall'altro, fecero sorgere una domanda di prodotti del lavoro scientifico fuori dalla comunità di scienziati.

Alcune delle condizioni determinanti per il delinearsi del processo di professionalizzazione della scienza possono essere individuate in questi fattori:

- Lo sviluppo e specializzazione del sapere e la nascita di nuove discipline che incitano alla formazione di gruppi di ricerca composti in maggioranza da tecnici e scienziati: la

collaborazione diviene condizione sempre più indispensabile per la preparazione dei giovani alla pratica autonoma della ricerca.

- La necessità della riforma dell'università che avvia una parte degli studenti al lavoro di ricerca offrendo la carriera scientifica professionale come uno dei possibili sbocchi (scienziati di carriera).

La riforma dell'università (che parte dalla Germania all'inizio del XIX secolo) costituisce, in particolare, uno dei motivi per la creazione di un sistema capace di formare scienziati di carriera (Beretta 2002). La chiamata alle cattedre deve costituire ora il riconoscimento di eccezionali meriti scientifici, e non solo della competenza nell'espone conoscenze raccolte da altri (come nell'università medievale). A fianco delle cattedre vengono fondati laboratori e istituti di ricerca, nei quali prestano la loro opera liberi docenti, assistenti intenzionati a dedicarsi alla ricerca e ad ottenere l'abilitazione alla docenza.

La situazione delle università negli Stati Uniti è, per certi versi, assai diversa da quella europea, anche se da questa prende le mosse. La professionalizzazione trova la sua base nella riforma delle università e nel sistema dell'istruzione. Negli Stati Uniti si assiste a una crescente domanda dei prodotti offerti dalla scienza (insieme alle varie conquiste tecniche della seconda metà del XIX secolo, come ad esempio acciaio, motore a combustione interna, vagoni e navi frigoriferi, pastorizzazione, sterilizzazione, concimi artificiali, macchina da scrivere, fotografia, telefono, microfono, radio, vaccini, ecc.). A cominciare da questo momento il progresso tecnico prende a dipendere direttamente da ciò che si fa nei laboratori e nelle officine degli scienziati. Si realizza così pienamente l'ideale scientifico in cui confluiscono la funzione conoscitiva e la funzione tecnica. Si verifica la nascita di una rete di relazioni istituzionali fra scienza, imprese economiche e, solo più tardi, governi che rompe il tradizionale isolamento di ciascuna di queste sfere. I grandi cartelli industriali, infatti, sono più disponibili ad assumersi i rischi connessi all'introduzione di metodi nuovi nella produzione di quanto lo siano le piccole imprese, e quindi sono più disponibili a istituire laboratori di ricerca propri e a finanziarli.

In Europa, al contrario, le università si rivelano del tutto impreparate a questi cambiamenti e la professionalizzazione della scienza avviene fuori dalle mura dell'università, benché questa ne abbia creato le condizioni. Crescendo sempre più la domanda di oggetti scientifico-tecnologici, i legami fra scienza, industria e politica si trasformano in legami duraturi e istituzionali: si avvia il processo di integrazione della scienza con altri sistemi sociali, economia innanzitutto. Attraverso la professionalizzazione cambia il destinatario che non è più il pubblico degli altri scienziati, ma sono le forze produttive. La verità cessa di essere un valore fine a se stesso e viene sostituita dal concetto di *utilità* che promuove una visione della scienza come produttrice di ricette per la manipolazione di oggetti, simboli e uomini. La scelta dei temi di ricerca viene indicata dall'esterno: la pubblicazione dei risultati dipende anche da fattori extrascientifici (ad esempio interessi di mercato). Questo sistema sociale mutato tende a realizzare un ideale di conoscenza differente da quello per cui tali norme erano state varate, un sistema che progressivamente si sta spostando dalla ricerca della verità alla ricerca dell'utilità.

7.4 Crisi dell'ideale moderno di scienza

Se questi processi esterni (in particolare i committenti industriali che decidono quale tipo di ricerca finanziare) contribuiscono alla messa in crisi del moderno ideale di scienza, tuttavia tale crisi non può dirsi completa se non anche attraverso il ruolo giocato da fattori interni. Questa crisi, infatti, deriva anche dalle stesse conquiste conoscitive della scienza, le quali hanno gradualmente minato le proprie basi epistemologiche provocando, come era già avvenuto nel XVI secolo, una nuova revisione del quadro complessivo dell'universo e dello status conoscitivo del soggetto. Tra i fattori determinanti per la strutturazione di questo processo può essere individuata la crisi dell'universalità e della verità della conoscenza: perde sempre più forza la concezione secondo cui il soggetto, comportandosi rispetto al mondo come una sorta di osservatore privilegiato, deve essere in grado di acquisire un tipo di

conoscenza valida sempre e dovunque, un sapere il cui valore non deve dipendere dalle differenti collocazioni del soggetto nel mondo della natura e della cultura. Inoltre, la messa in discussione della sovranità conoscitiva del soggetto non avviene per ragioni metodologiche, ma per ragioni naturali e sociali portate alla luce dallo sviluppo stesso della fisica, della biologia, delle discipline sociali (evoluzionismo). Si tratta, in sostanza, di un processo di relativizzazione dei saperi e dei valori che mina profondamente tutto quanto la scienza aveva, fino ad allora, costruito.

Le conseguenze epistemologiche di questa nuova visione possono essere individuate in una serie di fattori.

- La pretesa della scienza di potere fornire un sapere universalmente valido, vale a dire un sapere su cui non hanno alcuna influenza né le caratteristiche naturali del soggetto né l'apparato concettuale di cui questo si serve per articolare la realtà, né il linguaggio in cui il sapere è formulato, né le condizioni storiche in cui si fa scienza, né infine la cultura in cui è immersa. Questa visione può essere ancora fondata? (Oggettività)
- Il riconoscimento di questi condizionamenti (non più come casuali e eliminabili fattori di deformazione della conoscenza, ma come inevitabili fattori determinanti) consente di considerare la scienza come l'oggettivazione di una stessa e immutabile razionalità umana, come un sapere valido in ogni mondo possibile e per ogni possibile soggetto? (Universalità)
- L'ideale di una scienza sperimentale che interroga la natura e ne ottiene risposte nel linguaggio in cui sarebbe scritto il suo libro non deve in definitiva essere sostituito da un ideale strumentale di scienza? (Strumentale non nel senso che si serve di strumenti, ma che essa stessa è strumento subordinato alla realizzazione di finalità esterne ad essa).

La crisi dell'ideale scienziato ottocentesco (ossia l'universalizzazione dell'accettazione dei valori ai quali si ritiene che l'attività scientifica sia indissolubilmente legata) passa attraverso due processi: l'autonomia della scienza come istituzione sociale comincia a essere scalzata; l'autonomia del soggetto (anche dal punto di vista conoscitivo) viene messa in crisi. Inoltre, i progressi della fisica e delle altre scienze, proprio a partire dallo stesso periodo, promuovono una visione dell'uomo diversificata, soggetta a evoluzioni e condizionata sia da fattori biologici sia da fattori culturali, quindi non più una natura immutabile e completamente autonoma. La crisi dell'ideale scienziato si concretizza in particolare in due problemi. La valutazione della razionalità della scienza rispetto ai valori della cultura di cui essa deve favorire la realizzazione. La questione della razionalità del metodo grazie al quale essa si sviluppa e che deve garantire che essa sia oggettivazione della razionalità umana. E' in questo scenario che la riflessione filosofica sulla scienza comincia a costituirsi come disciplina autonoma dalla scienza, fondando le basi della filosofia della scienza contemporanea.

Bibliografia

- Amsterdamsky, S., 1981. "Scienza" in *Enciclopedia Einaudi*, Giulio Einaudi Editore, Torino, vol. XII, pp. 531-599.
- Beretta, M., 2002. *Storia materiale della scienza*, Bruno Mondadori, Milano.
- Dorato, M., 2007. *Cosa c'entra l'anima con gli atomi? Introduzione alla filosofia della scienza*, Editori Laterza, Roma-Bari.
- Galilei, G., 1996 (1642). *Dialogo dei Massimi Sistemi*, Arnoldo Mondadori Editore, Milano.
- Godfrey-Smith, P., 2003. *Theory and Reality*, Chicago University Press, Chicago.
- Koyré, A., 1976. *Studi galileiani*, Giulio Einaudi Editore, Torino.
- Koyré, A., 1970. *Dal mondo chiuso all'universo infinito*, Feltrinelli, Milano.

Kuhn, T., 1972. *La rivoluzione copernicana*, Giulio Einaudi Editore, Torino.

Westfall, R., 1984. *La rivoluzione scientifica del XVII secolo*, Il Mulino, Bologna.