

FISICA E CONOSCENZA (1)

metodo e valore conoscitivo della fisica

di Giovanni Maria Prosperi*

Nelle Indicazioni Nazionali riguardanti gli obiettivi specifici di apprendimento (di recente emanazione) relativi alla Fisica, alla voce Linee generali e competenze si legge. «Al termine del percorso liceale lo studente avrà appreso i concetti fondamentali della Fisica, acquisendo consapevolezza del valore culturale della disciplina e della sua evoluzione storica ed epistemologica». Perché si realizzi questo obiettivo di apprendimento, il docente è oggi chiamato ad approfondire il proprio orizzonte culturale, vincendo la tentazione diffusa delle semplificazioni manualistiche e delle mode pedagogiche. In questo contributo l'autore delinea un itinerario in cui si intrecciano le tre dimensioni essenziali del sapere fisico: quella conoscitiva, quella sperimentale e quella storica, offrendo al lettore un rigoroso ed efficace percorso di aggiornamento.

A partire da una breve prospettiva storica cercheremo di delineare il metodo con cui la Fisica procede e si sviluppa per poi passare a una discussione sul significato e sul valore delle conoscenze da essa acquisite e sul rapporto con le altre discipline. Accetteremo fondamentalmente l'idea che la Fisica sia una conoscenza per modelli e come tale non esaustiva e in certo senso sempre provvisoria ma che possa anche aspirare in ambiti ben definiti a risultati praticamente definitivi. Riteniamo che un'attenzione a questo tipo di problemi sia didatticamente molto importante, non solo per l'ovvio desiderio di aiutare l'allievo a situare ogni disciplina per quanto possibile nel contesto delle altre, ma anche per il valore formativo per sé che ha una retta comprensione del metodo e le ripercussioni di questa sui modelli didattici adottati e sulla loro evoluzione.

.....
*Ordinario di Istituzioni di Fisica Teorica presso l'Università degli Studi di Milano.
.....

Prospettiva storica: dall'antichità al Medio Evo

L'idea di Scienza nasce nell'antica Grecia. Furono i Greci per primi a giungere al concetto di dimostrazione, a rendersi conto che non era importante solo

sapere «come» le cose sono, ma anche capire «perché» sono come sono. Il mondo egiziano e quello mesopotamico erano in possesso di un buon numero di cognizioni che noi oggi diremo scientifiche; conoscenze di tipo geometrico, come regole per il calcolo di aree e volumi, di tipo algebrico (in particolare in Mesopotamia metodi efficienti per trattare numeri molto grandi), conoscenze di anatomia e sull'efficacia di erbe o altri medicinali, conoscenze sul moto apparente degli astri. Tutte queste conoscenze però erano strettamente finalizzate a scopi di carattere pratico; tracciare nuovi confini nei campi dopo le inondazioni, risolvere problemi relativi all'amministrazione dello stato o alla costruzione degli edifici, curare ferite e malattie, fissare un calendario (necessario per le esigenze dell'agricoltura e del culto), formulare oroscopi (in Mesopotamia era molto sviluppata la cultura del magico). Mancava invece ogni tentativo di giustificazione teorica delle conoscenze acquisite; ciò che interessava erano i risultati; se qualche metodo di carattere generale esisteva, come è probabile, esso era visto esclusivamente in funzione strumentale e non è stato tramandato. Mancava ogni sforzo di sistemazione organica, e qualunque cosa che potesse anticipare l'idea di un trattato.



Talete di Mileto (626 ca. - 548 ca. a.C.)

L'atteggiamento cambiava completamente con l'emergere della cultura greca. A Talete è già accreditata la «dimostrazione» di cinque teoremi di Geometria elementare e gran parte del vocabolario generale della Matematica che noi ancora oggi usiamo (termini come assioma, postulato, ipotesi, dimostrazione, eccetera) sembra risalire alla scuola eleatica. La scuola pitagorica porta avanti importanti riflessioni sulla natura del numero e dell'armonia, compaiono i primi tentativi di organizzazione delle conoscenze matematiche, vengono formulati i primi modelli cosmologici, ci si pone il problema di cosa sia una scienza, del suo valore e dei suoi fondamenti.

Nei suoi *Analitici Anteriori* Aristotele si preoccupa di stabilire le regole del ragionamento corretto (la Logica); negli *Analitici Posteriori* affronta poi il discorso su come una scienza debba essere organizzata e come possa essere fondata.

Aristotele: una conoscenza deduttiva

Secondo Aristotele una scienza deve partire da un certo numero di concetti e di proposizioni primitive; proposizioni di tipo generale, comuni a tutte le scienze (assiomi) e proposizioni specifiche relative alla particolare scienza (postulati). A partire dai concetti primitivi si introducono gli altri concetti di cui la scienza ha bisogno attraverso definizioni formali. Dalle proposizioni primitive si traggono quindi con metodo puramente deduttivo tutte le altre proposizioni in cui essa si articola (i teoremi).

I concetti e le proposizioni primitive secondo Aristotele sono il risultato di un

Aristotele (384 - 322 a.C.)



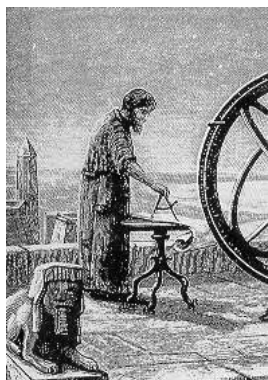
processo che egli chiama di «intuizione intellettuale», nella sostanza un processo di astrazione. Nella sua concezione l'esperienza svolge un ruolo essenziale evocativo e di stimolo, ma non è importante per i contenuti particolari che fornisce. La solidità di una scienza dipende da quella dei suoi postulati e questa va giudicata a priori, non sulla base delle conseguenze che ne derivano.

Un'applicazione sostanzialmente fedele delle regole dettate da Aristotele si può vedere negli *Elementi* di Euclide con le loro spiegazioni sostanzialmente ostensive dei concetti di punto, linea, figura, eccetera, i loro sette assiomi e i cinque postulati, da cui tutti i teoremi sono poi dedotti. È chiaro quanto l'idea di un carattere a priori dei concetti e dei postulati possa essere in generale congeniale alla Matematica (almeno in un suo momento precritico), ma anche quanto essa sia lontana dalla concezione di una scienza sperimentale di tipo ipotetico deduttivo, in cui il valore dei principi si giudica proprio dalla conformità all'esperienza di conseguenze che possono essere anche il risultato di una lunga catena di deduzioni.

Nel mondo greco anticipazioni del metodo sperimentale si hanno certamente nella formulazione dei modelli cosmologici (perlomeno in quella che viene chiamata l'*Astronomia dei matematici*). Sia pure con un pregiudizio a favore del moto circolare, la giustificazione di questi ultimi sta infatti in ultima analisi nella loro capacità di «salvare i fenomeni», cioè di dar ragione del moto apparente degli astri e permettere di prevederne le posizioni. È questo il caso del modello a sfere omocentriche di Eudosso e Callippo, del primo tentativo di un modello eliocentrico da parte di Aristarco, del modello geocentrico basato sui concetti di deferente ed epiciclo sviluppato da Apollonio e Ipparco e ripreso successivamente da Tolomeo.

Altre anticipazioni si possono vedere nell'opera dei meccanici Alessandrini, in Archimede e più in generale nel complesso della scienza ellenistica (le cui opere sono andate però in larga parte perdute). Forse esagerando, un autore italiano recente, Lucio Russo, ha voluto addirittura vedere in questo contesto una vera e propria prima rivoluzione scientifica.

L'ideale dominante della cultura greca resta però certamente quello di poter ricondurre tutto a principi necessari. Bisognerà attendere il Rinascimento perché una Scienza della Natura come scienza sperimentale, nel senso moderno del termine, possa affermarsi. Un ruolo particolare in questo contesto è universalmente riconosciuto alla figura di Galileo. Il merito di quest'ultimo sta non solo nelle scoperte di tipo astronomico o negli studi sulla caduta dei gravi, ma anche e soprattutto nell'aver per primo saputo prendere piena coscienza di un metodo che caratterizza la disciplina almeno quanto i suoi contenuti, e che, con i dovuti aggiornamenti e sviluppi, resta tutt'oggi alla base del nostro modo di procedere.



Aristarco (310-230 a.C.)

Tolomeo (100 - 178)



Il Medioevo: una rivalutazione dell'esperienza

All'origine della scienza sperimentale in quel tempo e nell'Europa occidentale stanno certamente molti fattori. Tali sono il recupero di gran parte del pensiero greco nella sua espressione originale (inclusa in particolare l'opera di Archimede di cui si è detto); i notevoli progressi nella Matematica, legati in parte agli sviluppi del commercio e della navigazione; i progressi in vari rami della tecnologia, dalla lavorazione dei metalli alla molatura delle lenti, che rendevano possibile la costruzione di strumenti sempre più perfetti. Un'importante corrente storiografica, però, che fa capo originariamente ad autori come Pierre Duheme, Alfred Whitehead e include più recentemente tra

gli altri lo storico californiano Lynn White, rivendica un ruolo particolare a tutto il complesso della Filosofia

e della Teologia medievale e sottolinea che la «rivoluzione scientifica» è stata il risultato di un lungo processo di maturazione iniziatosi nel XII secolo, che ha avuto espressione tra l'altro nella scuola di Oxford (Roberto Grosseteste, Ruggero Bacone, Guglielmo di Ockham) e nei suoi epigoni francesi (Giovanni Buridano, Nicola di Oresme) e ha portato a una rivalutazione dei contenuti specifici dell'esperienza come fonte di conoscenza.

Tale processo ha avuto origine nel clima culturale in cui questi movimenti sono nati e ha una chiara radice nella concezione ebraico-cristiana di un Dio creatore, che portava a respingere determinati aspetti del pensiero aristotelico. Di questo tipo era l'idea di un

mondo eterno e necessario, che non potesse essere diverso da come era e che appariva in contrasto con la libertà di Dio nella creazione. Se il mondo è il risultato di una libera scelta di Dio, la pretesa di una conoscenza fondata esclusivamente su principi filosofici di carattere generale diviene inconcepibile e il ricorso a un'esperienza «specificata» diviene essenziale. È così che nell'opera degli studiosi citati, in particolare in Nicola di Oresme, l'idea di un metodo ipotetico deduttivo cominciava a delinearsi.

L'esperienza a cui i tardo medievali si riferivano restava però sempre l'esperienza ordinaria, cioè un'esperienza sostanzialmente passiva. Tra i meriti di Galileo, oltre all'aver applicato il metodo ipotetico sistematicamente e con piena consapevolezza, vi è quello di aver introdotto il concetto di esperimento, o «sensata esperienza», come «interrogazione» ragionata ed esplicita della Natura, come esperienza guidata da un'ipotesi interpretativa e riguardante eventi riprodotti in laboratorio nelle condizioni più favorevoli per l'osservazione.



Ruggero Bacone (1214-1292)

Nicola d'Oresme (1323 - 1382)



Il metodo sperimentale

Una caratteristica molto importante della nuova scienza nata nel Rinascimento è l'angolo visuale sotto cui gli oggetti sono guardati. La Filosofia greca come quella medievale sono dominate dal problema della ricerca delle «essenze» e delle «cause».

Così si esprime invece Galileo nella sua terza lettera a Marco Wesler: «O noi vogliamo specolando tentar di penetrar l'essenza vera ed intrinseca delle sustanze naturali; o noi vogliamo contentarci di venire in notizia di alcune loro affezioni. Il tentar l'essenza l'ho per impresa non meno impossibile e per fatica non meno vana nelle prossime sustanze elementari che nelle remotissime e celesti [...]. Ma se vorremo fermarci all'apprensione di alcune affezioni, non mi par ci sia da disperar di poter conseguirle anco nei corpi lontanissimi da noi, non meno che nei prossimi».



L'aspetto rivoluzionario di questo atteggiamento sta da una parte nella rinuncia a spiegare i fenomeni naturali ricorrendo a principi metafisici generali, dall'altra nel riconoscimento della possibilità di isolare alcuni aspetti degli oggetti studiati, di delimitare in maniera precisa un certo ambito di fenomeni e di ottenere una conoscenza valida senza necessariamente porli in relazione col tutto. Nel pensiero classico la comprensione del tutto è condizione per la comprensione delle parti, ora invece è spesso dalla conoscenza delle parti che si può giungere a sintesi più ampie. È a un tale atteggiamento che è evidentemente legata la stessa possibilità della Scienza della Natura moderna di articolarsi in capitoli e settori tra loro in larga misura indipendenti.

Modelli ed esperimenti ideali

È in quest'ordine di idee che nasce la possibilità di procedere per idealizzazioni, per modelli e di ragionare su esperimenti ideali; strumento quest'ultimo molto usato in analisi di tipo concettuale nella Fisica moderna, ma già presente in Galileo. Si tratta infatti di prescindere, nello studio di un determinato oggetto, da aspetti ritenuti inessenziali allo scopo che ci si prefigge per concentrarsi su quelli rilevanti. È questo il caso del moto di rivoluzione dei pianeti intorno al sole, quando questi vengono idealizzati come punti, trascurandone le dimensioni, o quello della caduta dei gravi quando si suppone di poter prescindere dalla resistenza dell'aria.

Nel medesimo contesto alcune correnti di pensiero ritengono che la Fisica

Galileo Galilei effettua l'esperienza della caduta dei gravi sul piano inclinato (Firenze, GDSU, Inv. 5014 F disegno, 1839) [moro.imss.fi.it] Sotto il disegno è scritto: «Esperimento della caduta dei Gravi Fatto dal gran Galileo all'Università di Pisa alla presenza/ dei Professori e della Scolaresca. Giuseppe Bezzuoli donò al suo amico Martelli/ in attestato di amicizia e di ricompensa.»

debba avere per obiettivo solo di studiare «come» si svolgono i fenomeni, lasciando eventualmente alla Filosofia il problema del «perché». Nella stessa linea si sostiene che la cosiddetta spiegazione scientifica sia semplicemente una spiegazione per conformità a delle leggi e non una esplicitazione di cause. Ernest Mach considerava il concetto di causa addirittura ambiguo e in qualche modo antropomorfo e riteneva che esso dovesse essere sostituito con quello più preciso di relazione funzionale. A questo riguardo, a mio parere tuttavia, la Fisica non vuole essere una scienza semplicemente descrittiva e come tale riteniamo che essa si ponga realmente il problema di «spiegare» i fenomeni, che pretenda perciò di dare anche dei «perché» e in questo senso di produrre delle cause. Se non ci si mette in particolari contesti filosofici, la differenza con la Filosofia dovrebbe esser vista piuttosto nel livello a cui le risposte sono attinte. Dei vari tipi di causa considerati da Aristotele, comunque, Galileo accetta come criterio di spiegazione in Fisica solo la causa efficiente, rifiutando per esempio la causa finale (che peraltro può venire recuperata in alcuni contesti).

Galileo: le «qualità primarie» unico oggetto della scienza

Ritornando alle *affezioni*, alle «qualità» dei corpi di interesse, Galileo nella sua opera *Il Saggiatore* le distingue innanzitutto in due categorie, quelle quantificabili e matematizzabili (come sono le dimensioni, l'estensione, la disposizione nello spazio), considerate oggettive e che saranno dette in seguito qualità primarie, e quelle a carattere più soggettivo (il caldo, il freddo, il colore) che saranno dette qualità secondarie. Nello sforzo di creare una scienza per quanto possibile oggettiva e incontrovertibile, egli postula che nell'indagine sulla natura l'attenzione debba essere ristretta solo alle prime.

È quest'ultima da ritenersi una seconda opzione, fondamentale e in qualche modo costitutiva, della scienza sperimentale. Essa oggi si traduce tra l'altro nel requisito di «operatività» nella definizione delle grandezze e di «protocolli» precisi per la loro misura e sono proprio queste caratteristiche che rendono non ambigua l'enunciazione e la comunicazione di un risultato.

Per finire va precisato che quanto detto a proposito delle relazioni tra le parti e il tutto, non significa che la Fisica si debba esaurire in una pura analisi, rivolta a individuare semplicemente i costituenti più elementari degli oggetti e a studiarne le proprietà. A parte l'importanza del modo di organizzarsi di tali costituenti, che non è solamente riconducibile alle proprietà dei singoli, nelle teorie più fondamentali si punta a un punto di vista sempre più unificato. Nell'ambito della Teoria Quantistica dei Campi, per esempio, gli stessi costituenti perdono la loro individualità per diventare semplice modo di apparire dello stato di campi che sono per sé degli oggetti olistici.

Frontespizio dell'edizione del 1623 de *Il Saggiatore* (www.astronomy2009.org)



Linguaggio matematico

Sempre nel *Saggiatore* Galileo, riprendendo una precedente espressione di Grossatesta, scrive: «La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto davanti agli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, a conoscere i caratteri, né quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi e altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola: senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto».

L'affermazione più significativa di questo secondo brano è che la Matematica costituisce il linguaggio stesso in cui la Fisica deve essere espressa. Questa circostanza, se vera per la Fisica dei tempi di Galileo, molto di più lo è per la Fisica attuale e l'averla posta in evidenza va considerata una grande scoperta. Le ragioni di questo ruolo sono certamente nella scelta di privilegiare gli aspetti quantitativi del mondo sensibile. Ma non meno importante è che la Matematica fornisce lo strumento logico con cui le ipotesi fondamentali di una teoria fisica possono essere formulate in modo inequivoco, le loro conseguenze essere elaborate e tradotte alla fine in predizioni precise e controllabili.

Ovviamente per Galileo il «linguaggio matematico» era innanzitutto quello della Geometria elementare. Questa era sufficiente per formulare i modelli cosmologici che erano discussi a quel tempo. È chiaro tuttavia che, come la comprensione del mondo della natura ha proceduto, hanno dovuto essere impiegati tipi di linguaggio matematico sempre nuovi e avanzati. Cerchiamo di renderci brevemente conto della loro natura e del loro ruolo insostituibile.

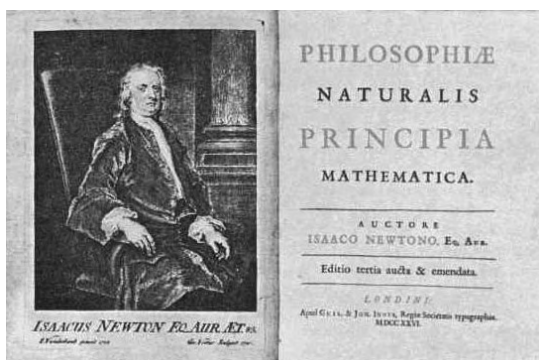
L'analisi infinitesimale

Pensiamo innanzitutto alla formulazione della Meccanica come data da Newton (Isaac Newton, 1643-1727) nei suoi *Principia*.

È chiaro che questa non sarebbe stata semplicemente possibile senza l'introduzione delle prime idee di Analisi Infinitesimale. Anche così, tuttavia, il lettore moderno che tenti di avvicinare l'opera originale di Newton resta interdetto di fronte alla farraginosità della trattazione che procede largamente per argomenti geometrici discorsivi, dove l'impiego delle nostre notazioni simboliche renderebbe il ragionamento molto più trasparente e diretto. Non si può non apprezzare i pregi della semplificazione ottenuta con l'uso estensivo di formule! Bisogna però aspettare il lavoro di Eulero, sessant'anni più tardi, perché la seconda legge della Dinamica sia scritta esplicitamente sotto la forma di un sistema di equazioni differenziali $m d^2 x_k = F_k dt^2$, che legano le derivate seconde delle coordinate di una particella alle componenti della forza che agisce su di essa, in uno spirito molto vicino all'attuale.



Galileo Galilei fa provare il suo cannocchiale al doge Leonardo Donati (Varese, villa Ponti affresco, 1858) [moro.imss.fi.it]



Frontespizio della terza edizione dei *Principia*, 1726

Non è poi difficile rendersi conto di quanto lo sviluppo di nuove idee in Fisica sia stato legato ai progressi nel calcolo infinitesimale. Oltre alla nozione di equazione differenziale, per esempio, un ruolo molto importante è stato svolto da quella di «differenziale esatto».

Tale concetto è stato essenziale per l'introduzione di quelli di forza conservativa in Meccanica, di energia interna o di entropia in Termodinamica. Senza di esso interi capitoli di Fisica non avrebbero potuto essere scritti.

Simboli matematici e realtà

Nella Fisica Classica la relazione tra simboli matematici e realtà empirica è comunque molto diretta. Il «punto materiale» idealizza un corpo le cui dimensioni siano trascurabili alla scala considerata; le sue coordinate corrispondono a tipi di osservazioni concettualmente molto semplici, come quelle eseguite con comuni strumenti ottici. I campi elettrici e magnetici possono essere in linea di principio posti immediatamente in relazione con gli effetti prodotti su corpi di prova in quiete o in movimento; la distribuzione delle temperature in un fluido fa riferimento idealmente alle indicazioni di un sistema di termometri.

Il grado di astrazione è invece molto maggiore nella Fisica Quantistica. In questo caso il linguaggio matematico non ha per sé alcun corrispettivo immediato nell'intuizione ordinaria. Il formalismo appropriato è quello degli spazi di Hilbert e delle algebre di operatori. Noi associamo allo stato di un sistema un vettore unitario e a un'osservabile un operatore autoaggiunto. Ma queste associazioni isolatamente prese non hanno alcun riferimento intuitivo e al di fuori dell'intero contesto a termini come stato e osservabile non si può dare alcun significato preciso. Il contatto con il mondo reale, con ciò che noi possiamo percepire o su cui possiamo agire, è dato da un insieme di regole matematiche astratte che acquistano senso solo nella loro unità. È solo con l'uso dell'intero complesso di queste regole che noi possiamo fare delle predizioni verificabili, «spiegare» determinati fenomeni, capire le loro connessioni con altri. Sono dovuti passare tre secoli dai tempi di Galileo perché i fisici potessero scoprire il linguaggio necessario per affrontare i fenomeni dell'estremamente piccolo o dell'estremamente grande, del mondo subatomico o dell'universo.

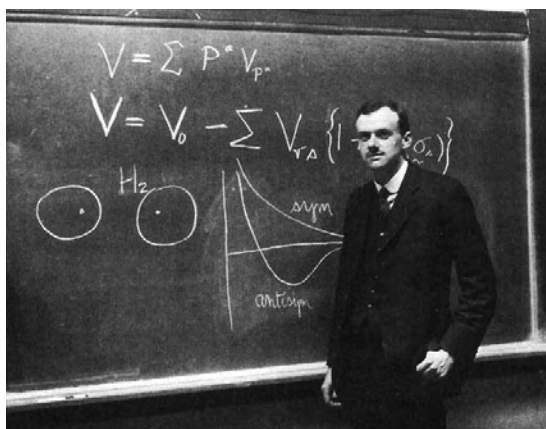
Ho parlato di «scoperta» del linguaggio matematico necessario per affrontare «quei fenomeni». Un altro fatto che dobbiamo comprendere è che non esiste alcun criterio di scelta a priori; noi dobbiamo usare la matematica che risulta utile, quella che ci permette di costruire teorie che hanno successo. Per formulare una qualsiasi teoria fisica, che riguardi una certa

classe di fenomeni, noi dobbiamo usare un linguaggio matematico appropriato e questo linguaggio va scoperto. Esso va poi riguardato in se stesso come una parte integrante e inscindibile della teoria.

Non sempre il fisico riesce ovviamente a trovare nella Matematica esistente il formalismo che gli è necessario per costruire una nuova teoria e allora egli stesso deve crearselo. Molte volte proprio in questo modo sono stati aperti dei capitoli completamente nuovi della Matematica. È stato questo il caso del concetto di derivata come introdotto da Newton, quello di serie di Fourier, di certi sviluppi della teoria degli operatori e della teoria delle distribuzioni.

In quest'ordine di idee è particolarmente interessante il modo in cui Paul A. M. Dirac ha organizzato il suo famoso libro *Quantum Mechanics* e molti dei suoi lavori scientifici.

Di norma egli presuppone solo una Matematica molto elementare e cerca di costruirsi il formalismo necessario assiomaticamente in stretto contatto con la teoria fisica. Perviene in tal modo a un'estensione della teoria degli spazi di Hilbert che include certe classi di vettori di norma infinita e alla sua famosa nozione di «funzione delta». La struttura matematica è così fatta emergere direttamente dalla Fisica. È noto che le idee introdotte in tal modo da Dirac sono state successivamente sviluppate da matematici di grande valore, come L. Schwartz o I. M. Gel'fand portando a un capitolo completamente nuovo e di grande interesse della Matematica, la Teoria delle Distribuzioni.



Paul Adrien Dirac (1902-1984)
[www.katharinen.ingolstadt.de]

Ipotesi, teoria ed esperimento

Nonostante l'atteggiamento polemico di Galileo verso gli aristotelici del suo tempo, l'ideale ultimo della Fisica resta quello di un sapere organizzato secondo i canoni aristotelici, con le sue definizioni, i suoi principi i suoi teoremi. Questo è ovvio per i *Principia* di Newton che ricalcano sotto molti aspetti la linea degli *Elementi* di Euclide, ma è già evidente in Galileo, nell'immaginario trattato, oggetto di discussione tra i soliti suoi tre personaggi, che egli riporta all'interno della sua opera più matura, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*. Ancora oggi le formulazioni cosiddette assiomatiche, delle teorie che hanno raggiunto un grado sufficiente di sviluppo e di elaborazione, tendono a strutturarsi come vere e proprie teorie matematiche.



Frontespizio di *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, 1638

Ciò che Galileo criticava della Fisica aristotelica era in realtà la sostanza dei principi su cui essa si basava e il modo aprioristico con cui essi pretendevano di essere fondati.

L'idea che noi oggi abbiamo di scienza sperimentale è invece quella di una scienza i cui postulati di base sono giustificati dal loro potere esplicativo e predittivo. Si suppone di partire da un certo numero di fatti dell'esperienza ordinaria o da un corpo di risultati già acquisiti tramite effettivi esperimenti e si tenta la formulazione di principi che possano rendere conto di tali fatti o risultati. Si cerca di dedurre dai principi ipotetici introdotti il maggior numero di conseguenze empiricamente verificabili e di concepire nuovi esperimenti che possano confermarle o smentirle (Popper parlerà di falsificabilità delle teorie).

Galileo individua i due elementi fondanti nelle già ricordate *sensate esperienze* e nelle *necessarie dimostrazioni*. La «nuova scienza» si svilupperà appunto da un rapporto dialettico continuo tra costruzione teorica ed esperimento.

La formulazione delle ipotesi

È importante sottolineare che alla formulazione dei principi il ricercatore non è mai condotto in maniera univoca dal risultato di esperimenti attraverso un puro processo di induzione, come avrebbe voluto Francesco Bacone (e in questo senso sono a nostro parere da ritenersi fondamentalmente errate tutte le esperienze didattiche ispirate all'induttivismo).

Nella formulazione delle ipotesi alla base di una teoria intervengono l'intuizione e la fantasia del ricercatore, il suo senso estetico, i suoi pregiudizi filosofici. Il modo in cui egli vi giunge è per se irrilevante. Ciò che importa è che le ipotesi siano in grado di dar ragione dei fatti per la cui interpretazione sono state create e che portino a previsioni che possano superare successivamente controlli rigorosi.

All'idea, apparentemente contraria all'esperienza ordinaria, che tutti i corpi, fatta astrazione dalla resistenza dell'aria, cadano con accelerazione costante e indipendente dalla loro stessa natura, Galileo fu guidato da vari elementi, tra questi un'ipotesi di massima semplicità e la considerazione di un esperimento ideale (sul confronto tra il comportamento di due oggetti quando essi cadano separatamente o saldati in un unico corpo). Contestualmente egli però elaborò varie conseguenze della sua ipotesi, tra cui quella della proporzionalità tra lo spazio percorso nella caduta e il quadrato del tempo impiegato. Combinando quest'ultimo risultato con una seconda ipotesi (che nel linguaggio attuale può essere identificata con il carattere vettoriale dell'accelerazione) fu capace di concepire i suoi esperimenti di verifica con i piani inclinati, che, pur nella loro relativa grossolanità, rivestono un grande valore concettuale.

Un discorso simile può essere fatto per le leggi che Newton pose alla base della sua meccanica e della sua teoria della gravitazione. Tali leggi furono scelte in modo da rendere conto di quelle sulla caduta dei gravi come formulate da Galileo; di quelle sulla conservazione del momento lineare nell'urto, come postulata dapprima in maniera imperfetta da Cartesio e poi da Wallis, Wen e Huygens; delle leggi di Keplero sul moto dei pianeti. Una loro prima conferma si ebbe nel successo della loro applicazione al moto della Luna attorno alla Terra e nell'interpretazione del moto dei corpi su scala terrestre (quando completate da opportune altre ipotesi sulla resistenza dell'aria). Una ulteriore e definitiva conferma si avrà, poi, con l'osservazione delle deviazioni del moto dei pianeti dalle leggi di Keplero e la loro interpretazione come perturbazioni prodotte dall'attrazione reciproca tra gli stessi pianeti.

Che non sia possibile indurre in maniera univoca in Fisica le leggi dai fenomeni deriva anche semplicemente dal fatto che ogni osservazione è affetta da errore e fa necessariamente riferimento a una data scala e a una determinata precisione. Sappiamo, per esempio, che le ordinarie leggi del moto vanno modificate, se le velocità dei corpi si avvicinano a quelle della luce. Sappiamo anche che, se si vogliono comprendere certi effetti di precessione nei pianeti più vicini al Sole o si vogliono affrontare fenomeni su scala cosmologica, è necessario utilizzare la teoria della gravitazione di Einstein piuttosto che quella di Newton.



Johannes Keplero (1571-1630)

La verifica dei principi

Ci si deve anche rendere conto che la verifica dei singoli principi che sono posti alla base di una certa teoria, isolatamente considerati, può essere del tutto priva di senso, come abbiamo visto nel caso della Meccanica Quantistica a proposito dell'uso del linguaggio matematico. È l'insieme dei principi e l'intero contesto che acquista un significato.

Anche quando concettualmente sensata, poi, la verifica diretta di una singola legge è spesso molto grossolana; al contrario le verifiche indirette possono essere estremamente accurate. È questa la situazione che si presenta nel caso dei vari esperimenti didattici per la verifica della proporzionalità tra accelerazione e forza, quando i loro risultati (tutti a un livello di notevole grossolanità) vengano messi a confronto con l'estrema precisione con cui si può calcolare la traiettoria di un proiettile di artiglieria o addirittura di un veicolo spaziale.

Allo stesso modo la precisione con cui possono venire controllate in modo diretto le leggi della dinamica relativistica (o più impropriamente la dipendenza dalla velocità della cosiddetta massa trasversale), attraverso lo studio della deflessione in campi elettrici e magnetici di un elettrone beta proveniente da una sostanza radioattiva, è appena dell'ordine dell'1%. Utilizzando, però le stesse leggi si riesce a mantenere per ore in

una macchina acceleratrice una particella che si muove a una velocità molto prossima a quella della luce sulla traiettoria prevista con tutta la precisione voluta.

Sperimentare con un'ipotesi

È anche importante sottolineare che non esistono dei dati o dei fatti sperimentali puri. Ogni esperimento, come già chiaro in Galileo, ma particolarmente accentuato da Popper, parte da certe ipotesi teoriche.



Alla presenza del Granduca, Galileo effettua l'esperimento della caduta dei gravi della torre di Pisa, tempera su muro, Palazzo Pitti (Firenze), 1816 [moro.imss.fi.it]

Nella semplice misura con metodi trigonometrici della distanza di un pianeta dal sole, è fatto esplicito uso della Geometria euclidea, dell'ipotesi della propagazione rettilinea della luce, delle leggi dell'ottica geometrica, utilizzate per la costruzione dei nostri strumenti.

Nello studio dell'evento complesso che si origina dalla collisione ad alta energia tra due particelle elementari, noi misuriamo il momento delle particelle cariche prodotte dal raggio di curvatura della loro traiettoria in un campo magnetico, ne misuriamo l'energia attraverso la ionizzazione prodotta nell'attraversare la materia, ricostruiamo le traiettorie e le masse delle particelle neutre, che non vediamo, utilizzando le leggi relativistiche di conservazione dell'energia e del momento. Non infrequentemente gli esperimenti si presentano inoltre come semplicemente rivolti alla discriminazione di teorie concorrenti che portano in determinate circostanze a previsioni differenti, alla discriminazione cioè tra due sole possibili risposte che a priori ci si attende.

(continua) ❖

INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE

- E. Agazzi (ed.), *Storia delle Scienze*, Città Nuova, Roma 1984.
 G. Reale, D. Antiseri, *Il Pensiero Occidentale dalle origini ad oggi*, La Scuola, Brescia 1983.
 A.N. Whitehead, *La Scienza e il mondo moderno*, Boringhieri, Torino 1979.
 P.M.M. Duhem, *Le System du Mond; Hystoire des Doctrines Cosmologiques de Platon to Copernic*, Herman et Cie 1954.
 L. White, *The Historical Roots of Our Ecologic Crises*, Science, vol. 155, p. 1203, 1967.
 L. Russo, *La rivoluzione dimenticata*, Feltrinelli, Milano 1999.
 A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*, Boringhieri, Torino 1965 (prima edizione).
 G. Galilei, *Opere*, UTET, Torino 1980.
 I. Newton, *Principi matematici della Filosofia Naturale*, UTET, Torino 1989.
 P.A.M. Dirac, *Quantum Mechanics*, IV ed., Oxford University press, London 1954.