

Alcuni articoli significativi

Riportiamo integralmente alcuni articoli riferiti a diverse discipline scientifiche. Si tratta di letture che, pur non riferendosi specificamente ai temi indicati dal Progetto SeT, possono fornire interpretazioni e interessanti spunti di lavoro pertinenti al Progetto.

Si ringraziano gli autori e gli enti proprietari dei diritti che ci hanno consentito la pubblicazione.

Paolo Mirone

Perché la Chimica è difficile? (#)

E' opinione comune che la chimica sia una materia difficile, ma sulla natura delle sue difficoltà le idee non sono molto chiare, anche se molti - esclusi naturalmente i chimici - si trovano d'accordo nell'affermare che la chimica - almeno per il modo in cui è insegnata - è una materia astratta e lontana dall'esperienza quotidiana.

Volendo iniziare un discorso sulle difficoltà della chimica, va detto innanzitutto che esse sono di due tipi: vi sono difficoltà intrinseche alla disciplina e difficoltà introdotte senza necessità dagli insegnanti o dagli autori dei libri di testo o da chi fa i programmi di insegnamento. Non mi soffermerò sulle difficoltà del secondo tipo, anche perché l'ho fatto in diverse occasioni nel passato; mi limito a citare, a titolo d'esempio, l'usanza ancora molto diffusa di spiegare la struttura elettronica dell'atomo ai ragazzi delle scuole medie superiori (e talvolta anche inferiori) ricorrendo al concetto di orbitale.

Penso che le difficoltà intrinseche della chimica si possano ricondurre a tre punti nodali: la chimica non è intuitiva, la chimica fa uso di due livelli di descrizione della realtà, le molecole non stanno ferme.

La chimica non è intuitiva

Il carattere non intuitivo della chimica la caratterizza nettamente nei confronti delle altre discipline. La fisica - per non parlare della biologia e delle scienze della terra - a livello iniziale fa ricorso a concetti come traiettoria, velocità, forza che, pur avendo bisogno di essere ulteriormente precisati, possono essere introdotti facendo appello all'intuizione e/o all'esperienza quotidiana. Viceversa la chimica - cioè la scienza che studia le proprietà delle sostanze e le loro trasformazioni in altre sostanze - ha alla sua base un concetto, quello appunto di sostanza chimica, che non è affatto intuitivo, né si presta ad essere spiegato in modo elementare ma corretto all'inizio di un corso introduttivo. Probabilmente è questa la ragione per cui la maggior parte dei libri di testo per le scuole secondarie (19 sui 25 più adottati secondo un'indagine di una decina d'anni fa [1]) o dà il concetto per scontato, o si limita a darne qualche esempio (spesso errato), oppure ne dà una "definizione" in termini atomico-molecolari che è in realtà una semplice descrizione, mancando di quel carattere operativo che permette di verificare sperimentalmente se un campione di materia consiste di un'unica sostanza.

Ma anche molte reazioni chimiche - cioè le trasformazioni di sostanze in altre sostanze cui si è accennato sopra - hanno un carattere elusivo, in quanto alcuni dei reagenti e/o dei prodotti sono gas incolori, quindi invisibili. Ciò vale in particolare per le combustioni, che sono le reazioni chimiche di più comune esperienza. Le ricerche in didattica della chimica stanno mettendo in evidenza le difficoltà insite nella spiegazione di tali reazioni ai ragazzi più giovani. In un recente convegno un ricercatore inglese presentò una comunicazione intitolata "Perché la combustione dovrebbe essere l'ultima cosa da insegnare ai ragazzi delle scuole" [2] (titolo cambiato all'ultimo momento in "Perché la combustione è una delle ultime cose ad essere capite dai ragazzi delle scuole", forse su consiglio di qualche autorevole personaggio che considerava un po' troppo estremista il titolo originale). In tale comunicazione egli giungeva alla conclusione che la spiegazione della combustione attinge a tutti gli aspetti che contribuiscono alla comprensione del concetto di sostanza, concetto il cui sviluppo nelle menti dei ragazzi richiede probabilmente qualche anno.

Ma non sono solo i ragazzi della scuola dell'obbligo ad avere problemi con le reazioni di combustione e più in generale con quelle di ossidazione. In un questionario d'ingresso sottoposto nel 1997 alle matricole di Chimica e di Chimica Industriale delle Università di Modena e di Torino veniva posto il seguente quesito: *Un chiodo esposto agli agenti atmo-*

sferici si è coperto completamente di uno strato aderente di ruggine. Se lo si pone sulla bilancia, si troverà che in seguito a ciò il suo peso: A) è aumentato; B) è rimasto costante; C) è diminuito. Su 137 studenti, quelli che hanno dato la risposta giusta (A) hanno superato di poco il 50%, mentre il 20% ha scelto la risposta B, il 18% la C e il 7% non ha risposto.

Se la chimica non è intuitiva, non ci si deve stupire che questa caratteristica si manifesti anche nei processi dell'industria chimica. A questo proposito Luigi Morandi, che intorno alla metà del secolo è stato uno dei massimi dirigenti della Montecatini, riporta nel suo libro *L'industria chimica: cos'è* la testimonianza di un economista il quale, lavorando come consulente di un'azienda chimica, aveva chiesto di visitarne uno stabilimento: "ho visto, guardato e talvolta anche toccato apparecchiature che mi hanno detto chiamarsi reattori, autoclavi, colonne di distillazione o di rettifica, eccetera, per lo più chiusi e collegati con tubi diversamente colorati; ho saputo che in quegli apparecchi avvengono operazioni con nomi strani, come nitrazioni, esterificazioni; vi ho visto entrare fluidi e solidi di colore incerto, scorrevoli o viscosi, e vi ho visto uscire solidi e fluidi su per giù uguali a quelli che vi erano entrati, pur avendo nomi molto diversi, come mi hanno detto i tecnici...". E l'economista continuava mettendo a confronto la "illeggibilità" dei processi dell'industria chimica con la "leggibilità" di quelli delle altre industrie: "se la fabbrica è siderurgica, capisco quanto mi basta: come la carica di un altoforno, fatta di minerali e di rottami di ferro, si trasforma con il calore in una colata liquida, che vedo, e quindi in lingotti di acciaio; in una fabbrica tessile capisco come le fibre in fiocchi, naturali o no, diventano filo e poi tessuto; in una fabbrica di automobili capisco la funzione dei torni e delle fresatrici, delle presse per le carrozzerie, e capisco come si svolge il lavoro a catena del montaggio. Così io, profano. Ma io, profano, nelle vostre fabbriche chimiche non capisco niente o quasi." [3]

I due livelli della chimica

Dai tempi di Dalton, cioè da due secoli, la chimica fa uso di due livelli di descrizione della materia: il livello *macroscopico*, o fenomenologico, delle proprietà e delle trasformazioni delle sostanze, e il livello *microscopico* (o più esattamente submicroscopico) degli atomi e delle molecole. I chimici si sono da tempo adattati a questa duplicità di livelli, sviluppando una *forma mentis* che consente loro di passare con naturalezza da un livello all'altro pur tenendoli ben distinti. Ma ciò non è affatto ovvio per gli studenti che si avvicinano per la prima volta alla chimica, specialmente se sono molto giovani.

I primi ricercatori che cominciarono a studiare i problemi inerenti alla didattica del modello particellare della materia trovarono che i ragazzi attribuivano alle particelle costituenti di una certa sostanza le stesse proprietà di questa: per esempio, secondo loro il rame è malleabile perché i suoi atomi sono malleabili, l'oro è giallo perché i suoi atomi sono gialli, il mercurio del termometro si espande all'aumentare della temperatura perché si espandono i suoi atomi e così via. Questo modo di pensare può sembrare molto ingenuo, ma corrisponde strettamente al modo in cui i primi

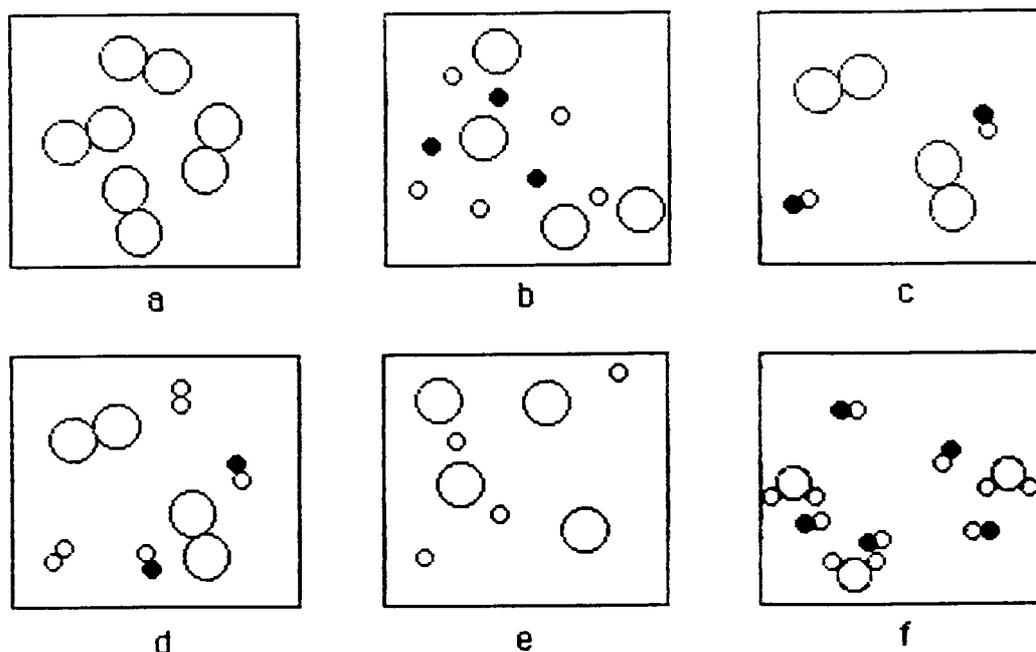


Fig.1 Ogni circoletto rappresenta un atomo; circoletti di diverso colore o diametro

atomisti cercavano di spiegare le proprietà dei corpi: per esempio, secondo Democrito l'aceto ha un sapore pungente perché i suoi atomi sono appuntiti [4]. E' naturale che i ragazzi pensino allo stesso modo di Democrito se nessuno li avverte che atomi e molecole non soltanto sono molto ma molto più piccoli dei corpi che vediamo e tocchiamo, ma si comportano anche in maniera molto differente, e di conseguenza possiedono solo poche delle proprietà dei corpi macroscopici: massa, forma e (approssimativamente) dimensioni, ma non colore, durezza eccetera.

Un'altra fonte di difficoltà è costituita dal rischio di confondere i due livelli, specialmente quando l'insegnamento è fortemente sbilanciato a favore del livello microscopico come avviene molto spesso nelle scuole italiane. Un esempio di tale confusione è fornito dallo slittamento del concetto di sostanza composta dal livello macroscopico a quello microscopico che abbiamo osservato in numerose matricole [5]. Nel già citato questionario dato agli studenti del primo anno di Chimica e di Chimica Industriale di Modena e Torino un quesito chiedeva di determinare, per ciascuno degli schemi di Fig. 1, quali rappresentavano sostanze e quali miscele di sostanze, e di indicare inoltre se si trattava di sostanze semplici o composte. E' risultato che secondo il 19% degli studenti lo schema *a* rappresenta una sostanza composta, e secondo il 39% gli schemi *c* e *d* rappresentano entrambi miscele di sostanze composte. Di fronte a questi risultati ci è venuto il sospetto che molti studenti non avessero compreso il significato delle figure; sospetto avvalorato dal fatto che la percentuale di risposte incomplete era stata uguale o superiore al 30% per tutti gli schemi ad eccezione dello schema *a*. Ma il nostro sospetto si è dissolto di fronte ai risultati di un secondo quesito, il cui testo era:

Quale delle seguenti affermazioni è corretta?

- A. Una sostanza si dice pura quando è formata da un unico elemento.*
- B. Una sostanza si dice pura quando è formata da atomi identici.*
- C. Una sostanza semplice è formata da atomi identici.*
- D. Una sostanza composta è formata da due o più elementi.*
- E. Nessuna delle affermazioni precedenti è corretta.*

Soltanto il 32% degli studenti ha scelto l'unico enunciato corretto, cioè D. Ma l'indicazione più illuminante è venuta dai pochi studenti che avevano cercato di giustificare le loro risposte errate: "O₂ è già un composto"; "D è falsa perché esistono composti mononucleari".

(O₂, S₈, P₄)”; “C non va bene, perché O₂ è un composto dell’ossigeno”; “D è sbagliata, perché S₈ è una sostanza composta, cioè una molecola formata da un solo elemento”.

Nelle menti di questi studenti, e presumibilmente anche di parecchi altri viste le risposte date al primo quesito, il concetto di composto aveva evidentemente subito uno slittamento dal livello macroscopico (sostanza formata da due o più elementi) al livello microscopico (molecola formata da due o più atomi, anche dello stesso elemento). Oppure non era neppure avvertita la distinzione fra i due livelli, come sembra indicare l’ultima risposta che mescola nella stessa frase termini propri del livello microscopico (molecola) e macroscopico (sostanza, elemento), e tratta i primi due come sinonimi. Questo esempio dimostra la necessità che nell’insegnamento della chimica i due livelli, con le rispettive terminologie, siano tenuti ben distinti fin dal principio. Distinti ma non separati, perché i due livelli sono strettamente connessi: è proprio il comportamento degli atomi e delle strutture che essi formano (molecole, reticoli cristallini e altri tipi di aggregati) che ci permette di spiegare le proprietà e le trasformazioni che osserviamo su scala macroscopica. Ma i concetti e le teorie che fanno da ponte tra i due livelli sono spesso all’origine di ostacoli all’apprendimento, anche nei casi più semplici. Per esempio, il concetto di mole (“l’interprete fra gli atomi e la bilancia” secondo l’efficace metafora di un libro di testo [6]) è stato oggetto negli ultimi quarant’anni di numerose ricerche didattiche [7], motivate proprio dalle difficoltà incontrate nel farlo capire ai ragazzi delle scuole secondarie.

Un bell’esempio delle difficoltà che, anche a livello universitario, può presentare il passaggio dal livello microscopico a quello macroscopico è offerto da un recente studio di due ricercatori francesi sull’apprendimento della stereochimica [8]. A 88 studenti dell’Università di Grenoble (69 del terzo anno per la licenza in scienze fisiche e 19 del secondo anno per il diploma biennale in scienze della materia a indirizzo chimico) è stato sottoposto un questionario che presentava tre proiezioni di Newman per ciascuno di quattro composti organici (Fig. 2), accompagnate da due quesiti:

a) Quali delle tre conformazioni del composto sono chirali? Motivare in caso di risposta affermativa.

b) Su scala macroscopica (cioè in presenza di un gran numero di molecole di conformazione variabile) il composto si comporta come una sostanza chirale? Motivare la risposta. [9]

Per citare i risultati più significativi dell’indagine, soltanto il 10% degli studenti ha dato una spiegazione coerente del comportamento non chirale (assenza di attività ottica) dei primi tre composti, e soltanto il 20% ha dato risposte giuste per tutte e tre le conformazioni del 2,3-diclorobutano RS, che si è rivelato il caso più ostico (per le singole conformazioni le risposte corrette sono state, andando da sinistra a destra della Fig. 2, rispettivamente 45, 58 e 70%); inoltre, fra gli errori più frequenti nel passaggio dalla scala microscopica alla macroscopica, gli autori segnalano l’attribuzione di proprietà macroscopiche, come l’assenza di attività ottica, a caratteristiche microscopiche come l’assenza di atomi di carbonio asimmetrici, la considerazione esclusiva della conformazione ritenuta più stabile, e il mancato riconoscimento della possibilità di rotazione intorno al legame semplice di una metà della molecola rispetto all’altra.

Le molecole non stanno ferme

Tutte le trasformazioni chimiche sono la conseguenza di urti fra molecole o atomi. Eppure ho sempre incontrato una grande difficoltà a far ragionare in termini di urti molecolari i miei studenti del corso di chimica generale, anche su problemi semplici come il meccanismo della trasformazione dell’energia chimica in energia termica [10], o il meccanismo delle reazioni monomolecolari nella sua versione più elementare.

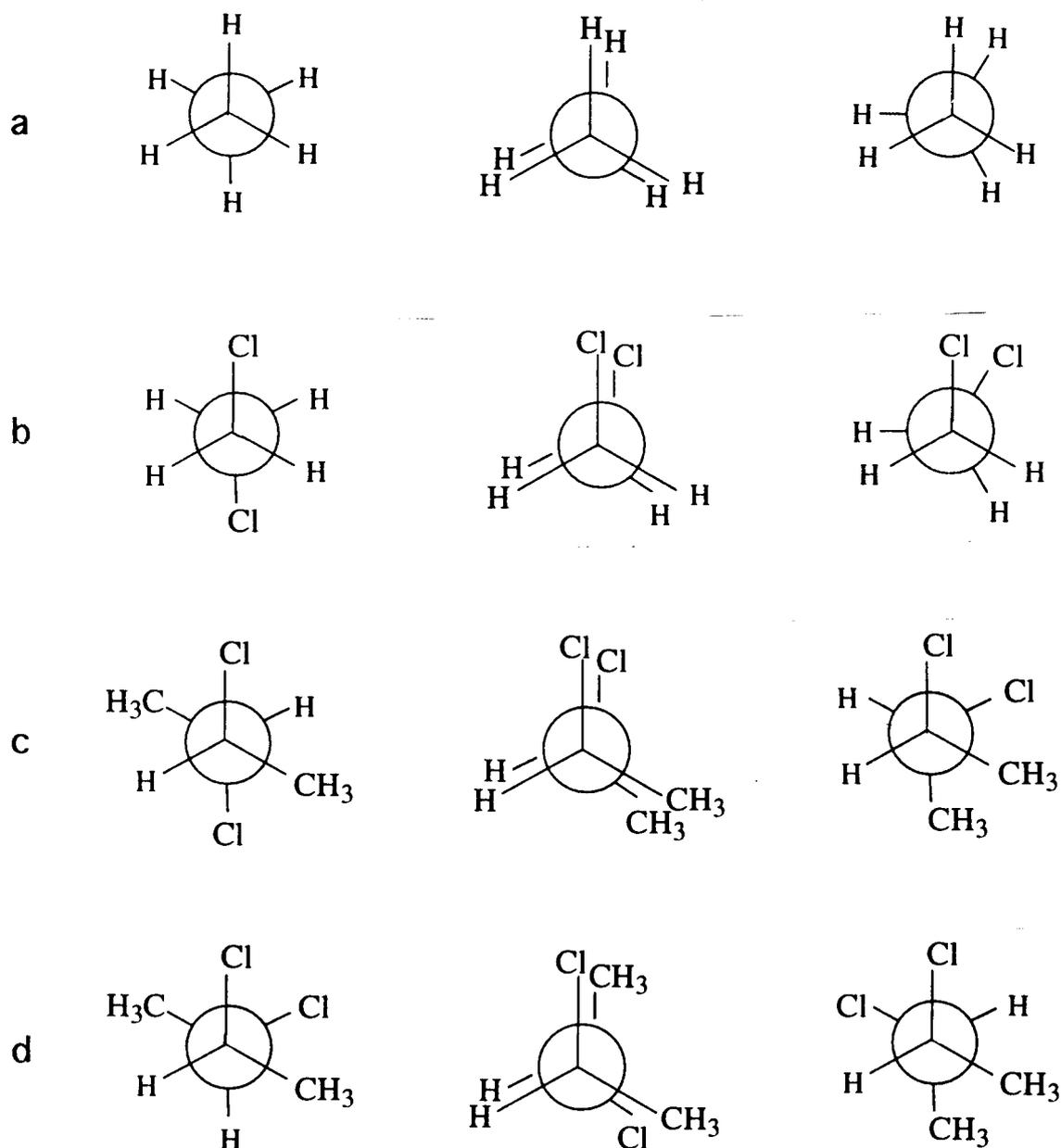


Fig. 2 a: Etano; b: 1,2-Dicloroetano; c: 2,3-Diclorobutano RS; d: 2,3-Diclorobutano RR

Da qualche tempo sto cercando di capire quali possono essere le cause di questa riluttanza. Fra le spiegazioni possibili, mi sembra che la più probabile possa esser fatta risalire ai libri di testo, i quali tendono generalmente a dare un'immagine piuttosto statica della chimica. In particolare l'esistenza dell'agitazione termica è spesso ignorata, fino al caso estremo di tre testi (uno dei quali divenuto nel giro di pochi anni il più diffuso nelle scuole secondarie) che nel 1986 davano, con parole quasi identiche, la seguente spiegazione della differenza fra solidi e liquidi: "Poiché nei solidi la forza di coesione ha valore massimo ed è maggiore della forza di gravità, essi hanno forma e volume propri. Nei liquidi la forza di coesione è minore della forza di gravità; questa costringe le molecole a scorrere le une sulle altre, per cui i liquidi hanno volume proprio ma assumono la forma del recipiente in cui sono messi" [11]. Nei testi universitari di chimica generale non si incontrano simili amenità, ma si parla molto poco di urti molecolari. Questi fanno la loro comparsa, di solito verso la fine del libro, solo nel capitolo dedicato alla cinetica di reazione.

Ma forse questa difficoltà a pensare in termini di collisioni molecolari non è soltanto degli studenti ma dei chimici in generale. E forse non è un caso che il primo a proporre un'ipotesi soddisfacente per il meccanismo delle reazioni monomolecolari in fase gassosa sia stato il fisico Lindemann. Ottant'anni fa il meccanismo di queste reazioni non era ancora chiaro: il fatto che la loro cinetica fosse del primo ordine sembrava incompatibile con un processo di attivazione per urto, che secondo le idee allora prevalenti avrebbe dovuto portare a una cinetica del secondo ordine. Perciò Perrin avanzò l'ipotesi che l'energia di attivazione fosse fornita alle molecole dalle radiazioni emesse dalle pareti del recipiente di reazione. Nel 1921 la Faraday Society organizzò un convegno su "La teoria radiativa dell'azione chimica", nel quale Perrin presentò un'ampia relazione sulla sua ipotesi. Nella discussione che seguì Lindemann fece un breve intervento, in cui mostrò che la cinetica del primo ordine era perfettamente compatibile con un processo di attivazione per urto seguito da uno di due processi tra loro in competizione, cioè la disattivazione, sempre per urto, o la trasformazione della molecola reagente nei prodotti [12]. Questo meccanismo faceva inoltre prevedere che riducendo la pressione la disattivazione per urto delle molecole attivate sarebbe divenuta sempre meno probabile rispetto alla reazione e di conseguenza la cinetica sarebbe passata gradualmente dal primo al secondo ordine, cosa che fu ben presto confermata dall'esperienza.

Conclusioni

Quelli di noi che hanno avuto il compito di far parte della commissione dell'esame di stato per l'abilitazione alla professione di chimico sono stati certamente colpiti dal fatto che molti candidati, anche se laureati da poche settimane, si trovano in difficoltà di fronte alle domande più semplici. Per quanto mi riguarda, ciò che mi ha maggiormente sorpreso non sono state tanto le lacune di memoria, quanto la manifesta incapacità di orientarsi e di ragionare su semplici questioni di chimica, cioè di collocare la domanda nel contesto di un insieme strutturato di conoscenze. Non ho difficoltà ad ammettere che quella di commissario agli esami di abilitazione alla professione di chimico è stata l'esperienza più deprimente della mia carriera di insegnante, in quanto mi ha portato spesso a domandarmi quale sia il senso e l'utilità del nostro lavoro.

D'altra parte, ciò che sto lamentando non è certamente una insufficienza dei soli laureati in chimica, ma è un fenomeno del tutto generale, riconosciuto da tempo dagli educatori più consapevoli [13]. Recentemente il rendimento dell'istruzione è stato paragonato a quello delle prime macchine a vapore, che era notoriamente bassissimo. Tuttavia, grazie agli sforzi della ricerca pura e applicata, nel corso degli ultimi due secoli il rendimento delle macchine termiche è costantemente cresciuto, avvicinandosi di molto al limite teorico imposto dalla seconda legge della termodinamica. E' ragionevole pensare che la ricerca sia in grado di produrre un analogo miglioramento nel rendimento dell'istruzione, in modo tale che questo si avvicini ai limiti posti dalla natura della mente umana. Questa è l'idea che anima gli sforzi di quanti si dedicano alla ricerca in didattica delle scienze.

Una parte sempre più importante di tale ricerca è rivolta oggi alla identificazione degli ostacoli che si oppongono a un apprendimento significativo delle singole discipline, ostacoli che sono spesso nascosti e quindi possono facilmente sfuggire anche a chi padroneggia perfettamente una disciplina e la insegna da anni. Per superare un ostacolo, e ancor più per aiutare altri a superarlo, è indispensabile conoscerlo, e questo può essere solo il risultato di una ricerca che si avvalga di tutte le risorse necessarie.

Bibliografia

- [1] L. Benedetti, L. Brancaleoni, R. Cervellati, P. Mirone, *Analisi di 25 testi di chimica ampiamente diffusi nelle scuole medie superiori*, Progetto strategico "Tecnologie e innovazioni didattiche" del C.N.R., Modena, 1989, p. 27.
- [2] P. Johnson, Why combustion should be the last thing to teach children in school, comunicazione alla 4th European Conference on Research in Chemical Education (ECRICE), York, 9-12 settembre 1997.
- [3] L. Morandi, *L'industria chimica: cos'è*, La Nuova Italia, Firenze, 1972, p. 22-23.
- [4] F. Enriques e G. de Santillana, *Compendio di storia del pensiero scientifico*, Zanichelli, Bologna, 1953, p. 81. Si noti che dopo 2000 anni l'idea di Democrito era ancora diffusa fra gli studiosi: nel 1675 il chimico francese Nicolas Lémery scriveva nel suo *Cours de Chymie*: "Non credo mi si possa contestare che l'acido non abbia delle punte...basta assaggiarlo per convincersene, perché provoca pizzicore sulla lingua" (cfr. J.I. Solov'ev, *L'evoluzione del pensiero chimico dal '600 ai giorni nostri*, EST, Milano, 1976, p. 27).
- [5] P. Mirone e E. Roletto, Students' misunderstandings about some basic chemical concepts, comunicazione alla 1st European Conference in Chemical Education, Budapest, 25-29 agosto 1998.
- [6] F. Bagatti, M. Braghiroli, E. Corradi, A. Desco, C. Ropa, *Il libro di chimica*, Zanichelli, Bologna, 1990, p. 90.
- [7] R. Cervellati, C. Amicucci, C. Cavalcoli, Bibliografia ragionata sulla didattica del concetto di mole (1961-1981), *CnS*, 1982, N. 3, 4, 5. In questo lavoro sono citate circa trenta pubblicazioni, comparse prevalentemente sul *Journal of Chemical Education*, su *Education in Chemistry* e su *School Science Review*. W. Dierks (*Eur. J. Sci. Educ.*, 3 (1981), 145) cita circa 80 articoli sullo stesso argomento, apparsi fra il 1952 e il 1980 su varie riviste. Un'altra cinquantina di articoli sono citati dai *Chemical Abstracts* fra il 1980 e il 1997 (G. Gorin, comunicazione privata).
- [8] R. Barlet e D. Plouin, La dualité microscopique-macroscopique: un obstacle sous-jacent aux difficultés en chimie dans l'enseignement universitaire, *Aster*, 27 (1997), 143.
- [9] Un oggetto chirale (per esempio la mano) ha la caratteristica di non essere ricopribile dalla sua immagine speculare. Per essere chirale una molecola non deve possedere né piani di simmetria, né un centro di inversione. Perché questa condizione sia soddisfatta non sempre è necessaria la presenza di un atomo di carbonio asimmetrico.
- [10] Un modo elementare per illustrare questo meccanismo consiste nel considerare il più semplice caso di reazione esotermica, cioè la formazione di una molecola biatomica a partire dai due atomi costituenti situati a grande distanza, tenendo conto della dipendenza dalla distanza internucleare dell'energia potenziale di interazione fra i due atomi. Tale dipendenza è descritta con buona approssimazione dalla curva di Morse. (cfr. P. Mirone, *CnS*, 1979, N. 3, p. 21).
- [11] P. Mirone, Errori ricorrenti nei libri di testo di chimica, in: *Il testo di chimica per la scuola secondaria superiore: contenuti e criteri di scelta*, Progetto strategico "Tecnologie e innovazioni didattiche" del C.N.R., Modena, 1986, p. 29.
- [12] K.J. Laidler, *The World of Physical Chemistry*, Oxford University Press, Oxford, 1993, p. 263-265. Il testo dell'intervento di Lindemann è riprodotto in: *Selected Readings in Chemical Kinetics* (a cura di M.H. Back and K.J. Laidler), Pergamon Press, Oxford, 1967, p. 93-96.
- [13] Nella prefazione alle sue lezioni di fisica (*La fisica di Feynman/The Feynman Lectures on Physics*, Inter European Editions, Amsterdam, 1975, p. VIII) Richard Feynman cita questa sentenza del Cardinale James Gibbons (1834-1921): "Il potere dell'istruzione è raramente di grande efficacia, a parte quelle felici situazioni in cui esso è quasi superfluo". Per essere stato il primo rettore della Catholic University of America di Washington (1889), ed anche per altre ragioni (si veda la voce che gli dedica l'*Encyclopaedia Britannica*).

ca), Gibbons è difficilmente sospettabile di scetticismo preconconcetto nei riguardi dell'istruzione.

Nota riferita al titolo

(#) Il presente articolo è basato sulla lezione tenuta dall'Autore il 13 novembre 1998 presso il Dipartimento di Chimica dell'Università di Modena e Reggio Emilia a conclusione della sua attività didattica di professore ordinario di Chimica fisica.

Vinicio Villani

Modellizzazioni matematiche: dal conto della spesa alle dimensioni dell'universo

(dal supplemento al Notiziario dell'UMI n°10 ottobre 1999. Atti del XX Convegno Nazionale UMI-CIM sull'insegnamento della matematica: "La matematica e le altre scienze: modelli, applicazioni, strumenti, didattici".)

PREMESSA

Nel maggio '98, in vista della relazione che avrei tenuto di lì a qualche mese a questo convegno, ho inviato agli organizzatori una breve traccia delle problematiche che contavo di affrontare. Nella mia lettera di trasmissione esprimevo poi la speranza che le "provocazioni" contenute nella traccia potessero fornire a qualche insegnante di scuola secondaria lo spunto per un lavoro da proporre ai suoi allievi, onde offrire una testimonianza diretta di ciò che è possibile fare con un po' di impegno e di creatività nell'ambito delle modellizzazioni matematiche, nonostante tutte le difficoltà e le carenze della struttura scolastica italiana. In effetti la "provocazione" è stata raccolta al di là delle mie aspettative da due classi del Liceo Scientifico di Perugia, la 5^AB e la 5^AH (insegnanti le Proff. C. Angiolini e F. Menconi). Così nel corso di questo convegno avremo modo di sentire dalla viva voce degli studenti una presentazione del lavoro che essi hanno fatto a partire da uno dei problemi da me proposti.

A questo punto mi sembra opportuno riportare integralmente la traccia che avevo redatto nel maggio '98. Farò seguire brevi cenni su come io stesso avrei affrontato i problemi proposti, usando solo strumenti matematici elementari, alla portata degli studenti di scuola secondaria. Va da sé che le mie "soluzioni" (ma sarebbe più appropriato dire: le mie "modellizzazioni") non sono le uniche possibili, né che pretendono di essere le migliori possibili.

1. LA TRACCIA

Fin dai primi anni della scuola elementare agli allievi vengono proposti problemi di matematizzazione del tipo seguente:

PROBLEMA 1. *La mamma compra 3 kg di mele. Sapendo che 1 kg di mele costa 1600 lire, quanto spende la mamma?*

Il procedimento risolutivo si basa su un ragionamento di proporzionalità diretta, per cui la risposta attesa è: 4800 lire.

Cosa cambierebbe nel problema precedente, se ne lasciassimo inalterata la struttura, modificando però l'ordine di grandezza della quantità di mele che la mamma intende comprare, per es. 30 kg?

Da un punto di vista strettamente matematico non cambierebbe nulla, ma ora lo schema della proporzionalità diretta sarebbe assai meno aderente alla situazione reale. Infatti probabilmente nessuna mamma acquisterebbe 30 kg di mele al dettaglio. Preferirebbe invece comprare da un grossista due cassette di mele da 15 kg ciascuna ad un prezzo inferiore. Ma a questo punto, per valutare la convenienza o meno dell'unico acquisto all'ingrosso rispetto ad una serie di acquisti al dettaglio, la modellizzazione matematica si complica. Oltre al nuovo prezzo della merce (mele più cassetta) entrano in gioco altri parametri. Per esempio occorre conoscere l'incidenza della tara (peso delle due cassette), le spese sostenute per recarsi in macchina al mercato rionale, nonché le eventuali spese

per il parcheggio. Se poi le mele non vengono consumate in un tempo ragionevolmente breve, vanno considerati almeno altri due fattori:

- la quantità di "scarto" dovuta al deterioramento di una parte delle mele;
- la variazione del prezzo delle mele al dettaglio, durante il periodo che va dal momento dell'acquisto all'ingrosso, fino al momento dell'esaurirsi della provvista.

Infine, se il problema si riferisce all'acquisto di una partita di 30.000 kg di mele da parte di un negoziante, non sarebbero più trascurabili ulteriori parametri, quali l'immobilizzo del capitale per l'acquisto dell'intera partita, le spese per l'immagazzinamento in celle frigorifere, ecc.

Ecco dunque che da un semplice problemino di scuola elementare si può passare a problemi via via più articolati e più realistici, ma pur sempre proponibili nella scuola dell'obbligo.

Naturalmente il valore formativo di un percorso didattico di questo tipo sta soprattutto in un coinvolgimento attivo degli allievi nelle varie fasi della matematizzazione e in particolare:

- nell'individuazione dei parametri ritenuti rilevanti;
- nell'elaborazione di una "formula" (o di un "diagramma di flusso" o di un "programma al calcolatore") che, a partire dai parametri presi in considerazione, consenta di risolvere il problema;
- nel reperimento di dati numerici (per quanto possibile realistici) onde rendere il problema più aderente alla realtà;
- in un riesame critico del procedimento seguito: per esempio andrebbe valutata la maggiore o minore incidenza di questo o quello dei parametri presi in considerazione, ai fini del risultato complessivo.

Le occasioni per proporre e analizzare situazioni suscettibili di modellizzazioni matematiche non mancano davvero, a tutti i livelli scolastici. Tanto per accennare ad un problema che si colloca in certo senso agli antipodi dei problemi di vita quotidiana, mi limito a citare il seguente:

PROBLEMA 2. *Stimare il numero complessivo degli atomi che formano l'intero universo (o meglio: la parte dell'universo da noi attualmente conosciuta).*

Spinto da curiosità personale, mi sono rivolto ad un collega fisico che mi ha fornito i dati sperimentali sui quali ho potuto poi basare i miei calcoli. Non anticipo il risultato perché conto di parlarne ad Orvieto, ma mi farebbe piacere poter confrontare in tale occasione la mia schematizzazione del problema con quelle proposte da parte di altri partecipanti al convegno, e soprattutto da parte di giovani studenti che vi si volessero cimentare.

Allo scopo di rendere per quanto possibile interattiva la mia relazione ad Orvieto, propongo qui di seguito altri due problemi, enunciati in termini intenzionalmente generici, che sono suscettibili di modellizzazioni matematiche elementari ma a mio avviso non prive di interesse. Spero vivamente -- lo ripeto -- che qualche studente o gruppo di studenti accolga la sfida, ci pensi su e mi mandi le sue riflessioni prima dell'inizio del convegno di Orvieto.

PROBLEMA 3. *Un giovane ventenne è abituato a fumare un pacchetto di sigarette al giorno. Decide improvvisamente di smettere di fumare e di mettere da parte giorno dopo giorno i soldi così risparmiati. A quanto ammonterà il suo capitale dopo 50 anni (ossia quando egli avrà raggiunto l'età di 70 anni)?*

Nota. Si tratta di individuare i principali parametri in gioco, attribuendo ad essi valori numerici ragionevoli, e di sviluppare i calcoli. Si tenga presente che "mettere da parte i soldi" non significa necessariamente "lasciarli sotto un mattone".

PROBLEMA 4. *E' ben noto che ci si abbronzia più velocemente per effetto dei raggi solari (ultravioletti) quando il sole è alto nel cielo, o quando ci si trova ad alta quota. E' possibile stimare l'intensità dei raggi solari (ultravioletti) a cui sarebbe esposto un astronauta che orbita al di fuori dell'atmosfera terrestre se non fosse opportunamente protetto dalla sua tuta, sulla base di opportune misure effettuate sulla terra, per esempio in una località balneare della Versilia?*

Nota. Quante e quali misure sarebbero necessarie? Si tenga presente che per affrontare il problema non occorre conoscere le unità di misura usate dai fisici per valutare l'intensità dei raggi solari. In questo problema si chiede solo di escogitare un metodo atto a confrontare l'intensità dei raggi solari misurabili al livello del mare con la loro intensità nello spazio, al di fuori dell'atmosfera terrestre.

La traccia si concludeva qui, con l'indicazione del mio recapito. Poiché nella traccia avevo già esemplificato alcune possibili modellizzazioni collegate al problema 1, passo a parlare ora dei problemi rimanenti.

2. MODELLIZZAZIONE DEL PROBLEMA 2 (NUMERO DI ATOMI DELL'UNIVERSO)

La stima che sto per proporre si basa su alcuni dati sperimentali che mi sono stati forniti dall'amico fisico di cui parlavo nella traccia, e che possono essere così sintetizzati:

- La materia che costituisce l'universo è formata in prevalenza da atomi di idrogeno.
- 1 grammo di idrogeno consta di circa $6 \cdot 10^{23}$ atomi (Numero di Avogadro)
- La massa del Sole è di circa $2 \cdot 10^{33}$ grammi
- In una galassia "normale" il numero delle stelle (mediamente assimilabili al Sole) è dell'ordine di grandezza 10^{11} di
- Si stima che nell'universo attualmente conosciuto il numero delle galassie sia dell'ordine di 10^{12} .

Quindi il numero complessivo di atomi presenti nell'intero universo (da noi conosciuto) può essere stimato in:

$$(6 \cdot 10^{23}) \cdot (2 \cdot 10^{33}) \cdot 10^{11} \cdot 10^{12}$$

Approssimando poi il prodotto $6 \cdot 2$ con 10, la stima diventa:

$$10^{1+23+33+11+12} = 10^{80}$$

Riferimento bibliografico: Per maggiori dettagli e commenti rinvio al mio articolo: *"Una lettura sempre attuale: L'Arenario di Archimede"*, pubblicato sulla rivista Archimede, 1996, pagg. 138-144.

Nota. Un metodo alternativo per calcolare il numero di atomi dell'universo poteva essere il seguente: Si parte sempre dalla stima del numero di atomi che costituiscono il Sole (vedi sopra); è noto che il Sole è l'unica stella nel raggio di 4 anni luce; si ipotizza che la distribuzione delle stelle nell'universo sia press'a poco uniforme, nel senso che "ammassi" stellari e zone quasi "vuote" si alternano ovunque nello spazio con una certa regolarità; in base a questa ipotesi, il numero complessivo delle stelle nell'universo sarà grosso modo pari al rapporto fra il volume di una sfera delle dimensioni dell'universo (raggio dell'ordine di grandezza di 12 miliardi di anni luce) e il volume della sfera con centro nel sole e raggio di 4 anni luce. Effettuando i calcoli, si giunge ad una stima un po' superiore per il numero degli atomi dell'universo: circa 10^{85} . La discordanza tra le due stime si spiega col fatto che

il Sole si trova in un ammasso stellare relativamente "denso" (la Via Lattea) mentre molte altre parti dell'universo sono ben più "vuote".

Commento. Ordini di grandezza del tipo 10^{80} o 10^{85} sfuggono alla nostra capacità di comprensione. In genere, se si chiede ad un interlocutore di stimare su base puramente intuitiva il numero degli atomi dell'universo, si ricevono risposte con ordini di grandezza enormemente sovrastimati, del tipo 10^{1000} , proprio per la difficoltà di attribuire un qualsiasi significato concreto a numeri tanto grandi.

3. MODELLIZZAZIONE DEL PROBLEMA 3 (RISPARMIO DEL FUMATORE PENTITO)

Prima di affrontare i calcoli, è opportuno premettere due precisazioni:

1. In ambito economico è praticamente impossibile fare previsioni attendibili su periodi così lunghi come quello ipotizzato nel problema. Quindi la soluzione (di tipo deterministico) che sto per proporre va considerata più come un'esercitazione matematica che non come una modellizzazione realistica del problema. L'approccio degli studenti del liceo scientifico di Perugia è stato più articolato, in quanto essi hanno preso in considerazione anche parametri aleatori.

2. Occorre distinguere fra crescita del capitale in termini puramente monetari (a quante lire ammonterà il capitale tra 50 anni) e crescita del capitale in termini di potere d'acquisto (che cosa si potrà comperare con quel capitale tra 50 anni). Comincerò col trattare il problema da un punto di vista puramente monetario. Le ipotesi semplificative (deterministiche) di partenza saranno:

- Risparmio annuo, al termine del primo anno: $K \approx 1800000$ lire
- Interesse del capitale investito: tasso fisso del 10% annuo.
- Inflazione stimata (supposta costante nel tempo): 3% annuo.

Si noti che in base all'ipotesi sull'inflazione, anche l'importo risparmiato annualmente aumenterà di anno in anno, sia pure solo in termini monetari, del 3%.

In definitiva, si ha a che fare con un problema di capitalizzazione composta, schematizzabile con una tabella del tipo:

Anno di riferimento	Risparmio di quell'anno	Importo risultante al 50-esimo anno
1°	K	$K \cdot 1,10^{49}$
2°	$K \cdot 1,03$	$K \cdot 1,03 \cdot 1,10^{48}$
...		
49°	$K \cdot 1,03^{48}$	$K \cdot 1,03^{48} \cdot 1,10$
50°	$K \cdot 1,03^{49}$	$K \cdot 1,03^{49}$

La somma dei 50 addendi dell'ultima colonna dà l'ammontare complessivo del capitale, comprensivo degli interessi maturati al termine dei 50 anni (ho evitato di usare il termine tecnico "montante", in quanto si tratta di una parola poco usata nel linguaggio corrente). Tale somma è esprimibile con la formula:

$$\begin{aligned}
& K \cdot \sum_{i=0}^{49} 1,03^i \cdot 1,10^{49-i} = \\
& = K \cdot 1,10^{49} \cdot \sum_{i=0}^{49} \left(\frac{1,03}{1,10} \right)^i = \\
& = K \cdot 1,10^{49} \cdot \frac{1 - \left(\frac{1,03}{1,10} \right)^{50}}{1 - \frac{1,03}{1,10}}.
\end{aligned}$$

Infine, sostituendo i valori numerici e arrotondando opportunamente i fattori, risulta che in termini monetari il capitale, comprensivo degli interessi, al termine del cinquantesimo anno ammonterà a circa:

$$1800000 \cdot 107,15 \approx 2890000000 \text{ (lire).}$$

Quanto al potere d'acquisto reale, tenuto conto dell'ipotesi che la moneta si deprezzi mediamente del 3% annuo, occorre però dividere l'importo ora calcolato per $1,03^{50}$, col che si ottiene un importo più ridotto: circa 660000000 di lire, intese "col potere d'acquisto di oggi".

Commento. Al di là della formulazione quasi scherzosa del problema e della difficoltà di fare previsioni a lungo termine, una schematizzazione analoga può essere utile per rendersi conto della maggiore o minore convenienza (o non convenienza) di stipulare in età giovanile un contratto con una società di assicurazioni, nella prospettiva di poter disporre a settant'anni di un determinato gruzzolo o di una pensione integrativa.

MODELLIZZAZIONE DEL PROBLEMA 4 (INTENSITA' DEI RAGGI SOLARI AL DI FUORI DELL'ATMOSFERA)

Per semplicità possiamo supporre l'atmosfera formata da un unico strato orizzontale omogeneo di spessore h . Per una schematizzazione più realistica occorrerebbe considerare piuttosto una serie di strati tra loro disomogenei, ma al fine di quanto segue ciò è irrilevante.

Alle nostre latitudini, il sole non si trova mai allo zenith, ma nelle ore centrali delle giornate estive la sua altezza sull'orizzonte raggiunge e supera i 60° . Supponiamo quindi di misurare -- standocene tranquillamente nella nostra località al livello del mare -- l'intensità dei raggi solari (di un determinato tipo di radiazione, per esempio: raggi ultravioletti) quando il sole si trova proprio a 60° di altezza. Allora il percorso dei raggi solari entro lo strato dell'atmosfera (di spessore h) fino a giungere al livello del mare, avrà lunghezza $h/\sin 60^\circ$.

Quanto più il sole è basso sull'orizzonte, tanto maggiore è la lunghezza del percorso dei raggi solari entro l'atmosfera per giungere al livello del mare. Un semplice calcolo di trigonometria consente di stabilire che quando l'altezza del sole è di circa $25^\circ 40'$ sull'orizzonte, il percorso dei raggi solari entro l'atmosfera ha lunghezza doppia rispetto al caso di 60° . Supponiamo ora di misurare l'intensità dei raggi solari (dello stesso tipo, e nelle stesse condizioni di limpidezza dell'atmosfera) nel momento in cui il sole si trova in questa nuova posizione (ossia a $25^\circ 40'$ sull'orizzonte).

Introduciamo le seguenti notazioni:

I_0 = intensità dei raggi solari al di fuori dell'atmosfera

I_1 = intensità dei raggi solari col sole a 60°

I_2 = intensità dei raggi solari col sole a $25^\circ 40'$.

Chiaramente I_0 è la nostra incognita, mentre I_1 e I_2 sono quantità note, nel senso che possono essere misurate senza spostarci dal nostro punto di osservazione. Introduciamo infine un'incognita ausiliaria m , ponendo:

$$(*) \quad I_1 = m I_0.$$

Potremmo chiamare m il "fattore di attenuazione dell'intensità dei raggi solari" per effetto dell'atmosfera, quando il sole è a 60° .

Immaginiamo ora di suddividere il percorso di lunghezza doppia (quello che i raggi solari devono compiere nell'atmosfera quando il sole è a $25^\circ 40'$) in due tratti uguali, ciascuno dei quali avrà dunque lunghezza pari a quella dell'intero percorso col sole a 60° . Nel primo tratto l'intensità I_0 si ridurrà pertanto secondo il fattore moltiplicativo m (passando da I_0 "in entrata" ad I_1 "in uscita"); nel secondo tratto l'intensità "in entrata" (che ora sarà I_1) si ridurrà ulteriormente secondo lo stesso fattore moltiplicativo m (passando da I_1 "in entrata" ad I_2 "in uscita". In formule, quando il sole è a $25^\circ 40'$:

$$(**) \quad I_2 = m I_1 = m^2 I_0.$$

Dividendo membro a membro (**) per (*) ne segue:

$$(***) \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{m^2 I_0}{m I_0} = m$$

Infine, risolvendo (**) rispetto ad I_0 e sostituendovi l'espressione di m data dalla (***) si ottiene:

$$I_0 = \frac{I_1}{m} = \frac{I_1^2}{I_2}$$

Commento. Non dispongo di rilevamenti sperimentali per le intensità I_1 e I_2 . Quindi non sono in grado di dedurre il valore numerico del fattore di attenuazione m . Una stima molto grossolana mi induce a congetturare che, per i raggi ultravioletti, I_2 potrebbe essere circa un decimo di I_1 . In tal caso l'intensità I_0 degli stessi raggi al di fuori dell'atmosfera risulterebbe circa dieci volte superiore all'intensità I_1 misurata al livello del mare quando il sole si trova ad un'altezza di 60° sull'orizzonte.

5. RIFLESSIONI FINALI

Pur essendo io un convinto fautore dell'inserimento di esempi di modellizzazioni nell'insegnamento-apprendimento della matematica a tutti i livelli scolastici, devo riconoscere che questo approccio può comportare delle difficoltà. Mi sembra quindi opportuno concludere questa relazione elencando, sia pure in forma schematica, quelli che a mio avviso sono i principali "pro" e "contro" di un percorso didattico basato su attività di modellizzazione.

"PRO". Le attività di modellizzazione matematica:

-- Interessano e coinvolgono gli allievi in misura notevolmente superiore alle trattazioni teoriche slegate dalle loro possibili applicazioni.

-- Promuovono una partecipazione attiva degli allievi nella ricerca di dati mancanti, nella costruzione di una pluralità di possibili modelli, nell'interpretazione dei risultati ottenuti.

-- Fanno toccare con mano l'utilità concettuale (prima ancora che strumentale) della matematica, intesa come un potente mezzo di indagine che ci consente di allargare il campo delle nostre conoscenze nel tempo e nello spazio.

-- Favoriscono i collegamenti interdisciplinari.

-- Stimolano allievi e docenti ad affrontare il "rischio" connotato con l'esame di situazioni di cui non c'è o non si conosce ancora "la risposta giusta".

"CONTRO". Le attività di modellizzazione matematica:

-- Richiedono molto tempo.

-- Rischiano di essere frammentarie.

-- Presuppongono una buona conoscenza del contesto entro il quale si situa il problema da modellizzare (e il farsi carico di ciò non può essere demandato per intero al docente di matematica).

-- Presuppongono una buona conoscenza preventiva di una pluralità di strumenti matematici, tra i quali scegliere quelli più adatti ad una matematizzazione del problema specifico in esame.

-- Possono far sorgere difficoltà all'atto di valutare i contributi dei singoli allievi ad un progetto collettivo.

Probabilmente, come spesso accade quando si confrontano tesi contrapposte, il giusto punto di equilibrio sta nel mezzo: le modellizzazioni matematiche rappresentano una componente importante, ma non l'unica, da tenere presente nell'insegnamento-apprendimento della nostra disciplina.

Gianni Zanarini - Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna

La scienza come impresa ermeneutica

Abstract

Il presente lavoro esamina il significato, per l'immagine della scienza, due rivoluzioni concettuali del nostro secolo: l'affermarsi del costruttivismo radicale e la crisi del riduzionismo legata allo studio dei sistemi complessi. La scienza appare sempre più chiaramente come un insieme di saperi irriducibili l'uno all'altro, ciascuno dei quali dipende dai punti di vista e dalle scale spazio-temporali adottate. [In questa prospettiva la conoscenza scientifica è la descrizione del mondo da un punto di vista interno ad una specifica disciplina, in corrispondenza di una particolare scelta del livello di aggregazione spazio-temporale.

La circolarità tra livelli diversi, che caratterizza la descrizione dei sistemi complessi, viene poi interpretata come circolo ermeneutico nell'incontro con il testo complesso della natura, rivisitando la celebre metafora galileiana alla luce dell'ermeneutica del novecento.

Le riflessioni conclusive riguardano le implicazioni dell'approccio proposto per una formazione scientifica che valorizzi sia la dimensione pratica, sia la dimensione poetica della scienza.

Introduzione

La riflessione epistemologica del '900 ha interessato e a volte appassionato i grandi scienziati del nostro tempo, da Albert Einstein a Erwin Schrödinger: ma questa constatazione non deve portarci fuori strada. I ricercatori di tutti i giorni, come gli uomini e le donne di tutti i giorni, seguitano a investire la scienza di aspettative grandiose: quella di guardare il mondo dall'alto di un vertice oggettivo e assoluto; quella di dominare il mondo stesso, riducendolo a concatenazioni lineari di cause ed effetti.

L'ansia di conoscere esprime, come sempre, il bisogno di dare senso al mondo e alla propria esperienza di vita. Ma l'appassionata ricerca di senso sulle vie della scienza, se effettuata in questa prospettiva assolutizzante e linearizzante, sbocca inevitabilmente nell'assenza di senso: il non senso del determinismo assoluto, ovvero il non senso dei casuali incontri tra atomi e molecole, o ancora il non senso di una esasperata manipolazione di formule e simboli, in una sorta di alienato gioco di carte.¹

A volte, quasi a difendersi da questi problemi, è un utilitarismo leggero e compiaciuto della propria precarietà a esprimersi nelle parole degli scienziati: la scienza viene allora presentata come pura collezione di modelli utili, che verranno cambiati quando non serviranno più. Ma è veramente inevitabile la scelta tra questi due estremi, ambedue così poveri di contenuto umano? Non è possibile trovare una strada che, elaborando il lutto dell'onnipotenza conoscitiva, riesca a valorizzare, insieme, l'aspetto pratico e quello poetico della scienza? che trasformi la formazione scientifica non in una pura e semplice scuola di riduzione al semplice ma, nello stesso tempo, insegni a riconoscere e valorizzare la complessità? che aiuti a riflettere anche su quello che la scienza ci dice degli uomini e delle donne che la fanno?

Il testo che segue ripercorrerà, innanzitutto, il significato e l'importanza, per l'immagine della scienza, di alcune rivoluzioni concettuali del nostro secolo. Si soffermerà poi sulle implicazioni formative dell'immagine della scienza che da tali rivoluzioni sembra emergere.²

Il costruttivismo radicale

Una delle più importanti rivoluzioni epistemologiche del nostro secolo riguarda l'oggettività della conoscenza scientifica. L'immagine della scienza prevalente nei secoli passati (ma molto diffusa ancora oggi, tra gli scienziati come e forse più che tra le persone comuni) era quella di una attività volta alla scoperta delle grandi verità della natura: verità che, dunque, sono indipendenti dal fatto che sia l'uomo a scoprirle. Al contrario, la riflessione filosofica del '900 ha sottolineato sempre più chiaramente (pur senza giungere a negare l'esistenza di una realtà in sé) che la scienza, come tutte le attività umane, è una costruzione, che dipende in modo essenziale dal fatto che sia l'uomo, appunto, a costruirla. Con questa riflessione, con il dubbio radicale da cui la riflessione stessa parte, si è giunti ad un punto di svolta irreversibile. Ormai un sospetto si è insinuato nella immagine semplice e rassicurante secondo cui la conoscenza non è che un riflesso del mondo così come esso è.

Questa problematicità del rapporto tra scienza e mondo viene da lontano. Senza sviluppare una analisi storica sistematica, limitiamoci a ricordare che essa è già adombrata nelle posizioni degli scienziati della seconda metà dell'ottocento (influenzati a loro volta, attraverso Maxwell, dall'empirismo inglese). Soprattutto in Ludwig Boltzmann è ben presente il concetto di «modello», inteso come costruzione ipotetica e perfezionabile. Egli addirittura, giunge ad ammettere la legittimità di modelli diversi e reciprocamente irriducibili per rendere conto di proprietà differenti dei sistemi fisici.³ Ma è Ernst Mach, con il suo caratteristico stile netto e deciso, a mettere definitivamente in crisi l'immagine della scienza come svelamento della struttura nascosta del mondo, sottolineando il carattere metaforico del concetto di «legge naturale».⁴

«Le leggi di natura [...] sono un prodotto del nostro bisogno psicologico di orientarci nella natura, di non assumere una posizione di estraneità e di disordine di fronte ai suoi processi [...]: sono limitazioni che prescriviamo, guidati dall'esperienza, alle nostre aspettative».⁵

Come è noto, il compito che Mach assegna allo scienziato è quello di determinare relazioni funzionali che esprimano regolarità osservative; queste relazioni funzionali sono formulate in linguaggio matematico, e descrivono l'oggettività delle relazioni tra fatti osservabili, anziché esprimere leggi nascoste del mondo. C'è comunque una buona dose di oggettività nell'immagine del mondo che traspare dalle affermazioni di Mach: i fatti sono lì, davanti a noi, incontestabili, evidenti. E soltanto la elaborazione di questi fatti che non è insita nel mondo, ma appartiene all'uomo.

Ma anche la posizione di Mach relativa all'oggettività dei fatti è stata profondamente rivista dall'epistemologia del novecento. Mentre, secondo Mach, i concetti della fisica costituiscono una fedele descrizione dei fatti dell'esperienza, la prospettiva «costruttivista»⁶ sottolinea che anche i presupposti teorici contribuiscono a determinare che cosa, in un certo contesto, si possa legittimamente considerare come «fatto». La parola «teoria» va intesa qui in senso lato: si può intendere, cioè, per teoria anche una immagine intuitiva e non verbale del mondo. In questo senso, si può dire allora, ad esempio, che un neonato non vede non perché gli organi della vista non siano sufficientemente sviluppati, ma piuttosto perché ancora non sa che cosa vedere. Non si può vedere se non si sa che cosa vedere, se non si ha una teoria sul mondo.⁷ Questo è vero anche in ambito scientifico. Pensiamo, ad esempio, all'immediatezza con cui Galileo interpretò la frastagliata linea di separazione tra la regione Oscura e quella illuminata della luna: immediatezza sconosciuta invece a Thomas Hariot, che non aveva avuto accesso, come Galileo, allo studio della pittura.⁸

Secondo una nota espressione, dunque, i fatti sono «carichi di teoria»⁹, perché sono descritti con un linguaggio che è inevitabilmente un precipitato storico di teorie sul mondo:

perché, addirittura, sono costruiti per mezzo del vocabolario di una particolare teoria scientifica.

L'attività scientifica consiste in gran parte nel selezionare i fatti, nell'eliminare quelli che non sono ritenuti pertinenti, addirittura, potremmo dire, nel "creare" nuovi fatti attraverso sofisticate domande poste alla natura. Queste operazioni hanno il loro luogo elettivo nel laboratorio, dove sono per l'appunto le teorie a indicare il modo di "sezionare" la realtà. E, così facendo, si costruiscono, per così dire, i fatti.

Una tale posizione epistemologica è ben più radicale di quella di Mach, che pure ha messo in discussione il concetto di legge naturale. La prospettiva, infatti, appare in una certa misura rovesciata: sono la rilevanza e il significato dei fatti a richiedere uno sguardo teorico preliminare per poter essere costruiti.

Queste affermazioni possono suscitare una certa giustificata perplessità. Possibile che i fatti si lascino sempre e comunque ingabbiare dalle nostre teorie, siano esse le teorie della scienza o quelle del senso comune? Possibile che si lascino sempre catturare dalle «reti che gettiamo per conoscere il mondo», come direbbe Karl Popper? Evidentemente no; però la realtà, inafferrabile e misteriosa, non confermerà mai una nostra teoria; al più potrà smentirla, resisterle, distruggerla.

Le teorie scientifiche, come afferma Edgar Morin,¹⁰ «instaurano un dialogo» col mondo, in sé inafferrabile, dei fenomeni. Ciò significa, come si è detto, che sono le teorie a costruire i fatti; significa però anche che questi ultimi possono fornire il loro sostegno, e soprattutto possono manifestare la propria irriducibilità alle teorie, all'interno del «dialogo» con esse: un dialogo assai più stretto di quanto possa apparire dall'immagine di Watzlawick, e soprattutto un dialogo circolare. Tornando all'esempio di prima: non si può vedere se non si sa che cosa vedere; ma anche: non si può sapere che cosa vedere se non si vede. Si tratta di una circolarità non viziosa, di una circolarità costruttiva. Si potrebbe addirittura dire che questa circolarità è una delle caratteristiche importanti del pensiero contemporaneo, e anche uno dei concetti centrali per comprendere l'attività scientifica.

In questa prospettiva, in questo dialogo circolare dello scienziato con la realtà, che cosa diventa l'oggettività della scienza, quell'oggettività che è generalmente ritenuta per l'appunto una caratteristica fonda mentale della scienza stessa? Essa si può considerare come il risultato mai definitivo di un processo ininterrotto di confronti, di conflitti e di convergenze tra scienziati che a loro volta sono impegnati nel dialogo con la realtà. In una relazione di circolarità del secondo ordine, è dunque il consenso degli scienziati a produrre quell'oggettività che, a sua volta, costituisce la base per il consenso scientifico.¹¹ Ancora una volta: non si tratta di un circolo vizioso, ma di un circolo costruttivo.

Irriducibilità e complessità

Ma un altro tarlo rode la scienza. Una immagine tradizionale del sapere scientifico lo concepisce come una struttura piramidale, nella quale ogni sapere disciplinare complesso si appoggia su altri saperi più elementari, più fondamentali. Così, ad esempio, la biologia si fonda sulla chimica, la quale a sua volta si fonda sulla fisica, scienza dei "mattoni elementari dell'universo. Questa concezione, però, è diventata problematica per ragioni diverse, che meritano di venire brevemente richiamate.

Innanzitutto, è sempre più difficile vedere la fisica come scienza dei componenti fondamentali della realtà dopo che la fisica delle particelle elementari ci ha proposto un mondo di complessità straordinaria, nel quale il concetto stesso di oggetto è sfuggente, evanescente.¹² Ciò ha fatto entrare in crisi l'immagine del mondo come una realtà complessa costruita a partire da elementi semplici: o meglio, ha mostrato la caratteristica metascientifica di tale assunto. Poi, il progetto riduzionista (ad esempio di riduzione della chimica alla

fisica) ha permesso delle incursioni limitate di una scienza nell'altra, tali da scalfire soltanto la specificità delle singole discipline.

Ma l'irriducibilità di principio dell'oggetto di una scienza ad un'altra dipende principalmente dal fatto che (in una prospettiva costruttivista) non è la realtà in sé a possedere caratteristiche fisiche, chimiche, biologiche: sono piuttosto i diversi approcci conoscitivi a "costruire", teoricamente e operativamente, tali caratteristiche.¹³

Pensiamo ad esempio ai concetti della biologia (funzione, specie, evoluzione, ecc.): essi sono irriducibili all'universo concettuale della chimica, non hanno alcun significato all'interno di essa, non sono ricavabili per aggregazione da componenti più elementari. E anche quando si fondano nuove scienze per studiare l'articolazione tra livelli diversi (pensiamo in particolare alla biochimica), si creano nuove articolazioni, per le quali si pone lo stesso problema di irriducibilità. Come afferma efficacemente Henri Atlan, ciò che caratterizza ciascun «livello» di descrizione della realtà è "l'organizzazione di quel livello descritta nel suo proprio linguaggio".¹⁴

Questi rapidi accenni ci suggeriscono una ipotesi radicale: la scienza è una costellazione di saperi irriducibili l'uno all'altro; ciascuno di essi dipende criticamente dai punti di vista e dalle scale spazio-temporali adottate. In questa prospettiva, la conoscenza scientifica non è il prodotto di un punto di vista assoluto, che trascende l'orizzonte umano, ma è piuttosto una raccolta di descrizioni del mondo sviluppate da punti di vista interni a singole discipline, nel quadro di certi linguaggi. In corrispondenza di particolari scelte del livello di aggregazione spazio-temporale: scelte che creano i propri oggetti, e l'universo delle loro interazioni. E, cambiando livello di descrizione, può capitare di incontrare una rivoluzione concettuale. Ad esempio, ad un certo livello è adeguato pensare in termini di oggetti elementari che interagiscono mantenendo la loro identità; ad un altro livello, invece, gli oggetti possono divenire sfuggenti e immateriali.

Leggiamo quello che poeticamente ci suggerisce Italo Calvino in Palomar.

«Il signor Palomar è 'In piedi sulla riva e guarda un'onda. [...] Non sono "le onde" che lui intende guardare, ma un'onda singola e basta. Il signor

Palomar vede spuntare un'onda in lontananza, crescere, avvicinarsi, cambiare di forma e di colore, avvolgersi su se stessa, rompersi, svanire, rifluire. A questo punto, potrebbe convincersi d'aver portato a termine l'operazione che s'era proposto e andarsene. Però isolare un'onda separandola dall'onda che immediatamente la segue e pare la sospinga e talora la raggiunge e travolge, è molto difficile; così come separarla dall'onda che la precede e che sembra trascinarsela dietro verso la riva, salvo poi magari voltarglisi contro come per fermarla».

E così via, in un testo assai lucido e godibile. Le domande implicite nella ricerca del signor Palomar sono anche le nostre: quali sono gli oggetti elementari di questo livello di descrizione del mondo? La sua organizzazione è analoga a quella del livello delle molecole? Una descrizione completamente esatta è possibile al livello delle onde senza descrivere contemporaneamente l'intero universo, come una grande, una immensa onda? Quali sono le domande che hanno senso a questo livello? E ancora: si tratta di domande che colgono l'essenza del mondo ovvero di domande pertinenti unicamente ad una particolare descrizione del mondo delimitata da una specifica scelta di variabili, concetti, scale spazio-temporali?

Ma osserviamo ora le onde del signor Palomar nella prospettiva di una riflessione sulla irriducibilità delle descrizioni a livelli diversi. Possiamo dire che le onde sono fatte di molecole d'acqua, ma il moto delle molecole d'acqua avviene per l'appunto seguendo la forma delle onde e le onde seguono e insieme costruiscono la struttura del mare ondulato. Ci troviamo dunque di fronte ad una sorta di circolarità tra livelli di descrizione che il nostro sforzo di semplificazione ambirebbe ridurre a una relazione unidirezionale. Questo problema è ancora più evidente nella schematizzazione degli organismi come strutture orga-

nizzate in sottosistemi e livelli diversi, che appaiono però intrecciati tra loro in maniera inestricabile, sfidando ogni semplificazione. Il fatto è, come suggerisce ancora una volta Henri Atlan, che le nostre semplificazioni sono ottenute attraverso una semplicistica assimilazione delle organizzazioni naturali a quelle dei sistemi artificiali, che concepiamo e costruiamo in maniera non ambigua.

L'attenzione che una parte della scienza contemporanea porta ai sistemi complessi suggerisce appunto l'opportunità di considerare questa circolarità tra livelli come essenziale. Ma, per quello che si è detto fin qui, si tratta di livelli di descrizione, e non di livelli di realtà, per cui si può concludere che le descrizioni del mondo che costruiamo per cercare di comprenderlo sono, nello stesso tempo, irriducibili e connesse tra loro da una circolarità costitutiva. Una circolarità che, sorprendentemente, assomiglia molto a quella che ci si presenta quando cerchiamo di comprendere un testo.

Pensiamo infatti a una frase qualunque, ossia a un enunciato linguistico. Che cosa viene prima, che cosa è più fondamentale, in termini di significato, nella frase stessa? Le singole parole ovvero l'enunciato nella sua globalità?

Cercando di rispondere a questa domanda, vediamo immediatamente che risulta problematico individuare una struttura gerarchica corrispondente ad una causalità lineare. Le parole, infatti, hanno un loro significato autonomo (o meglio, una molteplicità di significati possibili), ma acquistano un senso preciso, relativamente stabilizzato, soltanto nell'ambito della frase, in funzione del suo significato globale. Ma la frase, a sua volta, è costituita di parole: altrettanto legittimo, dunque, è dire che quella prende significato da queste, e non viceversa. Lo stesso vale per il rapporto tra la frase e l'eventuale testo complessivo di cui la frase fa parte, tra tale testo e il suo contesto. In una prospettiva semantica, dunque, non si può definire fondamentale né il livello corrispondente ai "mattoni" che costituiscono l'"edificio" complessivo, né (per restare nella metafora) il livello corrispondente al "progetto" dell'edificio stesso.

Incontriamo così, ancora una volta, la relazione circolare come processo creativo fondamentale nell'ambito stesso del pensiero, che inevitabilmente lo proietta sul mondo.

Un punto di vista finito

Tutti conoscono la meravigliosa metafora di Galileo:

"La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi (io dico l'universo) ... Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri sono triangoli cerchi e altre figure geometriche..."

Il grande scienziato assimila dunque il mondo a un testo, e la scienza a un'operazione di lettura. Credo che mai sia stata espressa in modo più efficace non tanto l'essenza del mondo quanto l'ansia di conoscere, di rintracciare significati e verità, di decifrare il mistero del mondo aprendo il libro e leggendo i suoi riposti segreti. Ma, come figli del '900, possiamo leggere questo libro senza tenere conto dell'ermeneutica, appunto, del '900?

La prospettiva ermeneutica di Galileo suppone che esista il significato "vero" del testo e che (ancora più importante!) tale significato sia attingibile da parte dell'uomo: lo scopo dell'interpretazione è allora quello di svelarlo definitivamente.

Ma per l'ermeneutica contemporanea il significato di un testo è quello che si costruisce nella relazione tra testo e lettore: una relazione nella quale anche i limiti, la finitezza, le caratteristiche del lettore sono elementi costitutivi dell'interpretazione. In questa prospettiva,¹⁵ il significato viene inventato, piuttosto che scoperto: «non c'è un punto archimedeo al di fuori del linguaggio e della tradizione per il quale le interpretazioni divengano oggetti o assolutamente autorevoli in qualche altro modo».¹⁶ La verità, dunque, è una costruzione che si colloca all'interno del «circolo ermeneutico» tra testo e lettore, che a sua volta si colloca all'interno di un'altra circolarità, quella tra lettori dello stesso testo.

L'immagine della scienza come ermeneutica del «testo della natura»¹⁷ sembra dunque suggerire di assumere un punto di vista che chiamerei "radicalmente finito", senza cercare di nuovo quell'oggettività della scienza che trova la sua legittimazione soltanto all'interno di una prospettiva profondamente diversa da quella dell'ermeneutica del '900.

Dunque, la circolarità ermeneutica ci appare come la circolarità più fondamentale tra tutte quelle precedentemente introdotte: quella che si declina anche come circolarità tra teorie e fatti, e che fa da sfondo alla circolarità tra letture parziali del mondo a livelli diversi.

La prospettiva ermeneutica si colloca all'interno di un punto di vista radicalmente finito, perché non sarà mai possibile affermare che una interpretazione del mondo è, definitivamente, l'interpretazione vera. Ma c'è un altro motivo per assumere un punto di vista radicalmente finito: e questa volta è un motivo che non ha a che fare con la metafora della lettura di un testo ma, direttamente, con l'osservazione e la conoscenza del mondo. Infatti, noi facciamo parte del mondo: attraverso di noi il mondo, per così dire, guarda se stesso, ma non può trascendersi; guarda se stesso dal di dentro, e non dal di sopra. La conoscenza, dunque, si struttura nella relazione col mondo, e non può prescindere dal soggetto umano che la costruisce. Nemmeno il soggetto, d'altronde, esiste al di fuori di questa relazione, nella quale egli si costruisce.

Questo punto è sviluppato molto bene, ancora una volta, da Calvino, attraverso il personaggio di Palomar.

«Ma come si fa a guardare qualcosa lasciando da parte l'io? Di chi sono gli occhi che guardano? Di solito si pensa che l'io sia uno che sta affacciato ai propri occhi al davanzale di una finestra e guarda il mondo che si distende in tutta la sua vastità lì davanti a lui. Dunque: c'è una finestra che s'affaccia sul mondo. Di là c'è il mondo; e di qua? Sempre il mondo: cos'altro volete che ci sia? Con un piccolo sforzo di concentrazione Palomar riesce a spostare il mondo di lì davanti e a sistemarlo affacciato al davanzale. Allora, fuori della finestra, cosa rimane? Il mondo anche lì, che per l'occasione s'è sdoppiato in mondo che guarda e mondo che è guardato. E lui, detto anche «io», cioè il signor Palomar? Non è anche lui un pezzo di mondo che sta guardando un altro pezzo di mondo? Oppure, dato che c'è mondo di qua e mondo di là della finestra, forse l'io non è altro che la finestra attraverso cui il mondo guarda il mondo. Per guardare se stesso il mondo ha bisogno degli occhi (e degli occhiali) del signor Palomar.»¹⁸

Ma, si potrebbe aggiungere, costruendo l'immagine del mondo il signor Palomar costruisce anche se stesso, e l'immagine del mondo che Palomar costruisce ci dice molto di Palomar stesso: delle sue ambizioni, delle sue paure, delle sue illusioni.

Riflessioni sulla nuova immagine della scienza

Che cosa diventa la scienza in questa prospettiva? Non c'è bisogno di fondare l'importanza della scienza stessa sull'ipotesi della conoscibilità, da parte dell'uomo, del mondo come esso è: è sufficiente e adeguato assumere, come suo principale motore e insieme come sua giustificazione, il desiderio di ridurre le sofferenze umane.¹⁹ In questa prospettiva, la ricerca appare in una luce forse più modesta e "pratica" rispetto alle visioni epiche della modernità: essa rinuncia infatti alla conoscenza della realtà "in sé", e insieme con essa alla soluzione definitiva dei grandi problemi filosofici: ma incontra più da vicino l'uomo, la sua sofferenza, il suo bisogno di significato: il bisogno di un'altra verità rispetto ad una fredda e lontana verità del mondo. Si tratterà della verità umana di sofferenza e di speranza che spinge al dialogo ermeneutico col mondo.

Ma accanto alla funzione "pratica", è importante valorizzare la funzione "poetica" della scienza: la sua funzione, cioè di creazione e contemplazione di bellezza. E' una esperienza frequente e intensa quella di restare stupiti e affascinati dalla bellezza, non soltanto di

un fenomeno naturale, ma anche di una teoria, di un risultato, di un modello:²⁰ fino al punto che grandi fisici come Paul Dirac hanno potuto proporre il criterio estetico come guida per la scelta di ipotesi scientifiche. E la contemplazione della bellezza è anch'essa una forma di conoscenza, che per troppo tempo è stata separata e addirittura contrapposta all'esperienza della conoscenza scientifica.

Uno dei rischi maggiori della scienza, accanto a quello di una eccessiva semplificazione, è quello di mortificare l'esperienza della bellezza e del mistero del mondo attraverso uno sforzo esasperato di spiegazione riduzionistica. Queste riflessioni epistemologiche di fine millennio ci aiutano, forse in modo inatteso, anche a mantenere vivo il fascino e l'enigma della bellezza.

Nella prospettiva della formazione, si tratta dunque di andare verso un insegnamento della scienza più aperto alla complessità del mondo e del nostro rapporto con esso,²¹ un rapporto che è nello stesso tempo di semplificazione modellistica e di incanto magico. E dal complesso, dall'intricato, dall'incomprensibile divenuto inavvertito che è opportuno partire, per proporre la scienza come sforzo dall'umanità per spiegare il mondo attraverso modelli necessariamente limitati e parziali.

C'è un aspetto paradossale della formazione scientifica, che costituisce nello stesso tempo uno degli elementi del suo fascino: essa è infatti una scuola di semplificazione per capire il mondo con l'aiuto della costruzione di mondi artificiali ma è anche (o almeno può essere), nello stesso tempo, scuola di complessità, nell'incontro con il mondo. Per questo, è necessario non dimenticare mai che i modelli sono metafore, «reti gettate sul mondo» per dargli significato; e, dunque, va sempre sottolineata, insieme con l'efficacia e il fascino dei modelli semplificanti, la complessità irriducibile del mondo.

Note

¹ Il riferimento è qui, ovviamente, a E. Husserl, "La crise de l'humanité européenne et la philosophie", *Revue de métaphysique et de morale* (1950), p. 225 e alle illuminanti riflessioni di P. Bertolini su questo stesso testo, nel suo *L'esistere* pedagogico. La Nuova Italia, Firenze, 1994, p. 21.

² Se anche non verrà citato esplicitamente, è chiaro che sullo sfondo di questa analisi è ben presente lo Husserl della *Crisi delle scienze europee*.

³ G. Zanarini, *Ludwig Boltzmann: una passione scientifica*, Cuen, Napoli, 1996.

⁴ G. Zanarini, "Legge e caso alle origini della fisica contemporanea", *La fisica nella Scuola*, XXVII (1994), p. 155-160.

⁵ E. Mach, *Erkenntnis und Irrtum: Skizzen Zur Psychologie der Forschung*, Leipzig, 1926 (trad. it. *Conoscenza ed Errore.- Abbozzi per una psicologia della ricerca*, Einaudi, Torino, 1982, p. 443).

⁶ Si veda a questo proposito E. Von Glasersfeld, "Introduzione al costruttivismo radicale", in R. Watzlawick (a cura di), *Die erfundene Wirklichkeit*, Piper München, 1981 (trad. it. *La realtà inventata*, Feltrinelli, Milano 1988).

⁷ A. Munari, *Il sapere ritrovato*, Guerini e Associati, Milano, 1993.

⁸ L'episodio è ricordato in G. Holton, "L'immaginazione nella scienza in L. Preti (a cura di), *Immagini e metafore nella scienza*, Laterza Bari, 1992.

⁹ N.R. Hanson, *Patterns of Discovery, in Inquiry into the Conceptual Foundations of Science*, Cambridge University Press. Cambridge, 1958 (trad. it. *I modelli della scoperta scientifica*, Feltrinelli, Milano 1978).

¹⁰ E. Morin, *Science avec conscience* Fayard, Paris, 1990.

¹¹ E. Morin, *Science avec conscience cit.*

¹² Si veda ad esempio E. Morin, *La connaissance de la connaissance* Seuil, Paris, 1987 (trad. it. *La conoscenza della conoscenza*, Feltrinelli, Milano, 1989).

¹³ In una prospettiva formativa, si veda a questo proposito R. Driver, "The Construction of Scientific Knowledge in School Classroom", in R. Uffiar (a cura di), *Doing Science: Images of Science in Science Education*, The Falmer Press, London, 1989.

¹⁴ H. Atlan, *A tort et à raison. Intercritique de la science et du mythe* Seuil, Paris. 1987 (trad. it. *A torto e a ragione. Intercritica tra scienza e mito*, Hopefulmonster, Firenze, 1989).

¹⁵ Per questi sviluppi dell'ermeneutica, è fondamentale il contributo di H.G. Gadamer. Si veda in particolare *Wahrheit und Methode*, Mohr, Tubingen, 1960 (trad. it. *Verità e metodo*, Bompiani, Milano, 1983).

¹⁶ M.A. Arbib, M.B. Hesse, *The Construction of Reality*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986 (trad. it. *La costruzione della realtà*, Il Mulino, Bologna, 1992).

¹⁷ Per un ulteriore approfondimento di questa immagine della scienza, con riferimento anche all'evoluzione dell'ermeneutica, si veda M.A. Arbib, M.B. Hesse, *The Construction...* cit. Si veda anche A. Rebaglia, *Logos, interpretazione e microfisica*, Franco Angeli, Milano, 1991.

¹⁸ I. Calvino, Palomar, Einaudi, Torino, 1983, p. 116.

¹⁹ G. Zucchini, "Per l'epistemologia", *Rivista di Psicoanalisi*, 24 (1978), 199; "Ragione psicoanalitica tra logopatìa e patologia", *Rivista di Psicoanalisi*, 29 (1983), 81.

²⁰ G.O. Longo, "Matematica e arte: l'unità indicibile", *La Rivista dei Libri* (1994).

²¹ Interessanti riflessioni sulla formazione biologica come formazione alla complessità, che ben si possono estendere alle altre scienze, sono contenute in M. Arcà, "La biologia come approccio alla complessità", in A.V., *Il senso di fare scienze*, Bollati Boringhieri, Torino 1995, pp. 467-499.