

La spiegazione scientifica: Aspetti storico-epistemologici e didattica. L'esempio della Chimica

Aldo Stella • Dipartimento di Scienze Umane e Sociali, Università per Stranieri di Perugia, aldo.stella@unistrapg.it
Giovanni Villani • Istituto di Chimica dei Composti Organometallici (ICCOM – UOS Pisa) del CNR, giovanni.villani@cnr.it

The scientific explanation: historical-epistemological aspects and didactic implications. The example of Chemistry

In questo lavoro abbiamo analizzato i principali aspetti storico-epistemologici della spiegazione scientifica in generale, e della Chimica in particolare, e la loro relazione con la didattica. Abbiamo analizzato le caratteristiche generali della spiegazione scientifica, concentrandoci sul modello nomologico-deduttivo, che può venire considerato il modello standard. Abbiamo evidenziato che non è possibile sostenere che di tale modello si dà un'unica forma, in linea con un riduzionismo metodologico che potremmo definire "radicale". La concezione *sistemica* ci ha consentito di cogliere lo specifico oggetto di studio nella molteplicità delle relazioni che lo strutturano e di inserire la singola teoria scientifica nel contesto socio/economico che l'ha vista nascere. L'applicazione, poi, dell'ottica sistemica alla didattica delle scienze evidenzia la necessità di un profondo cambiamento sia dell'insegnamento scolastico sia di quello universitario.

Parole chiave: spiegazione scientifica, relazione causale, modello nomologico-deduttivo, chimica, sistema

In this paper we have analyzed the general characteristics of the scientific explanation, and of the chemical explanation in particular, and its relation with the science education. Starting with the deductive-nomological model, which can be considered the standard model, we have shown that you cannot claim that this model of explanation can be given in a unique form, in line with the methodological reductionism that could be called "radical". The *systemic view* has allowed us to capture the specific object of study in the multiplicity of relations that it structures and to insert each specific scientific theory in the socioeconomic context of its birth. The application, then, of the systemic view to the science education underlines the need of a deep change of both the scholastic and university education.

Keywords: scientific explanation, causal relationship, nomologic-deductive model, chemistry, system

151

Strategie e metodologie didattiche nell'insegnamento delle discipline

La spiegazione scientifica: Aspetti storico-epistemologici e didattica. L'esempio della Chimica

1. Introduzione

Il processo della spiegazione costituisce una delle caratteristiche più significative della conoscenza scientifica del mondo. Esso, infatti, rappresenta una novità nella storia della cultura: la sua struttura intrinsecamente logica, la sua attendibilità e la sua capacità predittiva risultano evidenti e, per tale ragione, esso viene considerato un autentico modello da seguire in ogni altro ambito in cui si dispiega il conoscere.

Non sono mancate, da parte di filosofi ed epistemologi, analisi del tipo di spiegazione offerta dalla scienza, ma ogni studioso, secondo la sua impostazione generale, ne ha evidenziato alcuni aspetti. Esistono libri *ad hoc* su questo tema ed è senz'altro estraneo allo scopo del presente scritto affrontarlo in tutte le sue sfaccettature. In questo lavoro, l'obiettivo è quello di inscrivere la spiegazione scientifica all'interno di un'ottica sistemica, nella quale il singolo oggetto da studiare viene messo in relazione sia con il suo "mondo interno" sia con quello "esterno", con il quale è sempre inestricabilmente connesso. Ogni separazione/isolamento rappresenta, pertanto, una "astrazione" nonché una "semplificazione" di un mondo complesso. In quest'ottica, la spiegazione scientifica diviene, quindi, l'individuazione modellistica dell'ente e lo studio della sua variabilità. In ambedue questi concetti, fondamentale è l'interazione (relazione) che lega l'oggetto di studio tanto al soggetto conoscente quanto agli altri oggetti e all'ambiente in cui sono inseriti.

Il cuore della nostra argomentazione può così venire riassunto: fino a qualche decennio fa la posizione predominante, a livello epistemologico, era quella che *riduceva* il processo della spiegazione scientifica a un modello unico e assimilabile a quello che si applicava in fisica. Tale modello viene definito "nomologico-deduttivo" o "a legge di copertura". Tale posizione si basa sull'idea che sarebbe proprio questo tipo di spiegazione a rendere scientifica una branca del conoscere. Ebbene, noi cercheremo di evidenziare che attualmente questa posizione è minoritaria, poiché un numero sempre crescente di ricercatori riconosce la necessità di ammettere una *pluralità* di declinazioni del medesimo modello. Precisiamo che, per condurre la ricerca, abbiamo considerato prioritaria l'esigenza di valutare la consistenza teoretica delle argomentazioni nonché la loro coerenza formale. Alla luce di questa impostazione metodologica, rileviamo che la pluralità suddetta prevede, appunto, una base comune, di cui si materia il processo della spiegazione. Non di meno, questa base comune si coniuga differentemente nelle varie discipline scientifiche. Ci misureremo, insomma, con il tema della *specificità delle spiegazioni scientifiche*, e cioè con la necessità di individuare come la spiegazione si vincoli all'ambito disciplinare in cui si colloca, così che il *riduzionismo metodologico* risulta un approdo inaccettabile.

Per argomentare a favore della nostra ipotesi epistemologica, concentreremo l'analisi su di un aspetto particolare della spiegazione scientifica: il tipo di spiegazione che si ottiene utilizzando il piano molecolare. Come si vedrà meglio in



seguito, ciò equivale a parlare del tipo di spiegazione che fornisce la chimica. In questo lavoro, quindi, si porrà l'accento sulla spiegazione di tipo chimico e la si comparerà sia con la spiegazione scientifica che poggia sul concetto di "legge di natura", spiegazione che mostreremo essere di tipo prevalentemente fisico, sia con quella di tipo biologico, con alcune considerazioni sull'applicabilità della spiegazione di tipo chimico alle scienze sociali e umane.

Infine, si analizzerà come questa impostazione disciplinare della spiegazione scientifica è implicita nella didattica scolastica e universitaria e va esplicitata in un'ottica di formazione scientifica che, travalicando la semplice informazione, mira a formare la cultura scientifica sia degli "specialisti", ma ancor di più del cittadino comune. La società odierna è stata definita come "società dell'informazione" e un ruolo essenziale in essa lo svolge l'informazione scientifica, ma un'informazione "responsabile" prevede una base generale (oltre che tecnica) su cui poggiare. Sono proprio gli aspetti generali, cioè culturali delle discipline scientifiche, quelli che creano la base su cui far poggiare saldamente i "fatti" specifici. Compito della scuola è quello di costruire per le varie discipline scientifiche questa base e di confrontarla in momenti interdisciplinari.

2. Il concetto di spiegazione e il modello nomologico-deduttivo

Gioverà ricordare, per introdurre l'indagine, che "spiegare" significa compiere un procedimento volto a chiarire ciò che inizialmente non è chiaro ed è per questa ragione che coincide con lo "esplicare", che propriamente nasconde la metafora dello "spianare, distendere" o "rendere esplicito". La medesima metafora la si ritrova, appunto, anche nell'etimo dell'espressione "spiegazione" che è dal latino *ex-plicare*, e indica il processo volto a mettere in chiaro ciò che inizialmente è "fra le pieghe": *plicare* significa, infatti, "piegare" e "spiegare" comporta il procedimento del portare alla luce, il far uscire dalle pieghe.

In generale, si può affermare che la spiegazione, cioè il processo di rischiaramento, può assumere vari significati, tutti riconducibili, però, allo "instaurare una relazione" tra l'*explanans* (*explicans*) e l'*explanandum* (*explicandum*). Nei confronti di un termine, la spiegazione consiste nel determinare il significato del termine; nei confronti di un enunciato analitico la spiegazione consiste nel formularlo in una forma più chiara o secondo un linguaggio più univoco; nei confronti di uno *status* esistenziale, per esempio di conflitto, consiste nell'evidenziare le cause che lo producono; nei confronti di un oggetto, inteso nella sua forma più generica e generale, consiste nel fornire il *perché* del suo essere. In quest'ultimo caso, che può venire inteso come la struttura stessa della spiegazione come tale, la *relazione*¹ si pone tra l'evento e la sua ragione o causa. La causa, del resto, può venire intesa sia in senso ideale, ossia come ragione, sia in senso fattuale, ossia come un evento che produce un altro evento. Più rigorosamente, essa esprime un movimento tra termini: dall'uno all'altro. Non a caso, "relazione" è da *re-fero*, che significa "riporto". Nella relazione ciascun termine rinvia all'altro, riporta all'altro e, riportando all'altro, procede verso di esso. Per questa ragione la relazione non indica tanto uno *status*, quanto piuttosto una *dynamis*, un'attività o, se si preferisce, uno *status* che si caratterizza per la sua intrinseca dinamicità.

1 Si rinvia, per un approfondimento di questo tema, a Stella (1995, 2014).



Il conoscere si fonda, dunque, sulla *struttura intrinsecamente relazionale* dell'oggetto. Tale struttura implica un molteplice ordine di relazioni. Innanzi tutto implica quella relazione che fa di ogni ente un "oggetto" di studio, e cioè la *relazione a un soggetto conoscente*. Senza la relazione al soggetto, insomma, l'ente non si configurerebbe come oggetto e ciò è attestato anche dall'etimo dell'espressione "oggetto", che indica lo *ob-iectum*, ossia "ciò che è gettato davanti". Ciò significa che la relazione al soggetto è costitutiva dell'oggetto.

A questa relazione, che potremmo definire "esterna" e che vincola l'oggetto al soggetto, va aggiunta un'altra relazione, anche essa "esterna", che collega lo specifico oggetto in esame a tutti gli altri oggetti, cioè al "resto del mondo", che in ambito scientifico si chiama "ambiente". Un oggetto viene bensì isolato da tutto il resto per essere conosciuto e studiato, ma non si potrà mai dimenticare che in effetti esso è sempre connesso "al tutto". Questa separazione, che configura una vera e propria *astrazione dal contesto*, viene messa in atto in ogni processo di conoscenza. Ebbene, ciò che intendiamo sottolineare è che questa *operazione di astrazione* è ragionevole a una sola condizione: che si evidenzino le relazioni eliminate, in modo tale che si possa costruire un modello e si possa valutare l'approssimazione nell'applicazione del modello al mondo reale.

Accanto alle relazioni esterne, sussistono le relazioni "interne", cioè quelle che strutturano l'oggetto, l'analisi delle quali consente di pervenire alle componenti dell'oggetto stesso. Cogliere la struttura dell'oggetto equivale a cogliere gli elementi che lo compongono nonché i nessi che vincolano tali elementi. La ragione non introduce, dunque, nessi nell'esperienza, ma l'esperienza è *in sé*, strutturalmente, *razionale*, proprio perché posta in essere dalla *relazione*, così che è sensato affermare che la scienza coglie la struttura razionale dell'esperienza proprio perché ne coglie la *struttura relazionale*. È precisamente questa struttura relazionale che viene descritta dal processo della *spiegazione scientifica*.

La relazione causale, come abbiamo già detto, costituisce il nesso fondamentale nel suo vincolare fenomeni, assunti come antecedenti causali, ad altri fenomeni, assunti come effetti o conseguenti. Il nesso causale, inoltre, può venire inteso sia in *sensu ontologico*, come se il soggetto facesse esperienza diretta di tale nesso cogliendolo nella realtà stessa, sia in *sensu epistemico*, come se cioè esso avesse attinenza solo con il modo soggettivo di configurare il processo della conoscenza. Se lo si intende in questo secondo senso, allora si fa valere quella che viene definita la *causalità humeana* e cioè si abbandona il concetto intuitivo di causalità per approdare a un nesso meno "impegnativo" tra due eventi: non si tratta di affermare che il primo produce il (è causa del) secondo, ma solo che il secondo segue il primo con una certa costanza. Questa costanza, in genere, viene espressa mediante una legge, dalla quale poi si deducono asserti osservativi, e per questa ragione si parla oggi di *spiegazione nomologico-deduttiva*.

Il modello nomologico-deduttivo, pertanto, si fonda su di un *explanans*, che comprende una o più leggi di copertura insieme a determinate condizioni iniziali. Si tratta di leggi naturali, necessarie a "rendere piano" il fenomeno (*explanandum*), cioè a *spiegarlo*, togliendogli le pieghe (*plicae*). Da tali leggi generali è possibile dedurre gli asserti osservativi che, riferendosi a casi particolari, possono venire confrontati direttamente con l'esperienza, che corroborerà o confuterà la legge, risultando conforme o meno all'asserto osservativo.



3. Il modello nomologico-deduttivo in fisica

In fisica, la spiegazione offerta dal modello nomologico-deduttivo si basa sulla sussunzione (che indica l'atto del ricondurre un concetto nell'ambito di un concetto più ampio che lo comprenda) di un caso particolare sotto una legge generale e naturale. Il principale modello di spiegazione fisica è, appunto, quello nomologico-deduttivo descritto da Hempel e Oppenheim (Hempel et al. 1948). In tale modello non si fa menzione delle nozioni di causa e di effetto, poiché gli autori ritengono che le spiegazioni causali siano un sottospazio delle spiegazioni ricoperte dal loro modello (Hempel, 1965, 347 e sgg).

Si pone, poi, il problema di chiarire che cosa s'intende per legge naturale. Hempel e Oppenheim, nello stesso lavoro del 1948, definiscono una legge come un condizionale *universale* o *derivato*, intendendo per "universale" un enunciato che *non contiene nomi individuali* e i cui predicati siano meramente qualitativi, nel senso che il loro significato non dipende da riferimenti spazio-temporali né da oggetti particolari; e intendendo per "derivato" un enunciato *logicamente deducibile da qualche serie di leggi fondamentali*. Hempel e Oppenheim (Hempel et al., 1948, 153) si chiedono quale forma devono avere gli enunciati per essere delle leggi e chiariscono che intendono per "universale"²:

Quali sono le caratteristiche delle frasi tipo-legge? Prima di tutto, le frasi tipo-legge sono dichiarazioni di forma universale, come 'Tutte le uova di pettirosso sono di colore verde-blu', 'Tutti i metalli sono conduttori di elettricità', 'a pressione costante, qualsiasi gas si espande con l'aumentare della temperatura' [...]. Le leggi fondamentali, poi, dovranno essere interpretate in modo da soddisfare ciò che abbiamo chiamato una condizione di portata non-limitata.

Inoltre, questi autori hanno ben chiara la difficoltà di definire i predicati meramente qualitativi, così che la definizione di legge appena proposta soffre dalla vaghezza proprio del concetto di "predicato qualitativo", ma fanno degli esempi che ci dovrebbero aiutare a capire. Per loro (Hempel et al., 1948, 156-157)³

i termini 'soft', 'verde', 'più caldo di', 'lungo come', 'liquido', 'carico elettricamente', 'femmina', 'padre di' sono predicati puramente qualitativi, mentre 'più alto della Torre Eiffel', 'medioevale', 'lunare', 'artico', 'Ming' non lo sono [...] attributi come blu, duro, solido, più caldo, ma non le proprietà di essere un discendente di Napoleone, o un animale artico, o una statua greca.

- 2 Nell'originale, "What are the characteristics of lawlike sentences? First of all, lawlike sentences are statements of universal form, such as 'All robins' eggs are greenish-blue', 'All metals are conductors of electricity', 'At constant pressure, any gas expands with increasing temperature' [...] Fundamental laws, then, will have to be construed so as to satisfy what we have called a condition of non-limited scope".
- 3 Nell'originale, "the terms 'soft', 'green', 'warmer than', 'as long as', 'liquid', 'electrically charged', 'female', 'father of' are purely qualitative predicates, while 'taller than the Eiffel Tower', 'medieval', 'lunar', 'arctic', 'Ming' are not [...] such attributes as blue, hard, solid, warmer, but not by the properties of being a descendant of Napoleon, or an arctic animal, or a Greek statue".



Sebbene non definiti, i predicati meramente qualitativi, che possono essere inclusi nelle leggi secondo questi autori, sono, effettivamente, abbastanza chiari, ma per noi sono problematici, come vedremo.

Hempel (1966) dice che in sostanza le leggi scientifiche, considerate nel modello nomologico-deduttivo, hanno la forma: «In tutti i casi in cui si realizzano condizioni del tipo F, si realizzano anche condizioni del tipo G». È interessante notare che non tutti gli enunciati di questa forma universale si possono qualificare come leggi di natura, anche se fossero veri. Per esempio, la tesi «tutte le pietre contenute in questa cassa contengono ferro» è di forma universale (F è la condizione che una pietra sia nella cassa, G quella di contenere ferro) e tuttavia, quand'anche questa affermazione fosse vera, non la si potrebbe riguardare come una legge. Questo perché, come detto, nel concetto di legge non devono essere contenuti né riferimenti spazio-temporali né oggetti particolari.

Il modello nomologico-deduttivo di Hempel si può descrivere schematicamente come segue. Sia E un evento che si sa ha avuto luogo in una certa occasione e che deve essere spiegato. Perché E è accaduto? Per rispondere a questa domanda, indichiamo certi altri eventi, o stati di cose, E_1, \dots, E_n e una o più proposizioni generali, o leggi, L_1, \dots, L_n tali che la presenza di E (nell'occasione data) segua logicamente da quelle leggi e dal fatto che quegli altri eventi (stati) si sono presentati.

L'ormai famoso esempio di spiegazione nomologico-deduttiva dato dallo stesso Hempel è un caso tipico in cui l'*explanandum* è un evento e l'*explanans* consiste di eventi e stati antecedenti. Perché il radiatore della mia automobile è esploso durante la notte? Si chiede Hempel. Il serbatoio era pieno di acqua; il tappo era ermeticamente avvitato; non era stato aggiunto alcun liquido antigelo; l'automobile era stata lasciata nel cortile; durante la notte la temperatura era inaspettatamente scesa molto al di sotto dello zero. Questi erano gli antecedenti. Insieme con le leggi della fisica – in particolare, la legge secondo cui il volume dell'acqua aumenta se gela – essi spiegano lo scoppio del radiatore. Conoscendo gli antecedenti e le leggi, avremmo potuto prevedere l'evento con certezza. Noi, in questo esempio di Hempel, vorremmo far notare due aspetti, importanti nel differenziare la spiegazione di tipo fisico da quella di tipo chimico, mai notati in letteratura e che andiamo ad accennare.

Per Hempel e Oppenheim, la qualità definitoria fondamentale della legge di natura è quella di non contenere nomi individuali e determinazioni spazio-temporali. Quale è allora la legge che afferma che il volume dell'acqua aumenta quando questa ghiaccia? Come fa ad esistere una legge che parla esplicitamente dell'acqua, quando Hempel ha detto *expressis verbis* che la legge non deve contenere “nomi individuali”, ma solo “predicati qualitativi” e “acqua” è il nome proprio di una sostanza chimica? Il problema potrebbe risolversi se esistesse una legge che affermasse che “tutte le sostanze chimiche aumentano di volume alla diminuzione della temperatura”, ma si tenga presente che la caratteristica dell'acqua di aumentare di volume alla diminuzione della temperatura è una proprietà “anomala”, ben poco diffusa, cioè, tra le altre sostanze e, inoltre, valida soltanto in condizioni particolari (intorno alla temperatura di solidificazione). Normalmente il volume aumenta all'aumentare della temperatura, non con la sua diminuzione. Inoltre, vi è il problema della temperatura di solidificazione. La temperatura è scesa “sotto lo zero” ci dice Hempel. E allora? Bisogna sapere che l'acqua solidifica a zero gradi centigradi in condizioni normali di pressione, perché solo in tale condizione si determina qualcosa; ma questa conoscenza di una proprietà dell'acqua non viene da alcuna legge.



Esistono, quindi, delle proprietà delle sostanze che, pur connesse alle leggi di natura, non sono determinabili in maniera univoca e semplice da esse. Esse vanno determinate sperimentalmente e inserite in tabelle. Non c'è nessuna altra possibilità, a meno di non inserirle nella definizione (l'acqua è la sostanza che bolle a 100 gradi centigradi e solidifica a 0 gradi a pressione atmosferica) con ulteriori problemi, come quello di una definizione variabile per aggiunta di altre proprietà.

4. La spiegazione chimica e le sue leggi fondamentali

Venendo alla chimica, chiediamoci se esistono o meno sue leggi specifiche (Viliani, 2001, Cap. 11), (Van Brakel *et al.*, 1981). In letteratura, questa questione è considerata tuttora aperta. Secondo E.T. Caldin (1959), esistono in chimica i tipi di leggi:

1. relazioni funzionali tra proprietà variabili di un dato sistema (per esempio, dipendenza dalla temperatura del calore specifico di una sostanza pura o della costante di velocità di una reazione);
2. leggi che stabiliscono l'esistenza di materiali con proprietà riproducibili. In questa categoria dovrebbero rientrare le leggi che regolano una reazione chimica ($A + B$ sotto certe condizioni dà $C + D$);
3. la legge di periodicità (le proprietà degli elementi sono funzione periodica del loro numero atomico);
4. la legge dei gas e varie regole circa la reattività chimica.

Vi è poi l'opinione, espressa per esempio da G.M. Schwab (1959), secondo la quale esistono in chimica solo due leggi specifiche: la periodicità e la legge stechiometrica. Posizioni ancora più radicali, come quelle di H. Laitko e W. Schmidt (Laitko *et al.* 1968), sostengono infine che in chimica non vi sono leggi specifiche, giacché la stessa legge stechiometrica, che sola può aspirare a questo titolo, presenta delle eccezioni. Il problema, consistente nel se e perché le leggi chimiche presentino eccezioni, è stato discusso da opposte sponde da R. Viha-lemm (2003) e N. Christie e J. Christie (2000, 2003). Il primo ritiene che le leggi chimiche non presentano eccezioni perché «expresses a phenomenon “in a pure form”, in an idealized way» («esprimono un fenomeno “in forma pura”, in un modo ideale») e i secondi sostengono che le leggi e le teorie fisiche sono «exact and unexceptioned in a way that many chemical laws do not even pretend to be» («esatte e senza eccezioni in un modo in cui molte leggi chimiche non pretendono nemmeno di essere»).

Un superamento dello schema di Hempel-Oppenheim è stato suggerito da W. Fleischer (1964) e da R. Simon (1977), qualora si intenda per “legge” una regolarità nel rapporto costituzione-proprietà. Secondo questi autori i sistemi che obbediscono a una particolare legge chimica (intesa in questo senso) non sono tutti identici, ma solo analoghi. In una situazione nuova, pertanto, non si può essere certi che il sistema considerato sia “abbastanza analogo” da comportarsi in accordo con quella legge. Il concetto di analogo è strettamente correlato alle “serie omologhe” che svolgono un notevole ruolo nel razionalizzare l'enorme quantità di composti della chimica organica. Il concetto di analogia è molto importante in chimica, perché gli oggetti studiati si possono idealizzare (per esempio raggruppandoli in classi) solo entro certi limiti.



Dire che certe sostanze appartengono alla classe degli alcoli (e cioè che in certe condizioni F esse si comportano tutte in un certo modo G) non equivale a ridurre i singoli alcoli a un alcool ideale, ma consiste nel *costruire* un comportamento-modello comune a tutti gli alcoli, sotto certe condizioni ideali. In pratica, è il concetto di *generale* che andrebbe utilizzato e non quello di *universale*. Da questo esempio si vede che sebbene, come qualunque spiegazione, la spiegazione in chimica è una razionalizzazione che inquadra l'*explicandum* in un contesto più generale, essa generalizza per classi. Certo è sempre possibile pensare a una classe come ad una legge (nel senso che la classe è essa stessa una generalizzazione che può venire espressa nella forma di una legge: tutti gli oggetti che hanno x, y, z caratteristiche sono X) purché, per restare alla definizione di legge di Hempel e Oppenheim, non si restringa troppo il campo e si ricada nella "condition of non-limited scope". In pratica, si perda l'universalità della legge e ci si riduca a campi molto più ristretti.

La spiegazione che la chimica offre o ricerca dei fenomeni che studia è dunque sostanzialmente differente da quella del modello nomologico-deduttivo nella sua applicazione fisica. Per quanto riguarda le leggi, esse sono di natura sostanzialmente diversa da quelle della fisica in quanto riguardano la costituzione prima che il comportamento degli enti materiali (questo è il significato dell'analisi di autori come Caldin e Schwab), anche se tali leggi hanno un limitato valore euristico ed esplicativo, perché non sono leggi di necessità, ma norme limitative. Per esempio, le leggi delle proporzioni non permettono in generale di prevedere quale particolare composto si forma in una reazione, ma soltanto - e con notevoli eccezioni - una serie di possibili prodotti. Per quanto riguarda poi le condizioni iniziali del modello hempeliano, il punto è che le leggi della chimica non consentono di costruire catene univoche di cause ed effetti; di contro, le leggi della fisica, in astratto utili a ciò, sono in pratica inutilizzabili, e pertanto prive di valore esplicativo, in quanto le sostanze studiate dalla chimica sono di gran lunga troppo complesse perché si possa trarre qualche lume sul loro comportamento da leggi generali, traducibili solo in equazioni non trattabili da uomo o da macchina. Inoltre, i differenti livelli di complessità della realtà e le "emergenze" tipiche di ogni livello ci tolgono ogni speranza di poter risolvere questi "problemi tecnici" e avere spiegazioni *ab initio*.

Veniamo ora ad analizzare più in dettaglio gli aspetti salienti della spiegazione proposta dalla chimica. La prima cosa da notare è la particolarità della spiegazione chimica, e cioè il suo rifarsi al piano microscopico (molecole) per comprendere delle proprietà di sostanze macroscopiche (sostanze chimiche). Questo tipo di spiegazione (Villani, 1998, 1996), che è legato alla storia di tale disciplina, è stato chiamato *batogeno* da Halbwachs (1973). Tale peculiarità della spiegazione chimica (il connettere e spiegare le proprietà macroscopiche con l'aiuto del concetto di composizione sul piano microscopico) fa sì che i fatti macroscopici siano considerati spiegati quando sono ricondotti a un livello più "profondo" e cioè a particolari strutture atomiche (molecole) che sono riconosciute e individuate in quanto il modello esplicativo stesso induce a cercarle. La compresenza di questi due piani è tipica di tutta la chimica. È chiaro che limitarsi a qualificare come *batogena* la spiegazione chimica non basta a definirla: occorre chiarire il paradigma che governa la transizione fra i due piani.

La compresenza di questi due piani, oltre ad essere un evidente fattore di ricchezza, può generare delle confusioni (Villani, 1993). La prima cosa da chiarire è che, sebbene esista una corrispondenza biunivoca tra le molecole (microscopiche) e i composti chimici (macroscopici), non esiste nessuna relazione



biunivoca tra le proprietà molecolari e quelle dei composti chimici. Infatti, una proprietà macroscopica è, in genere, legata a più proprietà microscopiche e, inoltre, per molte proprietà macroscopiche non esiste una controparte molecolare. Alcune proprietà macroscopiche sono correlabili non alle proprietà delle singole molecole, ma a quelle dell'insieme di molecole. Sono, infatti, le interazioni intermolecolari a spiegare queste grandezze macroscopiche. Questo ha come conseguenza che una stessa sostanza chimica (identiche proprietà molecolari), in un differente stato fisico (differenti interazioni molecolari), ha proprietà macroscopiche molto diverse. Il caso di differente stato fisico (ghiaccio-acqua-vapore), ma anche casi di differenti forme cristalline (zolfo rombico-zolfo monoclinico), ne sono chiari esempi.

Tanto la spiegazione fisica che quella chimica, la prima per leggi e la seconda per presenza e proprietà d'enti, sono due modi generali di spiegazione che abbiamo ricollegato ai concetti di *universale* e di *generale*. Un fatto singolo, unico, va sempre connesso ad altri per essere capito. La connessione avviene sempre per inclusione dei singoli in dei "gruppi", siano essi creati tramite leggi (tutti gli *a* sono *b*) o tramite l'evidenziazione di proprietà collettive, come fa la chimica. Il raggruppare i singoli in classi non annulla le individualità dei singoli, ma consente di "capire" le proprietà comuni a più enti individuali.



5. La spiegazione biologica

Come per la chimica, anche per la biologia insorge il problema dell'esistenza di leggi specifiche. Ci sono differenti posizioni a tale riguardo. A titolo di esempio, ne riportiamo due opposte: quella di Ernst Mayr e quella di Brian Goldwin. Mayr (1990) sostiene che in biologia, invece di cercare di formulare leggi esatte e inderogabili, gli scienziati organizzano abitualmente le loro generalizzazioni in modelli concettuali; Goldwin (Greco, 1999, pp. 84-85), invece, asserisce che la biologia, come la fisica, deve scoprire le leggi che governano «l'ordine sottile dello stato vivente, che è un tipo particolare di organizzazione della materia».

Inoltre, si è soliti sostenere che le eventuali leggi biologiche sarebbero di natura diversa da quelle fisiche (Gagliasso, 2001, nota 6, pp. 29-30). In particolare, in biologia non esisterebbero leggi *prescrittive*, ma unicamente di tipo *proscrittivo*: "vincoli d'impossibilità" per qualsiasi tipo di strutture, meccanismi e funzioni, che non siano stati concretamente sedimentati dalla storia della Terra. La natura stessa di questi vincoli, con i loro tempi di "bloccaggio" o di "congelamento" (Buiatti, 2000), (Amaldi, 2001), richiede una spiegazione di tipo storico. Le regolarità e le discontinuità di tali vincoli, la loro espressione negli ecosistemi, così come nelle strutture cellulari o nelle macromolecole come il Dna, richiedono forme esplicative che coinvolgano la *narrazione*, ponendo l'epistemologia della biologia di fronte al problema della *spiegazione storica*.

Riguardo al problema delle leggi specifiche in chimica e in biologia, esiste poi la posizione *più* radicale che potrebbe risolvere il problema eliminando le singole discipline (Hempel, 1972, 158):

Le future teorie potrebbero benissimo venir espresse in nuovi generi di termini, funzionanti entro teorie di vasta portata, che offrono spiegazioni sia per i fenomeni ora chiamati biologici, sia per altri ora chiamati fisici o chimici. Per il vocabolario di una tale teoria unificante di vasta portata, la divisione fra termini fisici-chimici e termini biologici potrebbe non

essere più applicabile in modo significativo, e la nozione di una biologia riducentesi in una analisi alla fisica e alla chimica potrebbe perdere il suo significato.

La problematicità delle specifiche leggi biologiche appare a molti biologi come una deficienza, come un qualcosa da eliminare ricorrendo all'esempio fisico. A noi, invece, sembra una normale conseguenza del campo di studio della biologia (Villani, 2008, Cap. 3). Come, e più che in ambito chimico, sia gli enti collettivi, come le specie, sia quelli individuali, come gli specifici esseri, non possono dissolversi completamente nell'universale e, quindi, in biologia è possibile attingere il *generale* piuttosto che l'*universale*.

Certamente, in chimica e in biologia, la scarsità di leggi specifiche è spesso supportata da un ruolo preponderante dei concetti: essi possono diventare analoghi, per forza euristica, a leggi. Infatti, l'indagine scientifica in chimica, come in biologia, non può fare a meno di oggetti concettuali *invarianti, identici* nelle varie applicazioni e *uniformabili* nelle loro dinamiche, che si ottengono attraverso procedure mentali consistenti in *relazioni misurative e comparative* di fenomeni. Attraverso queste procedure si stabilizza il metodo che permette di padroneggiare scientificamente la materia, ivi compresa quella differenziata qualitativamente, fino al vivente.

Le differenze qualitative, tuttavia, non si possono dissolvere nell'universale e, accanto ai concetti di universale/generale, resta sempre presente il particolare, l'individuale. Infatti, tutto nel mondo vivente, anche il componente che sembra più stabile e invariato, è il prodotto di un passato più o meno remoto e dei suoi vincoli storici, sia lineari e cumulativi sia esito di imponenti discontinuità. Un legame tra passato e futuro che risulta tanto negli enti quanto nei processi del pianeta. Inoltre, rispetto al mondo inerte di cui si occupano le altre discipline, il tempo irreversibile del mondo vivente è particolare; i soggetti viventi, mediante le loro singolarità ne sono parte attiva e sono dunque storicamente significativi. Vediamo in quest'ultimo aspetto l'accentuarsi dell'importanza del concetto di individuo che poi, nell'ambito della storia umana, porterà ai Cesare e ai Napoleone, cioè a soggetti che, all'interno di contesti vincolanti, hanno comunque lasciato una traccia individuale.

6. Spiegazione scientifica disciplinare e didattica

In questo lavoro abbiamo inquadrato la spiegazione scientifica in un'ottica generale e in una specifica epistemologia, quella *sistemica*. Abbiamo, infatti, chiarito che il singolo oggetto/processo scientifico, è intrinsecamente relazionato a tutti gli altri oggetti/processi scientifici. È, inoltre, relazionato sia con i suoi costituenti sia con l'ambiente che lo circonda. La disciplina poi che lo studia, cioè la specifica disciplina scientifica, è una realtà costruita *storicamente* e *socialmente*.

L'apporto chiave della Sistemica in ambito strettamente scientifico è stato quello del superamento della visione meccanicistica e lineare della scienza fisica classica in favore di una concezione organica e non lineare della scienza. In ambiti più generali, ha aperto la strada a visioni integrate e a sistemi che non rispondono in maniera deterministica. L'educazione, come insieme di attività interdipendenti, è entrata solo di recente nel novero dei sistemi complessi analizzati in quest'ottica. Famoso è il libro di Edgard Moren (1999) *Una testa ben fatta* che praticamente introduce questa nuova impostazione in didattica. Nella



stessa ottica si muove Evandro Agazzi (2008, p. 38), uno dei maggiori filosofi viventi, “una maniera feconda di guardare alla scuola e al problema delle sue possibili riforme o, comunque, miglioramenti consiste nel pensarla come un organismo o un ‘sistema’ sottoposto a sviluppo”. Invece, ancora oggi, spesso la scuola è pensata come un sistema burocratico governato da interventi regolamentari o normativi che dovrebbero in modo meccanicistico produrre nel tempo andamenti prevedibili e determinati. La stessa valutazione scolastica, sia quella dei singoli studenti, sia quella globale del sistema, va rivista in ottica sistemica.

Quest’ottica sistemica prevede una completa ristrutturazione della didattica delle scienze con notevoli cambiamenti sia per i docenti sia per gli studenti. Come ha ben evidenziato Antiseri (2000), la scienza che si insegna a scuola, quella codificata nei libri di testo e nei manuali, riproduce le teorie codificate in un dato momento ed elimina completamente il percorso storico che ha portato a tali teorie. Questo crea negli studenti l’idea che “quello che dice la scienza” rappresenta verità assolute, atemporali, facendo diventare la stessa scienza uno dei bastioni del dogmatismo. La storia della scienza e la sua analisi epistemologica, invece, mostrando l’operare degli scienziati, i loro contrasti e le loro sintesi, ci presentano la conoscenza scientifica come un processo e non come un insieme di risultati definitivi. La scienza, quindi, non può venir insegnata astoricamente e Mach (1982) ci dice che «Il modo migliore perché un allievo si impadronisca di una conoscenza è di fargli percorrere la via su cui è stata ottenuta». Inoltre, l’approccio storico/epistemologico allo studio delle discipline scientifiche non va a detrimento delle conoscenze specifiche, come ci indica Einstein (1966) con un pensiero molto moderno, su cui tutti gli operatori della scuola dovrebbero riflettere:

Se una persona è padrona dei principi fondamentali del proprio settore e ha imparato a pensare e a lavorare indipendentemente, troverà sicuramente la propria strada e inoltre sarà in grado di adattarsi al progresso e ai mutamenti più di una persona la cui istruzione consiste principalmente nell’acquisizione di una conoscenza particolareggiata.

È ormai largamente accertato, in ambito epistemologico, che la ricerca scientifica nasca da problemi aperti, da problemi da risolvere. Non si danno risposte se non si pongono le giuste domande, per cui gli uomini di scienza non fanno altro che rispondere a domande e lo storico della scienza, che vuole intendere il significato di una teoria, deve innanzitutto capire qual era il problema, cui la teoria ha tentato di dare una soluzione, e deve ricostruire lo *stato problematico* in cui la teoria suddetta si è venuta a inserire. Questo è quello che va riproposto a scuola e fatto capire agli studenti.

I problemi sono il *primum movens* di ogni ricerca scientifica, ma dove sono i problemi scientifici nell’insegnamento delle scienze? Semplicemente non esistono, giacché l’insegnante si preoccupa di fornire agli studenti i risultati della ricerca, senza indicare che essi sono risposte a fondamentali domande: il merito principale dello scienziato è precisamente quello di avere individuato le domande giuste da porre alla natura. La storia della scienza, insomma, ci mostra che le ipotesi scientifiche sono generate da problemi e rappresentano il tentativo di risolverli; e quando sembra che la risposta sia quella giusta, essa genera altri problemi, che reclamano nuove soluzioni. Lo stesso Charles Darwin (Antiseri, 2000, p. 93) ci ricorda che è più difficile porsi le domande che trovare le risposte: «Se guardo indietro al cammino che in questo senso io ho percorso, trovo



che mi fu più difficile scoprire quali erano i problemi da risolvere, che poi li risolverli».

In un'ottica sistema, inoltre, l'insegnante deve riconnettere le problematiche scientifiche al momento storico che le ha generate, agli accadimenti sociali ed economici di quel preciso momento storico in cui la teoria è stata proposta e si è fatta spazio tra le teorie concorrenti. È inutile dire che questo approccio aiuterebbe moltissimo i collegamenti tra le materie scolastiche, incentivando un'interdisciplinarietà che colleghi le discipline, evitando di eliminarle. Se così si procedesse, si aprirebbe tutto il problema organizzativo di creare momenti comuni di insegnamento delle varie materie e non ci si limiterebbe a sporadiche occasioni di lezioni tenute da diversi docenti, frutto della loro conoscenza personale.

Un'impostazione storica della didattica delle scienze e un'impostazione generalmente sistemica della scienza non possono essere inventate dal nulla: non è pensabile che un docente venga preparato solo sugli argomenti tecnici della sua disciplina e gli si chiedi poi di fare "tutt'altro", cioè di reinventarsi da zero competenze che nessuno gli ha fornito. L'università, quindi, che ha il compito di formare l'insegnante, dovrebbe ristrutturare completamente la preparazione dei futuri docenti, fornendo loro una nuova *mentalità*, che li prepari anche ad una nuova organizzazione dell'insegnamento.



7. Conclusioni

In questo lavoro abbiamo analizzato le caratteristiche generali della spiegazione scientifica, concentrandoci sul modello nomologico-deduttivo, che può venire considerato il modello standard. Ebbene, l'analisi ci ha consentito di evidenziare che non è possibile sostenere che di tale modello si dà un'unica forma, in linea con un riduzionismo metodologico che potremmo definire "radicale".

Alla concezione *riduzionistica*, che spesso mette capo al *monismo metodologico*, abbiamo preferito sostituire la concezione *sistemica*, che ci ha consentito di cogliere lo specifico oggetto/processo, ente scientifico, assunto come oggetto di studio, ma solo in quanto intrinsecamente relazionato a tutti gli altri oggetti che si collocano al suo livello di complessità (relazione orizzontale). Inoltre, abbiamo sottolineato come la sua "separazione/messa in evidenza" è in ogni caso una "semplificazione / approssimazione / astrazione" e, infine, abbiamo evidenziato come ogni ente scientifico sia relazionato "verso il basso" (top-down) con i suoi costituenti e "verso l'alto" (bottom-up) con l'ambiente che lo circonda.

Ciò che ci premeva lasciar emergere con chiarezza è il seguente punto: nessuno dei tre tipi di relazione analizzati (con il soggetto conoscente, con l'ambiente e con i propri costituenti) può essere completamente trascurato, in una corretta "descrizione/spiegazione" dello specifico ente. In tal modo, risulta possibile mostrare che la spiegazione scientifica si articola in un momento di modellizzazione che separa l'ente (che viene assunto quale oggetto di studio) da tutto il resto, facendo così astrazione da ogni altro processo di indagine, che potrebbe su di esso applicarsi, nonché infine da quel "tutto" all'interno del quale, alla fine dell'indagine, esso viene in genere reinserito.

L'ottica, quindi, è sistemica. Per essa, ogni ente (nodo) è connesso alla rete globale e ha al suo interno una rete di connessioni tra i costituenti, così che viene messa radicalmente in discussione quella *prospettiva riduzionistica*, che pretende di pervenire agli elementi ultimi e alle leggi che li governano. Secondo questa prospettiva *l'intero* può venire ricostituito mediante la sintesi di quegli

elementi che sono stati ottenuti mediante una precedente analisi, riducendo il processo della spiegazione alla riconduzione del percorso che dal particolare va al generale, individuando la catena causale univoca, che concettualmente può venire percorsa nei due sensi di marcia.

A muovere da tali premesse, abbiamo potuto prendere in esame le singole spiegazioni disciplinari, le quali si muovono o in un unico piano di complessità (in orizzontale) oppure connettono differenti piani. In particolare, abbiamo mostrato che la spiegazione chimica si muove sia nel piano di complessità delle sostanze macroscopiche pure (semplici e composte) sia in quello microscopico degli atomi/molecole. Lo stesso vale per la biologia, che studia gli individui organizzati, dal piano dei virus agli organismi pluricellulari. Leggermente differente è la spiegazione fisica che ha la pretesa di trovare l'universale che passa tra i piani, oltre alla "normale" spiegazione orizzontale nel mondo submicroscopico, in quello della materia condensata, nell'astronomia, ecc.

Orbene, questa pluralità di spiegazioni scientifiche non può non esibire una *pluralità metodologica*, nel senso della *declinazione* in più forme del modello nomologico-deduttivo. Tale modello conserva certamente alcuni tratti invarianti, ma ciò non può azzerare le forme del suo articolarsi in base alla specificità della disciplina e alla storicità dell'indagine condotta. Questa articolazione scientifica rappresenta, a nostro giudizio, una ricchezza concettuale da difendere e salvaguardare, di contro alle pretese ideologiche, prima che culturali, volte ad *uniformare e ridurre*.

Se questa è la proposta che intendiamo avanzare, si impone la necessità di cambiare completamente la didattica delle scienze. Per prima cosa, il cambiamento nella modalità di insegnare deve avvenire a scuola. Se si fa propria l'ottica sistemica, la singola teoria scientifica dovrà venire illustrata mettendola in rapporto sia alla cooperazione/concorrenza con le altre teorie rivali che storicamente si sono confrontate per risolvere il medesimo problema, sia inserendo la teoria stessa nel contesto socio/economico in cui è sorta. In secondo luogo, rileviamo che gli insegnamenti scientifici universitari non possono avere un'impronta esclusivamente "tecnicistica", come accade ora. La trasformazione nella concezione del fare scienza, insomma, non può non comportare una trasformazione nella modalità di insegnarla e di preparare i futuri insegnanti a svolgere questo fondamentale compito.



Riferimenti bibliografici

- Agazzi E. (2008). Una prospettiva sistemica per la scuola. In Abbona F., Del Re G., Monaco G. (a cura di), *Complessità dinamica dei processi educativi. Aspetti teorici e pratici*. Milano: FrancoAngeli.
- Amaldi F. (2001). Evoluzione della selezione. In Forestiero S., Stanzione M. (a cura di), *Selezione e selezionismi*. Milano: FrancoAngeli.
- Antiseri D. (2000). *Epistemologia e didattica delle scienze*. Roma: Armando.
- Buiatti M. (2000). *Lo stato vivente della materia*. Torino: UTET.
- Caldin E.T. (1959). Theories and Development of Chemistry. *The British Journal for the Philosophy of Science*, X, pp. 209-222.
- Christie N., Christie J. (2000). "Laws" and "theories" in Chemistry do not obey the rules. In Bhushan N., Rosenfeld S. (Eds.), *Of minds and molecules: new philosophical perspectives on Chemistry*. New York: Oxford University Press.
- Christie N., Christie J. (2003). Chemical Laws and Theories: A Response to Vihalemm. *Foundations of Chemistry*, 5, pp. 165-177.

- Fleischer W. (1964). Zum Verhältnis von Theorie und Praxis in der Chemie. *Chemie Schule*, 8/9, pp. 371-376.
- Einstein A. (1966). *Pensieri degli anni difficili*, trad. it. Torino: Boringhieri 1966.
- Gagliasso E. (2001). *Verso un'epistemologia del mondo vivente*. Milano: Guerrini Studio.
- Greco P. (1999). *Evoluzioni. Dal Big Bang a Wall Street. La Sintesi Impossibile*. Napoli: CUEN.
- Halbwachs F. (1973). Colloque de l'academie internationale de la philosophie des sciences avec le concours du centre international d'epistemologie geetique. In Apostel L., Cellérier G. et al., *L'esplication dans les sciences*. Paris: Flammarion.
- Hempel C.G. (1942). The function of general laws in history. *The Journal of Philosophy*, 39, pp. 35-48.
- Hempel C.G., Oppenheim P. (1948). Studies in the Logic of Explanation. *Philosophy of Science*, 15, pp. 135- 175.
- Hempel C.G. (1965). *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*. New York: The Free Press.
- Hempel C.G. (1966). *Philosophy of natural science*. Englewood Cliffs N.J.: Prentice Hall.
- Hempel C.G. (1972). *Filosofia delle scienze naturali*. Bologna: il Mulino.
- Laitko H., Schmidt W. (1968). Tendenzen des chemischen Elementbegriffs. *Chemie Schule*, 15, pp. 292-296.
- Mach E. (1982). *Conoscenza ed errore*. Torino: Einaudi.
- Morin E. (1999). *La tête bien faite*. Paris: Seuil (ed. ital. *La testa ben fatta*, Milano, Raffaello Cortina, 2000).
- Mayr E. (1990). *Storia del pensiero biologico*. Torino: Bollati Boringhieri.
- Schwab G.M. (1959). *Die Erkenntniskrise der Chemie und ihre Überwindung*. Munchen: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.
- Simon R. (1977). Zu einigen Fragen des Verhältnisses von Empirischem und Theoretischem in der chemischen Erkenntnis. *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, 25, pp. 201-211.
- Stella A. (1995). *La relazione e il valore*. Milano: Guerini.
- Stella A. (2014). Il concetto di relazione: costruito o atto? *Giornale di Metafisica*, 1, pp. 259-273.
- Van Brakel J., Vermeeren H. (1981). On the philosophy of chemistry. *Philosophy Research Archives*, VII, pp. 1405-1456.
- Vihalemm R. (2003). Are Laws of Nature and Scientific Theories Peculiar in Chemistry? Scrutinizing Mendeleev's Discovery. *Foundations of Chemistry*, 5, pp. 7-22.
- Villani G. (2008). *Complesso e organizzato. Sistemi strutturati in fisica, chimica, biologia ed oltre*. Milano: FrancoAngeli.
- Villani G. (1998). Una weltanschauung scientifica: la chimica. In Abrusci V.M., Cellucci C., Cordeschi R., Fano V. (Eds.), *Prospettive della logica e della filosofia della scienza, Atti del Convegno Triennale della SILFS*. Pisa: ETS.
- Villani G. (1996). Specificità della chimica. In Mosini V. (Ed.), *Philosophers in the laboratory*. Accademia Nazionale di Scienze, Lettere e Arti Modena, Vol. 13, pp. 163-180.
- Villani G. (2001). *La chiave del mondo. Dalla filosofia alla scienza: l'onnipotenza delle molecole*. Napoli: CUEN.
- Villani G. (1993). Sostanze e reazioni chimiche: concetti di chimica teorica di interesse generale. *Epistemologia*, XVI, pp. 191-212.