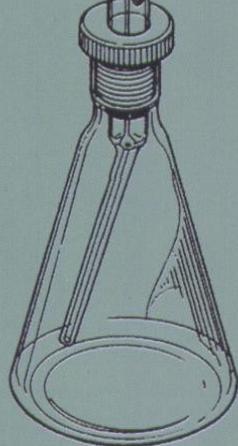


ISSN 0392-8942

Anno XXXII, N. 4, 2010

Giornale di Didattica e Cultura della Società Chimica Italiana



CnS

LA CHIMICA NELLA SCUOLA



Numero speciale

LA CHIMICA E LE ALTRE DISCIPLINE



SPECIFICITÀ E RAPPORTI
IMMAGINE E COMUNICAZIONE
DIDATTICA



<http://www.soc.chim.it>
<http://www.didichim.org>

LA CHIMICA NELLA SCUOLA

Anno XXXII
Speciale Ottobre - Dicembre 2010

Direttore responsabile

Pierluigi Riani
Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale
Via Risorgimento, 35 - 50126 Pisa
Tel. 0502219398 - fax 0502219260
e-mail: riani@dcci.unipi.it

Past-Editor

Paolo Mirone
e-mail: paolo.mirone@fastwebnet.it

Redattore

Pasquale Fetto
Via Carlo Iussì, 9
40068 San Lazzaro di Savena (BO)
Tel. 051463312 cell. 3280221434
e-mail: pasquale.fetto@didichim.org

Comitato di redazione

Liberato Cardellini, Marco Ciardi, Valentina
Domenici, Pasquale Fetto, Silvano Fuso,
Paolo Mirone, Fabio Olmi, Pierluigi Riani, Silvia
Ripoli, Paolo Edgardo Todesco, Gianmarco Ieluzzi,
Giovanni Villani

Comitato Scientifico

Aldo Borsese, Luigi Cerruti, Rinaldo Cervellati,
Giacomo Costa, Michele Antonio Floriano
(*Presidente della Divisione di Didattica*),
Franco Frabboni, Ezio Roletto, Giuseppe Valitutti,
Richard Zare

Editing

Pasquale Fetto
pasquale.fetto@didichim.org

Periodicità: trimestrale (4 fascicoli all'anno)

Abbonamenti annuali

Italia euro 48 - Paesi comunitari euro 58
Fascicoli separati Italia euro 12
Fascicoli separati Paesi extracomunitari euro 15

Gli importi includono l'IVA e, per l'estero le spese di
spedizione via aerea
Spedizione in abbonamento postale Art.2 comma 20/C
Legge 662/96 Filiale di Bologna

Ufficio Abbonamenti

Manuela Mostacci
SCI, Viale Liegi, 48/c - 00198 - Roma
Tel. 068549691 fax 068548734
E-mail: soc.chim.it@agora.stm.it

Copyright 1995 Società Chimica Italiana

Pubblicazione iscritta al n. 219 del registro di
Cancelleria del Tribunale di Roma in data 03.05.1996

La riproduzione totale o parziale degli articoli e delle
illustrazioni pubblicate in questa rivista è permessa
previa autorizzazione della Direzione

La direzione non assume responsabilità per le opinioni
espresse dagli autori degli articoli, dei testi redazionali
e pubblicitari

Editore

SCI - Viale Liegi 48/c - 00198 Roma

Stampa

Centro Stampa DE VITTORIA r.s.l.
Via Degli Aurunci, 19 - 00185 ROMA

SOMMARIO

INTRODUZIONE di <i>Giovanni Villani</i>	1
LA TEORIA CHIMICA COME LA PIU' CHIARA TEORIA SCIENTIFICA MODERNA di <i>Antonino Drago</i>	2
I RAPPORTI DELLA CHIMICA CON LE ALTRE TEORIE SCIENTIFICHE di <i>Antonino Drago</i>	10
NÉ DURA NÉ SOFFICE: SULLA NATURA IBRIDA DEL METODO DELLA CHIMICA di <i>Andrea Tontini</i>	18
LA RICERCA DEI COMPONENTI ULTIMI DELLA MATERIA: L'APPROCCIO FILOSOFICO, QUELLO CHIMICO E QUELLO FISICO di <i>Roberto Zingales</i>	23
LA LEGGE DELLA "CONSERVAZIONE DELLE MASSE" DI LAVOISIER di <i>Giovanni Villani</i>	41
CHIMICA, FISICA E SUPERCONDUTTIVITÀ ELEMENTI PER UN'ANALISI EPISTEMICA DELLA SCIENZA DEI MATERIALI di <i>Gianmarco Ieluzzi, Luigi Cerruti</i>	57
LA CHIMICA E L'AGRICOLTURA di <i>Marco Taddia</i>	72
L'IMMAGINE DELLA CHIMICA E LE SUE CAUSE di <i>Pietro Greco</i>	86
DIVERTIRSI CON LA SCIENZA AL TEMPO DI...FB di <i>Vincenzo Villani, Concetta Berlantini</i>	90
DALL'INTERARTICOLAZIONE DELLE DISCIPLINE SCIENTIFICHE AI PERCORSI DIDATTICI INTEGRATI di <i>Silvia Ripoli</i>	98
I FENOMENI CHIMICO-FISICI NEL PRIMO CICLO ovvero PRENDERE SUL SERIO I BAMBINI E INSEGNARE SCIENZE di <i>Eleonora Aquilini, Leonardo Barsantini</i>	118

INTRODUZIONE

Questo numero speciale de *La Chimica nella Scuola* del 2010 da me curato è incentrato sulla caratterizzazione della Chimica e sul rapporto con le altre discipline scientifiche. È questo un argomento culturale di notevole rilevanza in sé, ma con notevoli risvolti sia verso l'interno della disciplina, e in questo contesto ci occuperemo principalmente degli aspetti didattici, sia verso l'esterno, e ci occuperemo principalmente di immagine della chimica e di comunicazione scientifica.

In questa introduzione non possiamo non accennare al problema generale del significato attuale delle discipline scientifiche e del loro ruolo nell'insegnamento scientifico. Riguardo alla prima questione, quelle delle specifiche discipline e del loro fondamento, oggi in ambito scientifico si verificano due fenomeni per certi versi opposti. Da un lato, lo specializzarsi sempre più del lavoro crea divisioni su divisioni portando alla nascita di sotto discipline scientifiche sempre meno ampie; dall'altro, alcuni campi di lavoro pretendono di essere nuove discipline, se non di sostituire del tutto le vecchie discipline. Esempi, noti anche al vasto pubblico, possono essere quelli di Scienza dei Materiali, Scienza Ambientale, ecc., campi in cui le vecchie discipline, quali fisica, chimica, biologia, ecc., entrano sicuramente in maniera determinante, ma mescolate in maniera tale che, secondo alcuni, sono praticamente fuse a creare qualcosa di nuovo.

Io credo che una disciplina scientifica non rappresenti solamente una divisione della scienza in funzione dell'argomento studiato, ma incorpori in sé un approccio, un modo tutto suo di studiare quell'argomento. È una prospettiva da cui guardare dei "pezzi di mondo" che sono di per sé sempre interdisciplinari. È questo approccio che differenzia le varie discipline, più che l'argomento di studio in sé. È infatti possibile trovare argomenti uguali studiati in modo diverso da varie discipline. Tali analisi sulle discipline consentono da un lato di capire l'importanza della divisione della scienza, la sua "pluralità", dall'altro consentono di sottolineare la non arbitrarietà di tale divisione, aspetto difficile da contestare se tale differenziazione fosse dovuta solo all'argomento studiato. Consentono anche di respingere l'attacco odierno alle singole discipline scientifiche, considerate come dei reperti storici che, magari, hanno avuto una funzione in passato, ma che ora hanno esaurito il loro compito e sopravvivono solo come distinzioni in funzione di finanziamenti alla ricerca e posti di lavoro. Resta comunque aperto il problema se, una volta intese le discipline scientifiche come approcci diversi, ottiche diverse, tutte le discipline (e le sotto discipline) attuali possano aspirare a tale diversificazione.

Un discorso articolato va fatto per l'aspetto disciplinare ed, eventualmente, interdisciplinare, dell'insegnamento scolastico della scienza. Avendo evidenziato gli specifici approcci che le differenti discipline applicano alla realtà scientifica studiata, si può capire l'importanza di una visione diversificata in ambito scolastico. Per esempio, se in una scuola superiore non venisse insegnata la chimica, verrebbe a mancare completamente l'approccio che differenzia qualitativamente non solo gli esseri viventi, ma anche la materia inanimata. Questa mancanza non solo porterebbe a lacune specifiche in ambito scientifico, ma comprometterebbe l'intera immagine del mondo elaborata dalla scienza, favorendo una netta separazione tra il mondo del "semplice" inanimato (fisica) e quello del "complesso" animato (biologia). Va tenuto presente che il compito di creare una corretta immagine globale del mondo può essere svolto solo dall'istituzione scolastica perché solo in essa si organizza e si propone una trattazione complessiva ed organica del sapere scientifico. Questo è un compito culturale cui gli insegnanti d'ambito scientifico non possono rinunciare, pena la perdita di valore generale per le loro discipline. In questo caso infatti, le materie scientifiche insegnate diverrebbero solo dispensatrici di conoscenze "specialistiche", e facilmente si potrebbe far passare l'idea che tali materie siano "informative" e non "formative". Inoltre, siccome tali informazioni specifiche sono "inutili" nella vita di tutti i giorni, la logica conseguenza sarebbe, nella migliore delle ipotesi, la riduzione dello spazio orario per le materie scientifiche e nella peggiore la loro completa eliminazione dal curriculum scolastico.

La scienza che deve venir fuori dall'istituzione scolastica è invece intrinsecamente plurale. Questo significa che l'immagine del mondo che viene fuori dall'ambito scientifico si può ottenere solamente dopo una sintesi. Esiste la possibilità di favorire tale sintesi in ambito scolastico? È questo il ruolo che si dovrebbe ritagliare il confronto interdisciplinare. Ad oggi questo ruolo non è svolto che occasionalmente, ma io credo che uno spazio scolastico interdisciplinare in ambito scientifico vada sostenuto e incentivato.

Questo Speciale di CnS può essere idealmente diviso in tre parti, come si può capire anche dal sottotitolo. La prima, più ampia, comprende i primi sette lavori (da Drago a Taddia) e si occupa di evidenziare sia gli aspetti specifici e caratterizzanti della chimica sia come questi la differenziano dalle altre discipline: fisica, biologia, scienza dei materiali. La seconda parte con due lavori (Greco e V. Villani-Berlantini) si occupa dell'immagine della chimica e della sua comunicazione "moderna", all'epoca di Facebook. Infine due lavori, principalmente didattici (Ripoli e Aquilini-Barsantini), si occupano dell'applicazione "in classe" di tali discorsi generali.

Sono fermamente convinto che un volume di tal genere sia utile in sé ai docenti. Inoltre può essere utilizzato anche per ricavarne aspetti storico-epistemologici da gestire in classe o per porre l'attenzione sugli aspetti comunicativi e di immagine o per percorsi didattici da riprendere e sviluppare. Ringrazio, quindi, vivamente il Comitato di Redazione di CnS per la scelta di questo Speciale e per l'opportunità datami di organizzarlo.

Giovanni Villani

LA TEORIA CHIMICA COME LA PIU' CHIARA TEORIA SCIENTIFICA MODERNA

Antonino Drago

Università di Pisa– drago@unina.it

1. L'atto di nascita della scienza moderna

La scienza moderna è nata quando *i risultati degli esperimenti, le misure, sono stati messi sistematicamente in relazione con ipotesi matematiche*; ad es. in chimica, il mettere a confronto una reazione con il suo bilancio delle masse. Questo confronto tra realtà operativa e matematica ha segnato una novità assoluta rispetto al mondo (greco) antico che aveva sempre concepito il mondo reale e finito come separato dal mondo in cui collocava la matematica, infinito e trascendente.

L'idea che la nascita della scienza moderna sia avvenuta con la rottura della finitezza del mondo greco (aristotelico) è stata sottolineata dallo storico Koyré, che ne ha fatto il suo cavallo di battaglia nell'interpretare i grandi scienziati all'origine della fisica (Galilei, Cartesio, ecc.)¹. Un altro studioso, Kojève, ha indicato la causa storica profonda di questa rottura nella concezione, ormai popolarizzata in Occidente, nel dogma cristiano della avvenuta incarnazione di Dio in terra: nei vecchi termini, la congiunzione tra Terra e Cielo; nei nuovi termini, la possibilità di congiunzione tra esperienza (anche strumentale) e matematica.²

E' poco noto che questo tipo di dialettica, tra esperimenti e ipotesi matematica, è stato concepito già attorno al 1450 da Nicola Cusano (1401-1464) con il *De Staticis Experimentis*³. Cusano aveva una concezione della matematica molto moderna; essa è un costrutto della nostra mente, senza legami mitici con il divino (come è ad es. in Platone: "il Dio geometrizza"). Ma ha una sua specificità: mentre la conoscenza ordinaria della realtà è sempre approssimativa, la conoscenza matematica è soggetta al principio di non contraddizione; il quale dà una netta distinzione tra vero e falso); questa proprietà rende la matematica la migliore conoscenza di cui disponiamo: "*Nihil certi habemus nisi nostram matematicam*" (Niente abbiamo di certo salvo la nostra matematica)⁴. Pertanto essa può indirizzare la nostra interpretazione della realtà.⁵

Secondo Cusano la *mens* si collega alla realtà mediante la *mensura*, la quale dà come risultato dei numeri; che poi la mente confronta tra loro mediante proporzioni (la sola unica tecnica matematica usata in geometria e fisica fino al primo 1600); e così crea un sistema coerente di concetti sperimentali. Quindi in questa dialettica esperimento/matematica, la mente a partire dalla realtà può costruire sia gli enti matematici (invece di ritrovarli nella realtà come già dati), sia le nuove formule matematiche delle leggi fisiche (ad es. quella della caduta dei gravi, nata proprio così in Galilei), che quindi non sono leggi di Dio sulla realtà.

Un secolo e mezzo dopo Cusano, Galilei ha sostenuto una diversa concezione di questo rapporto esperimento-matematica: "Il gran libro dell'Universo... è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto"; e questo linguaggio strutturale matematico è lo stesso di quello del Creatore del mondo; salvo che noi dobbiamo procedere passo a passo, mentre Lui vede tutto d'un colpo solo⁶; cioè, Galilei considera

1. A. Koyré: *Dal mondo chiuso all'universo infinito*, Feltrinelli, Milano, 1970.

2. A. Kojève: "L'origine chrétienne de la science moderne", in F. Braudel (ed.): *Mélanges Alexandre Koyré II. L'aventure de l'esprit*, Hermann, Paris, 1964, 295-306. Ma Kojève concepisce questa congiunzione come sussunzione della Terra in Cielo, e quindi degli esperimenti nella matematica; io invece ho considerato questa congiunzione così (come è nel dogma cristiano e) come è nel rapporto tra esperimento e matematica: come una dialettica; la quale può risolversi in maniera positiva (validità di una legge sperimentale) o anche negativa (disprova). Ne ho trattato in "Il Cristianesimo come fattore decisivo per la nascita della scienza moderna in Europa", *Progresso del Mezzogiorno*, 31 (2007) 203-231; "Niccolò Cusano come punto di svolta per la nascita della scienza moderna", *Distance. Revue pro kritike misleni*, 1 (2009) 66-103; "Il processo plurisecolare di nascita della scienza moderna", *Atti del Congresso Sisfa*, 2009 (in stampa).

3. Niccolò Cusano: *De Staticis Experimentis*, 1450 (tr. it. *Gli esperimenti di statica*, in: *Opere Filosofiche*, (a cura di G. Federici Vescovini), 1972, Torino, UTET, 521-539). Per una introduzione al pensiero di Cusano, i cui libri non sono di immediata lettura, vedasi il chiaro e profondo libretto di G. Santinello: *Introduzione a Niccolò Cusano*, Laterza, Bari, 1987². Ho trattato l'argomento che segue in: "Niccolò Cusano e la Chimica classica", *Atti XIII Congr. Naz. Storia e Fond. Chimica*, Rend. Acc. Naz. delle Scienze detta dei XL, 33, pt. II, tomo II, 2009, 91-104.

4. N. Cusano: *De Mathematica Perfectione*, citato in E. Cassirer: *Individuum und Kosmos in der Philosophie der Renaissance*. (tr. it. Firenze, La Nuova Italia, 1950, vol. I. p. 30).

5. T.P. McTighe: "Nicholas of Cusa's philosophy of science and its metaphysical background", in G. Santinello (ed.): *Nicola Cusano agli inizi del mondo moderno*, Sansoni, Firenze, 1970, 317-338.

6. G. Galilei: *Il Saggiatore* (1623), Ricciardi, Napoli, 1953, pp. 121-122.

la matematica in maniera tanto ideale da farla diventare soprannaturale, per cui essa è in Dio e nel suo creato. Qui riconosciamo una metafisica (ontologica) come base della fisica.

Sicuramente chi ha reso storicamente irreversibile la nascita della scienza moderna, caratterizzata dalla *dialettica sperimenti / matematica*, è stato Galilei, che ha eseguito sistematicamente una grande quantità di esperimenti manipolativi sulla realtà (così come hanno sottolineato con forza i positivisti); ma occorre considerare la anticipazione sostanziosa di Cusano ben un secolo e mezzo prima; egli ne aveva già dato la concezione necessaria ed in maniera anche più corretta di quella di Galilei che nella matematica ha un legame con la metafisica.⁷

2. Il primo progetto di scienza moderna: usare la differenza dei pesi per misurare tutto

Tra i vari strumenti di misura (ad es. la clessidra per misurare il tempo o altri strumenti a lui contemporanei) Cusano ha sottolineato l'importanza della bilancia che misura il peso (noi diciamo meglio: la massa). Si noti che un secolo e mezzo dopo di lui, anche il primo dei tre periodi dell'attività scientifica di Galilei riguardava la fisica dei pesi (che include anche la fisica del pendolo o dei corpi su un piano inclinato), piuttosto che la astronomia.⁸ La fisica dei pesi è terrestre, a differenza di quella celeste; essa è la vera scienza moderna perché è manipolativa, invece che solo osservativa. Ma poi con Newton prevarrà la fisica celeste, perché in questo campo di fenomeni si potrà usare facilmente la nuova matematica dell'analisi infinitesimale con risultati strabiliante (tanto da non fare attenzione ai suoi fondamenti, che allora erano sconosciuti e casomai metafisici).

Con la misura del peso Cusano ha programmato di determinare tutte le altre grandezze: ad es. il peso specifico, il tempo, la temperatura, il suono, ecc.; cosicché egli introdusse le misure indirette e, in definitiva, gli apparati doppiamente artificiali di misura, così importanti per formulare la scienza moderna.⁹

Secondo Koyré, nella storia della fisica è importante il passaggio teorico dal concetto di peso assoluto, che cioè dipendeva da un centro unico dell'Universo, al concetto di peso relativo. Galilei non è riuscito a liberarsi dal peso assoluto. Invece un secolo e più prima di lui, Cusano aveva tolto ogni centro all'universo e ogni posto fisso a qualsiasi corpo.

Inoltre Cusano ragionava non tanto sul peso, ma sulle differenze di peso, che confrontava tra loro mediante proporzioni, sulle quali basare tutta la conoscenza scientifica della realtà materiale. Così uno storico giudica il programma di Cusano:

Nella metà del secolo XV apparve quello che può essere considerato il coronamento delle opere di questo genere, l'*Idiota De Staticis experimentis*, per la penna del cardinale Nicolò da Cusa. Questo libro laterale nella produzione di uno dei più conosciuti filosofi e uomini di Chiesa del tempo, non sembra aver attirato molta attenzione. Esso propone l'uso della bilancia e il confronto dei pesi per la soluzione di un ampio spettro di fenomeni, che va dalla meccanica alla medicina, compresa la chimica. Propone le differenze di peso come guida per la valutazione delle acque naturali, la condizione del sangue e dell'urina nei sani e nei malati, la valutazione della efficacia dei medicinali e l'identificazione dei metalli e delle leghe. Sarebbe difficile trovare una prescrizione più specifica per quanto poi gli scienziati fecero di fatto due secoli più tardi.¹⁰

In effetti due secoli dopo è nata la teoria scientifica più autorevole e famosa, la teoria newtoniana; ma essa rappresentava tutto un altro indirizzo, perché si basava, oltre che sulla meccanica celeste, sui concetti metafisici di spazio assoluto, tempo assoluto e soprattutto forza-causa gravitazionale intesa come azione di Dio sul mondo. Essa è stata così tanto influente che ha deviato la chimica nascente (con Boyle), indirizzandola a fondarsi su questi stessi concetti, specialmente sulla forza gravitazionale come la responsabile delle affinità chimiche (mentre invece lo è la forza elettromagnetica)¹¹. Finalmente, dopo un secolo da Newton (e circa tre secoli da Cusano), Lavoisier, in opposizione alla teoria newtoniana, ha fatto nascere la chimica proprio con lo studio sulle differenze di peso nelle reazioni chimiche.

Egli ha basato la nuova teoria sulla sola conservazione del peso-massa (cioè sulla differenza nulla tra i pesi dei reagenti e i pesi dei composti) nelle reazioni chimiche. Si noti che Cusano non ha enunciato questa conservazione perché gli era implicita, in quanto per lui Dio pervade anche la materia, la quale quindi non può perdersi.

7. Si noti che P. Rossi: *La nascita della scienza moderna in Europa*, Laterza, Milano, 1997, p. x, è l'unico a pronunciarsi su quando avvenne questa nascita; essa è avvenuta quando sono state realizzate tutte queste tre caratteristiche, che riguardano il metodo scientifico: 1) indistinzione tra natura ed artificio; 2) esplorazione di tutto un nuovo continente di conoscenze; 3) invenzione. In realtà tutte e tre sono avvenute con Cusano nella forma seguente: 1) la matematica come guida della conoscenza umana; 2) l'estensione della conoscenza, che usa l'infinito, a tutta la realtà fisica (e oltre); 3) il metodo della *coniectura*, la quale fa indurre conoscenze inaccessibili alla intelligenza solo razionante.

8. W.L. Wisan: "The New Science of Motion. A Study of Galileo's *De motu locali*", *Archive of History of Exact Sciences*, 13, 1974, 103-306, pp. 136-161.

9. A. Koyré: *Studi Galileiani*, op. cit., p. 68 e p. 71. Un elenco delle molte altre innovazioni e anticipazioni di Cusano nella scienza è dato da G. Santinello: *Introduzione a Niccolò Cusano*, op. cit., pp. 105-109.

10. R.P. Multhauf: "The science of Matter", in D.C. Linberg (ed.): *Science in the Middle Age*, Chicago U.P., Chicago, 1978, 369-390, p. 386.

11. A. Thackray: *Atomi e Forze*, Il Mulino, Bologna, 1983, in particolare p. 305

La teoria chimica come la piu' chiara teoria scientifica moderna

In conclusione, *la chimica è nata sulla base di un progetto di ricerca scientifica che era alternativo a quello della teoria fisica dominante e che di fatto era stato enunciato da Cusano tre secoli prima.*

3. Il ragionare in logica non classica

Ora ricordiamo la frase teorica che ha iniziato la chimica: “Chiamiamo elemento quella sostanza che ancora non abbiamo potuto decomporre”¹². Esaminiamola attentamente; essa non è una affermazione di sicura certezza; piuttosto indica il metodo per giungere ad isolare gli elementi. Come mai? Se osserviamo bene, essa è una farsa doppiamente negata: ci sono le negazioni “non” e “decomporre”, che significa scomporre, dividere, separare. Nella comune cultura linguistica si dice: “Due negazioni affermano”. Ma ciò non è vero in questo caso, perché Lavoisier non può dire: “Chiamiamo elemento un componente semplice della materia”; perché dovrebbe saper indicare con prove scientifiche definitive ciò che “semplice”; ma i chimici del suo tempo non avevano prove sperimentali dirette (che arriveranno i primi del 1900 con l’ultramicroscopio) per decidere ultimativamente chi fosse un elemento semplice o elementare. Notiamo inoltre che la teoria chimica è piena di frasi doppiamente negate di questo tipo (FDN). Già all’origine della chimica, R. Boyle aveva enunciato i suoi principi (di metodo) con quattro affermazioni, delle quali tre incominciano con FDN: “Non sembra assurdo...”; “Non è parimenti impossibile...”; “Non negherò perentoriamente che...”¹³. Queste espressioni non indicano certezze definitive, ma principi di esplorazione, cioè principi metodologici. Ancora Lavoisier: “Niente è creato [non conservato]... è un principio possibile [del metodo]»¹⁴ E poi Proust: “non ammettere nulla provvisoriamente, oltre quello che i fatti mettono avanti al momento presente...”¹⁵ Oppure Wallstone: “... se ci si può accertare che ogni corpo consiste di particelle non più ulteriormente divisibili, allora si può dubitare poco che tutti gli altri corpi sono costituiti similmente; e possiamo senza esitazione concludere che quelle quantità equivalenti... esprimono realmente i pesi relativi degli atomi elementari.”¹⁶ e così via; fino ad Avogadro che, per sostenere la sua famosa ipotesi atomica, sviluppa mediante FDN dei ragionamenti per assurdo; alla base dei quali è la seguente affermazione: Senza appellarsi ad una divisione delle molecole reagenti è impossibile spiegare le reazioni chimiche con l’idea che il volume totale dei prodotti è lo stesso di quello dei reagenti¹⁷.

Ricordiamo che Aristotele ha solo abbozzato la logica classica; essa è nata completamente, come logica matematica, nel 1854 (Boole). Quindi in tutto il periodo intermedio l’uso della logica era approssimativo, tanto più quando se ne ricercavano le alternative.

Ma alla fine del secolo XIX è nata una prima logica matematica non classica (modale) e poi varie altre (per prima la intuizionista). In un primo tempo esse sono state trascurate; ma dagli anni ‘30, si è riconosciuto che esse sono valide autonomamente da quella classica. Negli stessi anni è stato riconosciuto che essa è importante per la fisica teorica (almeno in meccanica quantistica).¹⁸

Qualche decennio dopo si è arrivati a distinguere con precisione la logica classica da (gran parte di) quelle non classiche mediante la validità o non della legge della doppia negazione: quando si usa una doppia negazione che non è equivalente alla affermativa corrispondente si è in logica non classica. Ne concludiamo che *la chimica che usa in maniera essenziale frasi doppiamente negate ragiona all’interno della logica non classica*¹⁹, cioè in un’altra maniera di ragionare da quella euclidea e newtoniana.

Torniamo allora al principio di non contraddizione che sta alla base di tutto il sistema scientifico, anche secondo Cusano. Quale logica era seguita da Cusano? Di fatto egli era contro i logici (classici) del suo tempo, che chiamava la *Aristotelis secta*; ed usava FDN con le quali era capace di sviluppare in logica non classica complessi ragionamenti per assurdo²⁰. Invece poi Galilei ha avuto un curioso modo di procedere: quando esponeva teoremi usava la logica classica (e il latino); e usava la logica non classica (e il volgare) quando sviluppava la sua ricerca con un inusuale dialogo tra tre persone. Per di più non è stato preciso nel secondo modo di procedere e (questo è più grave) nemmeno nel primo.²¹ Poi

12. A.-L. Lavoisier: *Traité Élémentaire de Chimie*, Paris, 1789, p. 8. Qui e nel seguito, per facilitare il lettore, sottolineo le due negazioni di ogni FDN.

13. R. Boyle: *The sceptical chymist*, London, 1661, prima pagina della parte I.

14. A.-L. Lavoisier: *Oeuvres de Lavoisier*, Tome I, Paris, 1862-1892, p. 15

15. L. Proust: «Lettre à M. d’Arcet», *Journal de Physique*, 59 (1804) 332.

16. W.H. Wallstone: “On the finite extent of the Atmosphere”, *Philosophical Transactions*, 1822, 89-98.

17. Vedasi il mio: “La maniera di ragionare di Lavoisier, Dalton ed Avogadro durante la nascita della teoria chimica”, *Rend. Acc. Naz. delle Scienze detta dei XL, Memorie di Sci. Fisiche e Nat.*, ser. V, 31, pt. II, tomo II, 2007, 189-201.

18. G. Birkhoff and J. von Neumann: “The logic of quantum mechanics”, *Ann. Math.*, 37 (1936), 23-43.

19. A. Troelstra and D. van Dalen: *Introduction to Constructive Mathematics*, Noth-Holland, Amsterdam, 1988, 56ff. o C. Mangione e S. Bozzi: *Storia della Logica*, Garzanti, Milano, 1993.

20. Cusano N., *Apologia Doctae Ignorantiae*, fol. 6, tr. it. in *Scritti Filosofici* (a cura di G. Santinello) Zanichelli, vol. II, Bologna 1980, p. 406. Sull’uso della logica non classica da parte di Cusano si veda uno dei miei studi citati in precedenza.

21. V. De Luise e A. Drago: “Logica non classica nella fisica dei *Discorsi* di Galilei”, in A. Rossi (ed.): *Atti XIII Congr. Naz. St. Fisica*, Conte, Lecce, 1995, 51-58; “L’organizzazione della teoria e la logica in Galilei”, in F. Bevilacqua (ed.): *Atti XI Congr. Naz. Storia Fisica*, Trento, 1990, 123-140. “Il *De motu locali* di G. Galilei: analisi logica, matematica e principio d’inerzia”, *Atti Fond. Ronchi*, 64 (2009) 887-906.

Newton ha utilizzato solo la logica classica per dedurre quante più leggi possibile dai tre principi della meccanica, espressi con affermazioni positive assolute (“Ogni corpo...”)

Solo con Lavoisier la scienza è tornata a basarsi sulla logica non classica fondandoci per la prima volta una teoria scientifica; e solo dopo un altro mezzo secolo Sadi Carnot (1824) e Lobachevsky (1840) sono stati capaci, dentro teorie scientifiche, di ragionarci bene quanto Cusano.²²

4. Una organizzazione non deduttiva della teoria

I due tipi di logica corrispondono a *due tipi organizzazione di una teoria scientifica*. Notiamo che sin dall’infanzia siamo stati abituati a concepire una teoria scientifica (geometria euclidea) secondo la organizzazione deduttiva della teoria. E’ stato Aristotele a teorizzare questa organizzazione, nella quale tutte le proposizioni vere sono quelle dedotte da pochi assiomi astratti; due decenni dopo Euclide l’ha esemplificata con la sua geometria; poi Newton l’ha ripetuta nella teoria meccanica e quindi questo tipo di organizzazione è sembrata l’unica possibile per qualsiasi altra teoria scientifica. Ma Cusano non ha mai organizzato la sua concezione scientifica e le sue teorie (anche metafisiche) deduttivamente, ma sempre su problemi; cioè, proprio così come è organizzata la teoria chimica: che ha il problema di scoprire gli elementi della materia e a questo scopo va a costruire un nuovo metodo scientifico. Un secolo e mezzo dopo Cusano, anche Galilei è fuoriuscito dalla tradizionale maniera di organizzare una teoria: come già si diceva, egli ha alternato in una stessa opera i due tipi di organizzazione, ma senza proporre un modello preciso.²³

Quindi, se nella scienza si cerca la prima concezione scientifica che è passata ad organizzarsi su problemi, ancora una volta occorre riferirsi a Cusano; solo dopo un secolo e mezzo Galilei ha innovato anche lui, ma solo parzialmente.

Se si cerca invece una vera e propria teoria che sia organizzata secondo questa alternativa, allora occorre riferirsi a tre teorie, nate nel tempo della rivoluzione francese²⁴: la meccanica di L. Carnot (1783) basata sul problema di trovare gli invarianti del moto²⁵, e la meccanica di Lagrange (1788) basata sul problema di descrivere i moti soggetti ai vincoli, la chimica di Lavoisier (1789). Il primo di questi scienziati è anche ben cosciente di questa duplicità di organizzarsi: due sue pagine la esprimono con chiarezza.

Quindi *la teoria chimica è stata una teoria alternativa alla meccanica di Newton* non solo nei concetti e nei metodi operativi, ma anche nella organizzazione della intera teoria e questa alternativa scientifica non era di poca importanza, perché contemporaneamente essa è stata rappresentata da altre teorie fisiche importanti.

5. Quale matematica nella scienza? Solo quella infinitesimale?

Vediamo ora un altro aspetto fondamentale, quello che nella storia della scienza è stato più evidente, *l’infinito matematico*.

Gli antichi Greci volevano usare solo la matematica finita. Ma la matematica che serve nella scienza contiene sempre l’infinito: o come illimitato (cioè, come infinito solo potenziale, mai concretizzato; ad es. il contare i numeri interi, il calcolare le cifre successive di π), o come infinito in atto (ad esempio dare realtà al punto all’infinito di una retta, o alle cifre di π tutte assieme). Se si cerca il primo che ha costruito una nuova concezione della matematica utilizzando il concetto di infinito, si trova, ancora una volta, Cusano (la matematica degli infinitesimi e quella del passaggio al limite)²⁶.

22. A. Drago: “Interpretazione e ricostruzione delle *Réflexions* di Sadi Carnot mediante la logica non classica”, *Giornale di Fisica*, 40 (2000) 195-217 (con R. Pisano); “La teoria geometrica delle parallele impostata coerentemente su un problema (I)”, *Per. Matem.* ser. VIII, vol. 4, ott.-dic. 2004, pp. 41-52 (con A. Perno); “A logical analysis of Lobachevsky’s geometrical theory”, *Atti Fond. G. Ronchi*, 64 n. 4 (2010) 453-481 (con V. Bazhanov).

23. Qui c’è la polemica di W.A. Wallace (*Galileo’s Logic of Discovery and Proof. The Background, Content, and Use of His Appropriated Treatise in Aristotle’s Posterior Analytics*, Kluwer Acad. P., Boston, 1992), che vorrebbe ricondurre Galilei alla filosofia aristotelica. Ma le opere finali di Galilei indicano bene che questi voleva allontanarsi dalla organizzazione deduttiva della scienza. Si veda A. Coppola e A. Drago: “Galilei ha inventato il principio d’inerzia?...”, op. cit.

[24. Si noti che già D’Alembert aveva concepito l’idea di una teoria fisica “empirica”, in opposizione a quella “razionale”, cioè deduttiva; J. Le Ronde d’Alembert: “*Éléments*”, in J. Le Ronde d’Alembert e D. Diderot (edd.): *Encyclopédie Française*, 1754, vol. 17.

25. L. Carnot: *Essai sur les machines en général*, Defay, Dijon, 1783, 102-105; *Principes fondamentaux de l’équilibre et du mouvement*, Crapelet, Paris, 1803, p. xiii-xvii. Leibniz ha contrapposto una sua meccanica dell’urto a quella celeste di Newton; ma ha costruito solo un inizio di teoria. Dopo i grandi successi della nuova teoria newtoniana, la sua teoria fu svalutata come sorpassata. Ma poi è stata sviluppata dalla meccanica di L. Carnot. Vedasi il mio libro: *La riforma della dinamica di G.W. Leibniz*, Hevelius, Benevento, 2003.

26. Egli seppe trattare così ampiamente questo tema, da saper suggerire non solo il passaggio (intuitivo) al limite (ad es., da un poligono con molti lati ad un cerchio) ma anche il concetto basilare della analisi non standard (l’infinitesimo o iperreale); cioè egli ha formalizzato (almeno verbalmente) anche l’infinito in atto. N. Cusano: *La dotta ignoranza*, in *Opere filosofiche*, UTET, Torino, 1972, a cura di G. Federici Vescovini, 53-201, pp. 61ss.; A. Drago: “Nicolò Cusano come punto di svolta per la nascita della scienza moderna”, op. cit.; A. Drago: “Il ruolo centrale di Cusano nella nascita della scienza moderna”, op. cit.

La teoria chimica come la piu' chiara teoria scientifica moderna

Per questa innovazione egli è stato considerato da Cassirer il primo filosofo moderno della conoscenza²⁷.

Invece, dopo Cusano, Galilei ha ancora una concezione antica sull'infinito. Ne discute nel libro che conclude la sua vita scientifica²⁸; ma lo considera inaccessibile. Volendo capire la possibilità di applicarlo in fisica, discute anche sulle due possibili idee di infinito (potenziale ed in atto); ma, pur sviscerando il problema, non sa decidere quale delle due, o quando uno delle due sia utile nella sua scienza²⁹; né sa (o non vuole) fare come il suo discepolo Cavalieri, che introduceva l'infinito in atto nella fisica, sia nei calcoli delle superfici anche infinite, sia come base matematica del suo principio d'inerzia³⁰.

Dopo alcuni decenni dalla morte di Galilei, nel 1687, è nata la matematica degli infinitesimi in atto di Newton, il quale l'ha usata nella meccanica. Gli storici di solito ritengono che questo sia stato l'evento decisivo per la nascita della scienza moderna; ma Cusano aveva anticipato questa matematica quasi due secoli e mezzo prima. E per di più essi ignorano la nascita di quella scienza moderna che usa solo l'infinito potenziale, così come faceva Cusano quando calcolava le proporzioni tra le differenze di pesi. Si noti che fino a Lavoisier la chimica aveva considerato solo un numero finito di elementi: quattro dall'antichità, poi venti circa al tempo di Lavoisier; ma quando lui ha scomposto l'acqua, si è persa ogni speranza di racchiudere tutti gli elementi in un piccolo numero. *La Chimica è la prima teoria scientifica che usa solo il discreto illimitato* (quello che poi si realizzerà compiutamente con la tabella illimitata di Mendelejeff; e che in fisica teorica verrà imposto poi dalla spettroscopia e dai quanti).

Quindi la Chimica non ha usato la matematica di Newton, dominante la scienza del suo tempo: l'analisi infinitesimale. Di fatto, questa dichiarava inutile il programma della chimica; infatti, se gli infinitesimi rappresentano tutta la realtà in maniera così stupefacente da dare le leggi fisiche finallora segrete, allora anche la materia è divisibile all'infinito e quindi non ha senso cercare di scomporre le sostanze fino a ricavarne gli elementi ultimi.

Al tempo della chimica anche altre nuove teorie fisiche non usarono l'infinito in atto: la meccanica di Lazare Carnot (1783) e più tardi la termodinamica di Sadi Carnot (1824). Ma in fisica le teorie che usano questa matematica sono state viste come arretrate ad primo stadio di sviluppo, rispetto a quelle che usano la matematica classica (che si noti, anche oggi contiene l'infinito in atto³¹).

Quindi la teoria chimica ha avuto la capacità di recuperare la matematica più adatta alla scienza sperimentale, quella che non introduce enti astratti, non verificabili. A questa adeguatezza alla realtà si riferiva F. Venel, quando, nella famosa voce "Chymie" dell'*Encyclopédie Française* accusava la fisica di raccontare "romanzi".³²

Solo dopo la metà del secolo scorso (anche in concomitanza dell'importanza sociale dei computer, che, non potendo compiere operazioni con l'infinito in atto, possono realizzare solo questa matematica) la matematica dell'infinito solo potenziale è stata formalizzata come matematica costruttiva (che cioè richiede che ogni ente di cui parla sia ottenuto con un calcolo finito che al peggio lo approssima).³³ E' a causa di questo ritardo dei matematici che la chimica è stata svalutata per la sua matematica "elementare".

27. E. Cassirer: *Individuo e Cosmo nella Filosofia del Rinascimento*, op. cit.; in particolare: „Questo suo porsi di fronte al problema gnoseologico fa del Cusano il primo pensatore moderno“, p. 24; in *Storia della Filosofia Moderna*. Torino, Einaudi 1978, vol. I, p. 39, lo presenta come: „... il fondatore ed il campione della filosofia moderna.“ Si noti anche E. Vanstenbeege: *Le cardinal Nicolas de Cues*. Paris, 1920, p. 279: „La chiave di volta del sistema filosofico di Nicola Cusano... – e in questo è molto moderno – è la sua teoria della conoscenza.“

28. G. Galilei: *Discorsi su due nuove scienze*, Leida 1638, giornata VIII.

29. Ibidem.

30. A. Koyré: *Dal mondo del press'a poco all'universo della precisione*, op. cit., pp. 97-111. Di solito si considera "il calcolo degli indivisibili" di Cavalieri come un semplice tentativo di avvicinare l'analisi infinitesimale di Newton (per una eccellente esposizione si veda K. Andersen: "Cavalieri's Method of Indivisibles", *Arch. Hist. Ex. Sci.*, 31 (1985) 291-367. Vedasi anche E. Giusti: *Bonaventura Cavalieri and the Theory of Indivisibles*, Zanichelli, Bologna, 1980). Ma in realtà esso è stato il primo calcolo differenziale, fondato sull'intuizione geometrica del singolo punto, giustappunto considerato con quella precisione assoluta delle misure che per Koyré caratterizza la nascita della fisica teorica. B. Cavalieri: *Geometria degli indivisibili*, UTET, Torino, 1966. Sulla completezza di questo calcolo, ottenuta da un manoscritto postumo di Torricelli; vedasi E. Bartolotti, "La scoperta e le successive generalizzazioni di un teorema fondamentale del calcolo infinitesimale", *Archeion*, 5 (1924) 204-227. Sulla sua rilevanza per l'introduzione dell'infinito nella scienza vedasi il mio: "New Interpretation of Cavalieri's and Torricelli's method of indivisibles", in J. Folta (ed.): *Science and Technology of Rudolfinian Time*, Nat. Technical Museum, Praha, 1997, 150-167; "The introduction of actual infinity in modern science: mathematics and physics in both Cavalieri and Torricelli", *Ganita Bharati. Bull. Soc. Math. India*, 25 (2003) 79-98.

31. E.G. Kogbetlianz: *Fundamentals of Mathematics from an Advanced Point of View* (Gordon and Breach, New York, 1968), App. 2.

32. F. Venel: "Chymie", in: *Encyclopédie Française* (Diderot D., Le Ronde D'Alembert J. ed.), Livorno, 1773, vol. III.: I chimici "... ne sont curieux ni de l'infini, ni des romans physiques." Essi sono esenti "... des erreurs qui ont défiguré la Physique." (p. 389, I)

33. In effetti la prima formalizzazione della matematica con il solo infinito potenziale è avvenuta un secolo e mezzo dopo aver usato gli infinitesimi e l'infinito in atto. A. A. Markoff: "On Constructive Mathematics," *Trudy Math. Inst. Steklov*, 67 (1962) 8-14 (Engl. tr. *Am. Math. Soc. Translations*, 98 (2) (1971) 1-9). E. Bishop: *Foundations of Constructive Mathematics*, Mc Graw-Hill, New York, 1967.

6. Perché in chimica c'è una sola legge solo sul peso? Primitivismo o una maggiore unità teorica?

Ma è una teoria la chimica classica? In un primo tempo è sembrata solo un programma di ricerca, poco migliore di quello dell'alchimia; poi per molti fisici essa era troppo semplice teoricamente, immatura, primitiva³⁴.

Notiamo che la teoria chimica è nata sulla base di una sola grandezza fisica, il peso, o meglio la massa; ed ha una legge: la conservazione della massa; ma essa è di metodo, interpreta gli esperimenti (anche le leggi ponderali sono prescrizioni di metodo; solo quando gli atomi saranno dimostrati sperimentalmente quelle leggi potranno essere attribuite come intrinseche alla realtà così determinata). Poi la teoria rappresenta tutta la molteplicità del reale aggiungendo solo i nomi ed i numeri caratteristici dei vari elementi chimici, attraverso una sola legge, quella della periodicità, espressa a parole perché la formula matematica sarebbe stata troppo complicata. Quindi la sua struttura teorica interna è del tutto unitaria: *riconduce tutto ad un'unica legge su un'unica grandezza fisica*; è la teoria scientifica più semplice.

Infatti tra le teorie fisiche la prima, l'ottica geometrica, ha anch'essa una sola grandezza fisica, l'indice di rifrazione (più la matematica degli angoli formati dai raggi luminosi); ma usa due leggi. Poi è nata la meccanica di Newton che ha tre leggi. Anche quando, ancora dopo, questa meccanica è stata racchiusa in una sola legge (legge dei minimi quadrati di Gauss, principio dei lavori virtuali, Lagrangiana, ecc.) questa legge riguarda più grandezze fisiche (almeno due).

Per di più dalla fine del 1700 sono nate molte teorie fisiche, essenzialmente diverse dalla meccanica di Newton. Ma ogni teoria fisica, allo scopo di comprendere la molteplicità del campo di fenomeni studiati, ha sempre utilizzato varie grandezze fisiche, che sono state legate tra loro da diverse leggi. Queste hanno formato una struttura articolata, quella argomentativa-operativa della teoria; la complessità della quale ha tolto agli scienziati il desiderio di conoscere l'altra struttura, quella dei fondamenti della scienza.

Ma nella storia della scienza l'obiettivo dell'unità è molto importante, perché secondo i più, la ragione umana davanti alla molteplicità del reale dovrebbe esprimere una struttura intellettuale unitaria. Perciò l'unità è stata riproposta, ma ora nei rapporti tra le teorie; cioè, cercando una nuova teoria fisica che sappia includere tutte le altre; in definitiva, una teoria sola, comunque complessa, che sappia interpretare tutto il reale. In effetti ciò si era realizzato per quasi un secolo, il XVIII: la meccanica di Newton era riuscita ad includere tutte le teorie del tempo, anche la chimica. Però questo evento è stato temporaneo, ed è spiegabile sia con la fase iniziale della scienza moderna sia con l'essere questa teoria impostata su basi astratte e metafisiche (indicate in precedenza; esse sono andate in crisi definitiva all'inizio del '900). Quindi si trattava di ritrovare questa unità teorica dopo la nascita di tante teorie avvenuta nel secolo XIX.

Nel primo '900 due nuove teorie (relatività e meccanica quantistica) hanno compiuto due tentativi distinti di unificare tutte le teorie precedenti³⁵. Ma di fatto le due nuove teorie non sono conciliabili tra loro (le relazioni di indeterminazione, essendo quadratiche, non sono invarianti alle trasformazioni della relatività ristretta). Quindi l'unificazione è rimasta irraggiungibile; e lo è ancora, nonostante le specifiche proposte teoriche da parte di grandi fisici (ad es. Heisenberg).

Cosicché, nonostante la nascita di tante nuove teorie scientifiche, nella storia della scienza nessuna teoria ha rappresentato meglio della chimica classica la semplicità di una teoria scientifica rispetto alla molteplicità della realtà considerata. Quindi *la teoria chimica è la teoria scientifica più esemplare e la più semplice che sia mai esistita nella storia della scienza moderna*. Paradossalmente questa sua chiarezza e semplicità le è stata imputata, dai fisici che avevano solo teorie più complesse, a demerito, al punto da staccarla dalle loro teorie fisiche e considerarla come teoria scientifica a parte.

7. Didattica dei fondamenti della chimica e della scienza

Di solito nelle scuole superiori la chimica viene insegnata adottando astoricamente e acriticamente il punto di vista della novecentesca chimica quantistica, travolgendo così il valore didattico specifico di questo insegnamento e la storia della chimica stessa.³⁶

Qui si propone una nuova-vecchia didattica della chimica classica. La tabella seguente suggerisce il percorso didattico, che è poco diverso da quello più usuale, ma che è profondamente diverso nella portata didattica.

Perché se la chimica venisse insegnata come nell'ottocento, secondo il suo sviluppo da Lavoisier a Mendeleieff, essa avrebbe già un grande valore culturale, in quanto sarebbe anche un insegnamento di storia della chimica.³⁷ A questo compito di didattica storica della scienza è adatta quasi solo la chimica perché pochissime teorie scientifiche possono essere proposte agli studenti nella loro forma originaria.

36. Comunque ottime guide all'insegnamento sono *L. Paoloni: Nuova Didattica della Chimica*, Ed. Bracciodieta, Bari, 1982; *A. Bargellini: Chimica in azione Guida per l'insegnante*, Signorelli, Firenze; *C. Fiorentini: La prima chimica*, Angeli, Milano, 1990; *Olmi, Fabio: "Ripensare i fondamenti dell'insegnamento della chimica al biennio"*, *La Chimica nella Scuola*, n. 1, (1997) pp. 9-13; *P. Mirone: "Perché la chimica è difficile?"*, *La Chimica nella Scuola*, n. 3 (1999) pp. 67-70; *C. Fiorentini, E. Roletto: "Ipotesi per il curriculum di chimica"*, *La Chimica nella Scuola*, n. 5 (2000) pp. 158-168.

37. Discutono questo metodo *E. Torracca: "Una dimensione storica nell'insegnamento della chimica?"*, *Epsilon*, n. 2, (1994), pp. 17-22; *R.J. Gillespie: "Legame senza orbitali"*, *La Chimica nella Scuola*, n. 1 (1997), pp. 2-5; *F. Olmi: "Un solitario con le tessere di Mendeleev. Una esperienza didattica di (ri)costruzione della Tavola Periodica mendeleeviana"* *Naturalmente*, 10, 3, (1997) 58.

La teoria chimica come la piu' chiara teoria scientifica moderna

Inoltre questa didattica storica può avere un valore culturale ancor più grande: riconoscere i fondamenti della scienza. Basterebbe confrontare questa chimica con la teoria scientifica dominante nei secoli passati, la meccanica newtoniana, che gli studenti conoscono bene dall'insegnamento parallelo di Fisica. Dal confronto si ricaverebbero le differenze fondamentali, cioè le loro scelte: nella chimica la scelta per la organizzazione della teoria che va a risolvere un problema (quali e quanti siano gli elementi della materia) creando un nuovo metodo; e la scelta per la matematica limitata ai soli razionali; all'opposto, le scelte della teoria newtoniana sono: l'organizzazione che deduce tutta la teoria da tre principi-assiomi e la matematica con gli idealistici infinitesimi (ovvero le equazioni differenziali).

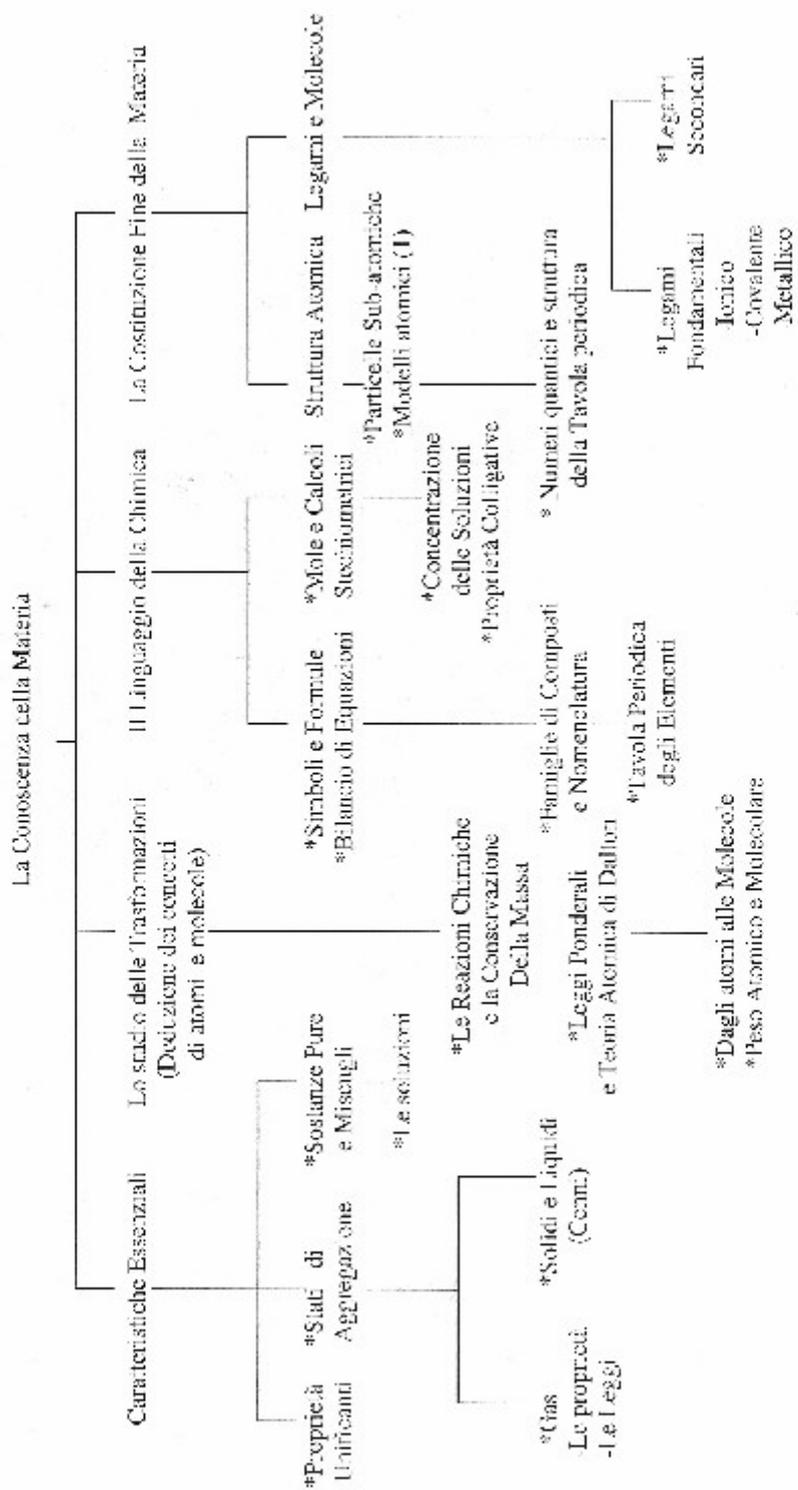
Inoltre si può facilmente illustrare che queste sono le possibili scelte nei fondamenti della scienza in generale³⁸. Anzi, si può mostrare agli studenti che la didattica della fisica della scuola superiore riconosce questa struttura perché è basata su quattro teorie: ottica, meccanica, termodinamica ed elettromagnetismo che rappresentano le quattro coppie di scelte su quei fondamenti.

38. A. Drago: "Lo schema paradigmatico della didattica della Fisica: la ricerca di un'unità tra quattro teorie", *Giornale di Fisica*, **45** n. 3 (2004) 173-191. La didattica della chimica riconosce questi fondamenti della scienza all'università, quando presenta soprattutto quattro teorie (chimica classica, cinetica chimica, chimica quantistica e chimica-fisica) che esemplificano le quattro coppie di scelte sulle due opzioni suddette (tipo di organizzazione e tipo di matematica). Vedasi C. Bauer e A. Drago: "Didattica della chimica e fondamenti della scienza", *Atti XI Conv. Naz. Storia e Fondamenti della Chimica, Acc. Naz. Sci. XL*, 123, vol. 29, 2005, Torino, 2005, 353-364.

La didattica della chimica che insegna i fondamenti della scienza prende una rivincita sulla didattica della fisica; si attribuisce il ruolo di insostituibile materia scientifica che nella scuola superiore introduce a quella conoscenza dei fondamenti della scienza che in effetti sarebbe il fine più alto dell'insegnamento scientifico a quel livello scolastico.

L'insegnamento potrebbe essere arricchito da letture storiche che chiariscano il ruolo delle scelte individuate come fondamenti della scienza. E' vero che "l'attardarsi su questi temi fondamentali" fa sacrificare la quantità di nozioni trasmesse dalla usuale didattica; però fa guadagnare grandemente nella qualità della didattica.

CHIMICA GENERALE – PERCORSO DIDATTICO INNOVATIVO



(1) Cenni sulle varie teorie atomiche con i vari problemi posti

I RAPPORTI DELLA CHIMICA CON LE ALTRE TEORIE SCIENTIFICHE

Antonino Drago

Università di Pisa – drago@unina.it

1. La rivendicazione del ruolo culturale della storia della chimica rispetto alla fisica.

La chimica si è sviluppata purtroppo soprattutto dalla fine dell'Ottocento, con Ostwald¹, quando i più ormai credevano che la chimica-fisica aveva reso la chimica dipendente dalla più autorevole e rispettata fisica. Non è allora sorprendente che con questo senno di poi gli storici non abbiano evidenziato le novità fondamentali della chimica, che era molto diversa dalla fisica teorica che aveva dominato per secoli.

Credo, assieme a vari altri, che sia giunto il tempo di rivendicare una specificità della chimica nella storia della scienza e nella storia della cultura; fino al punto di ribaltare il rapporto di subordinazione culturale che le è stato assegnato rispetto alla fisica.

Una rivendicazione di questo genere non è affatto nuova in chimica. Anzi fu proprio essa che preparò e fece nascere la chimica di Lavoisier. A pochi è noto che la "rivoluzione scientifica" (sic!), proclamata e realizzata da Lavoisier, era stata preannunciata da decenni; e lo fu attraverso un'opera (*l'Encyclopédie*) che ha avuto così tanta influenza culturale da essere una concausa della rivoluzione politica francese. Venel ha scritto delle pagine che, pur antiche di due secoli e mezzo, meritano di essere riportate perché sono attuali ancor oggi.

[...] I Chimici, tra altre false apparenze, sono ritenuti semplici manovali, o tutt'al più sperimentatori; e [...] non si suppone neppure che esista o possa esistere una chimica veramente filosofica, una chimica ragionata, profonda, trascendente; [...] essi [i Chimici] non sono curiosi dell'infinito né dei romanzi fisici [infatti la chimica] penetra fino nell'intimo di quei corpi, dei quali la fisica conosce appena la superficie e la forma estrinseca [...]

Nella maggior parte delle questioni designate dalle parola *risale fino alle origini prime*, la Fisica non ha fatto altro, finora, che confondere nozioni astratte con verità di fatto, e di conseguenza ha frainteso la natura [...]. I chimici ribelli che così oseranno disconoscere la sovranità della Fisica, oseranno pretendere pure che la Chimica ha in se stessa di che rispondere, in modo assai più soddisfacente, a tutti i quesiti di questo genere, benché si debba riconoscere che non l'ha fatto in maniera abbastanza chiara, e che ha rinunciato ad esibire tutti i suoi vantaggi [...].

E' chiaro che la rivoluzione che porrà la Chimica al rango che le compete, che la porrà almeno a fianco della fisica matematica; che tale rivoluzione, dico, non può essere opera che di un chimico capace, entusiasta, ardito, [...] nuovo Paracelso [che] si faccia coraggiosamente innanzi a dire che "tutti gli errori che hanno sfigurato la fisica sono scaturiti da un'unica fonte, cioè dal fatto che gli ignari di chimica si sono vantati di filosofare e di render ragione delle cose naturali, quelle che [invece] soltanto la chimica, unico fondamento di tutta la fisica, avrebbe potuto spiegare, ecc."².

Forse si può ritenere esagerato questo grido di indipendenza di Venel, ma di sicuro la Chimica non ha mai commesso errori del tipo spazio e assoluto e tempo assoluto; o, l'errore ancor più grave, di non credere per un secolo agli atomi e invece credere ad una sostanza particolare, l'etere, che aveva proprietà fisiche contraddittorie; e credere che questa presunta materia fosse addirittura il supporto dei fenomeni fisici più importanti (fenomeni elettrici, magnetici e gravitazionali).

Nella storia questo atteggiamento di indipendenza della chimica ebbe il suo momento di forza durante la rivoluzione francese. Non solo e non tanto perché nel 1793 (quando le monarchie europee decisero di porre fine alla rivoluzione) l'Inghilterra, che aveva il monopolio del salnitro per fare la polvere da sparo, ne chiuse il commercio con la Francia; epperò i chimici inventarono il sostituto del salnitro e la Francia rivoluzionaria poté sopravvivere all'assalto di tutte le armate europee coalizzate. Ma anche perché il popolo, che si era ribellato alla aristocrazia, si era anche ribellato, seguendo gli atteggiamenti critici di D'Alembert, Diderot e Marat, anche alla scienza della aristocrazia: invece della scienza celeste, quella terrestre; invece della scienza astratta, quella per noi; invece della scienza dei "devitalizzati infinitesimi", la scienza (chimica) della vita. Quindi c'era un programma di rifondazione dell'intera scienza sulla base della

1. Il suo grande lavoro di storico si è concretato soprattutto con W. Ostwald: *Klassiker der exakten Wissenschaften*, Englemann (ed.), Lipsia, 1892.

2. G.F. Venel: "Chemie" in D. Diderot e J. Le Ronde d'Alembert (eds.): *Encyclopédie Française*, 17, 51-80 (trad. it., Laterza, Bari, 1968, 290-293).

chimica, non della matematica degli infinitesimi o delle astrazioni metafisiche della astronomia celeste³. Il suo punto di forza intellettuale fu il fatto che Lavoisier aveva voluto pubblicare il suo trattato fondamentale *Traité Élémentaire de Chimie* proprio lo stesso anno della rivoluzione; per di più, come già si diceva nell'introduzione, egli aveva proclamato che stava facendo una "rivoluzione scientifica".

2. La chimica è nata in alternativa alla tendenza teorica creata dalla fisica (newtoniana)

Secondo Newton, i concetti di spazio e tempo assoluti, facendo aderire la fisica alla metafisica, dovevano introdurre alla dinamica essenziale dei fenomeni e quindi permettere di fondare ogni nuovo campo di ricerca. In effetti così fu per la meccanica e così fu anche per l'acustica e l'ottica; così Newton programmò, con le sue 31 "Queries", poste alla fine della sua *Optiks* (1704), per la cinetica dei gas, per la teoria chimica e per ogni altro campo, financo la morale.

La chimica moderna nacque perché abbandonò questa programmazione teorica dominante di tipo aprioristico; con Lavoisier riprese il problema fondamentale di chiedersi se esistono componenti elementari della materia e cercò coraggiosamente un nuovo metodo scientifico per risolvere questo problema;⁴ Lavoisier, piuttosto che continuare lo sperimentalismo mischiato alla metafisica di Newton, correttamente si legò solo allo sperimentalismo, il che rinnovava l'atteggiamento originario di Galilei⁵.

Inoltre Lavoisier fece una rivoluzione perché si ribellò all'idea di Newton che le forze intermolecolari fossero indicate con la forza gravitazionale, da questi considerata universale perché rappresentava l'intervento costante di Dio nel mondo celeste e atomico; per un secolo questa idea aveva indirizzato i chimici in un vicolo cieco⁶. La chimica newtoniana ricercava una spiegazione dinamica interna ai corpi, determinata dalla forza della meccanica newtoniana; la seconda invece era indifferente ai meccanismi interni, semplicemente descriveva la realtà in termini di ingresso-uscita di una reazione chimica. La prima si basava sulla affinità, creduta conseguenza della forza gravitazionale tra le molecole e quindi riferita alle loro masse; invece la nuova chimica si basava sulla affinità elettiva.

La rivoluzione era anche una ribellione alla analisi infinitesimale che in quel tempo era trionfante, tanto da oscurare la geometria, considerata una teoria matematica ormai sorpassata e da includere nella analisi⁷. Infatti quest'ultima era basata sulla idea della scomponibilità infinita del continuo; perciò con questa matematica la materia non poteva avere elementi; i chimici invece perseguirono l'atteggiamento opposto: partirono dalla idea che: "La materia non è divisibile all'infinito"⁸.

Di fronte alle leggi fisiche ricavate a tavolino, mediante calcoli matematici delle ultime conseguenze di equazioni differenziali, la chimica di Lavoisier era tornata ad una matematica che si collegava direttamente alla realtà: il bilancio delle masse dei reagenti e dei composti di una reazione chimica.

Mentre in Newton la analisi matematica era così idealizzata che pretendeva di sintetizzare l'essenziale di un fenomeno, nella nuova chimica la matematica era tornata ad essere una lingua ben fatta (così come insegnava Condillac), quella dei numeri interi e razionali (si tenga presente che la definizione moderna di funzione è della prima metà del secolo XIX), completata da una nuova e rigorosa definizione dei nomi dei vari elementi. Vedendo questo fatto dall'interno della matematica, occorre dire che non ci poteva essere contrasto maggiore del passare da una matematica del continuo (e anzi dell'iper-continuo dell'analisi non-standard, quale era di fatto la matematica di Newton) al discreto dei numeri razionali a poche cifre decimali delle pesate, o ai numeri interi dei numeri atomici. Inoltre la chimica è tornata a valorizzare il linguaggio naturale, che comunque entra in una teoria scientifica. Giustamente Crosland ha dedicato un'opera al linguaggio della chimica⁹. Cosicché dopo un secolo di trionfi della nuova, potentissima analisi infinitesimale, la variazione nella matematica portata dalla chimica è stata così radicale che grossolanamente è sembrato che in chimica non ci fosse più la matematica.

Anche alcuni concetti fondativi hanno subito variazioni radicali di significato. Ad es., al concetto di tempo assoluto e continuo, la chimica ha risposto con il tempo operativo e binario del prima/dopo. Al concetto di spazio-conte-

3. C.C. Gillispie, «The *Encyclopédie* and the Jacobinian Philosophy of Science», in M. Clagett (ed.), *Critical Problems in the History of Science*, Wisconsin U.P., 1962, pp. 255-269.

4. A. Drago: "La chimica classica come esempio di teoria organizzata su un problema centrale", in F. Calascibetta e E. Torracca (eds.): *Atti II Congr. Naz. Storia e Fond. della Chimica*, Acc. Naz. Sci., XL, V, 12, Roma, 1987, 315-326.

5. Infatti mai Galilei ha voluto spiegare la realtà con quelle idee basilari che poi Newton utilizzerà (forza-causa, principi assiomatici, spazio e tempo assoluto, metafisica). M. Clavelin: *La Philosophie naturelle de Galilée*, Albin Michel, Paris, 1996.

6. E' famosa l'opera di H. Butterfield: *The Origins of Modern Science: 1300-1800*, Bell, London, 1949, che ha un capitolo per la chimica intitolato "The postponed revolution".

7. J.-L. Lagrange: "Solutions analytiques de quelques problèmes sur les pyramides triangulaires", *Nouv. Mémoires Acad. Berlin*, 1773.

8. H. Guerlac: "Quantification in Chemistry", *ISIS*, 52 (1961) 194-214, pp. 193-4. L'idea che la scienza più avanzata è quella più matematizzata era stata consolidata da Kant; vedi F. Gregory: "Romantic Kantianism and the end of the Newtonian dream in Chemistry", *Arch. Int. Hist. Sci.*, 34 (1984) 108-134.

9. M.P. Crosland: *Historical Studies in the Language of Chemistry*, Harvard U.P., Cambridge, 1962.

I rapporti della chimica con le altre teorie scientifiche

nitore (metafisico) di Newton e di Cartesio, la nuova chimica ha risposto con l'assenza completa della geometria; o, casomai, riducendo lo spazio a quello della zona del tavolo del laboratorio dove avvengono le reazioni chimiche (o a quello chiuso dalle provette).

Se tutto ciò non dovesse risultare abbastanza convincente per sostenere che la nascita della nuova chimica fu un evento scientificamente rivoluzionario, notiamo allora che con essa ci fu un cambiamento radicale nella stessa maniera di ragionare dello scienziato. Infatti la nuova chimica era una ribellione alla maniera della fisica dominante di ragionare deduttivamente da affermazioni apodittiche; la teoria chimica invece ragionava secondo il metodo induttivo, rivolto a cercare qualcosa che non si sa se esiste, e purtuttavia inventare un metodo scientifico per determinarlo¹⁰. Come conseguenza, questo metodo principia da affermazioni contingenti, cioè affermazioni doppiamente negate che non possono essere tradotte in positive, per mancanza di evidenza sperimentale di queste ultime (come è quella citata in precedenza; oppure la frase di Lavoisier: la "impossibilità di isolare la nomenclatura dalla scienza e la scienza dalla nomenclatura"). Con esse si ragiona in una maniera del tutto diversa da quella della logica classica¹¹.

Più in generale, la chimica nuova portava a compimento quella rivoluzione scientifica, rispetto alla filosofia di Aristotele, che Galilei aveva iniziato con grande impulso; rivoluzione che però poi dopo aveva subito una battuta d'arresto con Newton, il quale tornò ai principi apodittici, alla organizzazione deduttiva della teoria alla logica classica, alle forze-cause, alle qualità occulte (gravitazione). Egli era stato criticato da Leibniz per questi motivi; ma i risultati strabilianti della sua meccanica celeste avevano tacitato ogni critica.

Tutte le suddette variazioni radicali e tutti gli aspetti scientifici connessi con la teoria chimica (incluse la metodologia e la logica), sottolineano che questa nascita non costituì una regressione ad uno stadio pre-scientifico — così come molti fisici intendono e sembra quasi che anche Kuhn sostenga, quando parla di scienze non mature¹² -, ma è stata una alternativa completa alla teorizzazione scientifica newtoniana. Siamo quindi giunti ad affermare con precisione che prima del 1900 è esistita una teoria scientifica che era alternativa al paradigma newtoniano: la chimica.

3. La riqualificazione della scienza originata dalla chimica.

Questa rivoluzione ha avuto conseguenze anche al di fuori della chimica. Infatti si possono indicare molti casi in cui la teoria chimica, nonostante il perdurante dominio culturale della meccanica newtoniana, ha realizzato l'obiettivo del "programma giacobino" di indirizzare la ricerca scientifica in opposizione all'analisi e alla meccanica newtoniana.

Non starò a ricordare, perché è troppo facile, la biologia, che poi dalla chimica ha ricevuto la prima fondazione scientifica mediante la chimica organica. E nemmeno la medicina, che con la chimica è diventata una scienza basata su dei processi sperimentali (mentre fu la dominante teoria degli infinitesimi che ispirò Hahnemann a concepire la medicina omeopatica basandola su dosi "infinitesimali" degli agenti curativi¹³). Troppo grande e troppo chiara è stata l'importanza culturale della chimica in questi casi per poterla riassumere qui. Non lo farò anche perché (secondo un diffuso pregiudizio) quelle scienze (biologia e medicina), potrebbero essere considerate a quel tempo immature a paragone con la fisica.

Allora consideriamo quanto la chimica ha influito sulla fisica e sulla matematica, le scienze "dure". Citerò i casi di mia conoscenza, ma credo che ce ne siano vari altri.

1) Nel 1797 l'italiano Mascheroni concepì una rivoluzione stupefacente nella millenaria geometria euclidea, cioè nella teoria che da millenni era stata considerata il fondamento, assolutamente certo, anche metafisico della conoscenza, l'espressione stessa della Verità¹⁴. Gli strumenti base di quella teoria (riga e compasso), quelli che sono capaci di ricavare ogni concetto geometrico (mediante il disegno) e ogni teorema (mediante le costruzioni), in realtà potevano essere scomposti per ottenere gli stessi risultati col solo compasso (da qui il titolo dell'opera); giusto così come Lavoisier aveva scomposto l'elemento che da millenni si riteneva primordiale, l'acqua. E' nella prefazione della sua opera che Mascheroni dichiarò di aver ricevuto dalla chimica la ispirazione per la sua scomposizione¹⁵. La novità geometrica fu così grande che Mascheroni fu chiamato per illustrarla a Parigi, il centro della rivoluzione scientifica del tempo. Da questa novità iniziò la crisi della geometria euclidea; il distacco di questa teoria dalla metafisica di riga e compasso spianò la strada alla nascita, alcuni decenni dopo, della geometria non euclidea di Lobachevsky, il quale la fondò su una operazione diversa (quella di taglio, o sezione).

10. La critica spietata di Lavoisier contro la maniera "razionale" di organizzare una teoria scientifica ha un corrispettivo tra i fisici con L. Carnot; il quale, alla fine della sua prima opera di meccanica (*Essai sur les machines en général*, Defay, Dijon, 1782, pp. 102-103) e all'inizio della seconda (*Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement*, Crapelet, Paris, 1803, pp. xiii-xvii), distingue nettamente due maniere di organizzare una teoria, delle quali la seconda è detta "sperimentale".

11. Su questo punto rimando ad un alto mio lavoro: "La maniera di ragionare di Lavoisier, Dalton ed Avogadro durante la nascita della teoria chimica", *Rend. Acc. Naz. delle Scienze detta dei XL, Memorie di Sci. Fisiche e Nat.*, ser. V, 31, pt. II, tomo II, 2007, 189-201.

12. T.S. Kuhn: *La Tensione Essenziale*, Einaudi Torino, 1985.

13. S. Hahnemann: *L'Organon della medicina razionale*, 1810.

14. A. Seidenberg: "The Ritual Origin of Geometry", *Arch. Hist. Ex. Sci.*, 1 (1962) 488-527.

15. L. Mascheroni: *Geometria del compasso*, Pavia, 1797.

2) Nel 1797 Lazare Carnot pubblicò un libro famoso, tradotto in molte lingue, compresi l'inglese e il russo¹⁶. In quel tempo il problema cruciale era di comprendere gli infinitesimi, perché erano concepiti in maniera metafisica (o al più come numeri diversi da zero, ma nello stesso tempo diversi da ogni numero conosciuto). Carnot risolse questo problema perché concepì gli infinitesimi allo stesso modo con cui i chimici concepivano gli indivisibili della materia: variabili ausiliarie della teoria con le quali operare efficacemente sulla realtà; con ciò ricondusse l'analisi infinitesimale ad un calcolo solo operativo¹⁷. Anche il motto all'inizio del primo manoscritto di Carnot esprime che pure l'analisi infinitesimale deve essere fondata su una lingua ben fatta, proprio come dichiarò Lavoisier per la chimica.

3) Lo stesso Lazare Carnot rifondò tutta la geometria con un metodo originale. Esso era basato sulla compilazione di una tavola delle correlazioni tra gli elementi di una figura e quelli di tutte le figure ottenute mediante spostamenti infinitesimi dalla figura originale¹⁸. In generale, il metodo delle tavole era tipico della tradizione chimica¹⁹. Inoltre si ricordi che la fortuna della tabella di Mendelejeff è legata in gran parte all'idea proutiana di un'unica forma elementare di materia, dalla cui accumulazione risulta la serie degli elementi.

4) Troppo lungo sarebbe discutere della interazione tra la chimica e la fisica a proposito delle leggi dei gas. Mi limito ad alcune note. Oggi non si ricorda che fino al 1850 circa era dominante la schematizzazione di Newton della materia come composta da atomi che erano perfettamente duri; tali cioè che erano indeformabili ad un urto comunque violento e dopo uno scontro frontale andavano "in compagnia". È chiaro che con questo tipo di corpo ideale i fenomeni dei gas erano molto poco interessanti per i fisici della meccanica dei corpi celesti e furono lasciati ai chimici, che avevano buoni motivi per studiarli (transizioni di fase, ecc.).

Qui la teoria dei gas era iniziata correttamente con la legge del chimico Boyle e del biologo Mariotte. Poi però i fisici che se ne occuparono (fino a Laplace e Poisson) lo fecero seguendo anche l'altra idea di Newton, di concepire le tante molecole come fisse (solo verso la metà del secolo prevalse l'idea di molecole elastiche, urtanti tra loro e con le pareti del contenitore²⁰) e collegate tra loro da forze centrali, con potenze diverse dell'inverso del raggio; queste idee erano un presupposto di tipo metafisico sulla realtà (giusta l'accusa di Venel ai fisici di non capire la realtà); e di fatto ha ritardato e deviato la teoria dei gas. Dopo Boyle e Mariotte il miglior contributo a quelle leggi venne dal chimico Gay-Lussac. Chi poi ha dato per primo la equazione di stato dei gas perfetti è stato un fisico, S. Carnot²¹, ma molto vicino alla chimica sia per le amicizie scientifiche (Clément-Desormes), sia per aver cambiato all'ultimo momento, nel titolo del suo libro, la parola "chaleur" con "feu", tipica dei chimici²².

5) Nel Settecento la teoria dei fenomeni termici era comune a fisici e chimici. Lavoisier e Laplace scrissero assieme un'opera sull'argomento²³. Un fisico che ebbe grandi successi matematici in questo campo, Fourier, nella prefazione del suo libro concluse i suoi quindici anni di studi dichiarando che i fenomeni termici erano irriducibili a quella teoria meccanica che in quel tempo monopolizzava tutta la fisica²⁴. S. Carnot, che poi produsse gran parte della termodinamica, non aveva ben chiari i confini tra la chimica e la fisica; quando cercò di calcolare nella pratica il rendimento di una macchina termica, egli incluse il processo di combustione nel ciclo di trasformazioni²⁵.

6) La distinzione tra chimica e fisica sui gas avvenne solo quando venne chiarita la teoria termodinamica (ca. 1851) e quando poi la sperimentazione diventò capace di distinguere i gas reali dai gas ideali (ca. 1858). La termodinamica in effetti era nata come teoria quando si era rinunciato definitivamente a seguire l'atteggiamento dei fisici dominanti (descrizione delle traiettorie, punto di vista analitico, equazioni differenziali) per seguire l'atteggiamen-

16. L. Carnot: *Réflexions sur la métaphysique du calcul infinitesimal*, Duprat, 1797. Per le varie traduzioni ed edizioni cfr. C.C. Gillispie: *Lazare Carnot Savant*, Princeton U.P., Princeton, 1971, p. 348. In questo libro è ristampato anastaticamente il primo manoscritto di L. Carnot sull'analisi.

17. A. Drago: "Verso la conoscenza dei fondamenti della matematica: l'analisi infinitesimale di Lazare Carnot" in L. Magnani (ed.): *Conoscenza e matematica*, Marcos y Marcos, Milano, 1991, 427-442, 441, nota 36. Si noti in più che nella nota a pag. 18 della prima edizione Carnot cita proprio il problema della divisibilità della materia in atomi, sia pure per distinguere il suo lavoro da questo tipo di questioni.

18. L. Carnot: *Géométrie de position*, Duprat, Paris, 1803. Si vedano anche S. Cilenia e A. Drago: "Conoscenza ponendo un problema: evidenza di una filiazione scientifica di Lobacevskij da L. Carnot", in L. Magnani: op. cit., e L. Boiano e A. Drago: "La geometria di Lazare Carnot: Rinascita e potenziamento del metodo sintetico", *Atti della Fondazione Vasco Ronchi*, 57 (2002) 97-122.

19. F. Dagognet: *Il linguaggio della chimica*, Teoria, Roma, 1988.

20. Si veda ad es. W.L. Scott: *The Conflict between Atomism and Conservation Laws, 1644-1860*, Elsevier, New York, 1970.

21. A. Drago O. Vitiello: "S. Carnot e le leggi dei gas", in F. Bevilacqua (ed.): *Atti VIII Congr. Naz. St. Fisica*, Padova, 1986, 167-173.

22. S. Carnot: *Réflexions sur la puissance motrice du feu*, Bachelier, Paris, 1824 (ed. critica a cura di R. Fox, Vrin, 1978, v. nota al testo originale del titolo). Sui rapporti tra S. Carnot e la chimica si veda P. Lervig: "Sadi Carnot and the Steam Engine", *British Journal of History of Science*, 18 (1985) 147-196.

23. A.L. Lavoisier e P.S. Laplace: *Mémoire sur la chaleur*, Paris, 1780.

24. C. Fourier: *Théorie analytique de la chaleur*, Paris, 1822, Discorso preliminare.

25. S. Carnot, op. cit., 114ss.

I rapporti della chimica con le altre teorie scientifiche

to dei chimici (descrizione dei processi, punto di vista globalistico sul fenomeno studiato, matematica elementare). Questo atteggiamento fu un grande contributo concettuale della chimica alla nascita della termodinamica; e, nella misura in cui la termodinamica (come diceva Einstein) è una teoria fondamentale perché è rimasta la stessa durante la crisi della fisica teorica dei primi del 1900, fu un grande contributo a tutta la fisica teorica.

7) La chimica, attraverso la cristallografia (1786), ha usato la matematica delle simmetrie prima della stessa teoria matematica (Galois, 1834) e poi della fisica (Jacobi, 1873)²⁶. La chimica organica nacque (1865) ponendo come proprietà fondamentale la simmetria ciclica di ogni sua molecola²⁷. Dopo un secolo, dagli anni '60 la matematica delle simmetrie ha soppiantato quella newtoniana delle equazioni differenziali alla base delle teorie fisiche più avanzate²⁸.

8) Come dice il più autorevole studioso di Faraday, Percy Williams, "Faraday fu un chimico e [...] non applicò la sua teoria del campo all'elettrochimica"; ma, all'inverso, fu la sua scoperta dell'inefficacia dell'azione a distanza in elettrochimica a suggerirgli le linee di forza elettrostatiche²⁹.

9) E' ben noto che la descrizione degli elementi data dalla chimica, e in particolare dalla tabella di Mendelejeff (1868), anticipò quasi perfettamente gli essenziali risultati delle successive tecniche di indagine fisica sulle molecole e sugli atomi (spettroscopia, ecc.). Inoltre bisognerebbe ricordare anche la radiochimica, nata nella chimica e poi inglobata dalla fisica.

10) Nell'Ottocento la teoria meccanica si espandeva con nuove tecniche (tensori dello sforzo, ecc.) ma non produceva nuove teorie (l'elettromagnetismo nacque attraverso uno schema teorico meccanicistico, i vortici, che però fu abbandonato subito dopo la nascita); invece la giovane teoria termodinamica si affermò come potente alternativa teorica: associandosi alla chimica nacque la chimica-fisica (1878), che poi ha preso un grande sviluppo per opera di un chimico (Ostwald). E' sulla base di queste teorie che molti fisici e chimici (Ostwald per primo) hanno potuto contrastare la egemonia teorica e filosofica del meccanicismo e così anticipare la crisi che questa teoria ebbe nel del 1900.

11) Per un secolo la teoria chimica è stata la teoria esemplare per il suo teorizzare basandosi non su affermazioni di principio ma su un problema (quanti e quali sono gli indivisibili della materia?). Questo modo di organizzare una teoria era alternativo alla tradizione millenaria (iniziata da Euclide e da Aristotele e poi ripetuta da Newton) di organizzare una teoria deduttivamente da principi astratti. Assieme e dopo la chimica, anche le geometrie di Monge e di L. Carnot, le analisi di Lagrange e di L. Carnot, le meccaniche di L. Carnot e di Lagrange, la termodinamica di S. Carnot sono state formulate in questo modo alternativo.

12) La teoria fisica è nata e si è sviluppata basandosi sul concetto di spazio (e di tempo) anche per ricollegarsi (attraverso la geometria analitica) alla millenaria esperienza scientifica della geometria. In realtà la geometria dà una "superintuizione" della realtà: fa intuire e quindi fa considerare come esistenti il punto all'infinito di due rette parallele, il punto unico di incrocio di due linee, il punto unico di tangenza, la totalità dei punti dentro una figura chiusa, ecc.; e quindi fa includere nei nostri concetti l'infinito in atto (della precisione assoluta o delle totalità completate)³⁰. Tra le varie teorie che hanno rifiutato la geometria (chimica, meccanica di Lagrange, termodinamica, teoria della computabilità, teoria dell'informazione, matrice S, ecc.) la chimica è stata la prima a farlo attraverso la rivoluzione di Lavoisier. La stessa cosa si può dire per il concetto di tempo continuo nelle teorie scientifiche. Ancora una volta aveva ragione Venel ad affermare che i chimici "non sono curiosi [...] dei romanzi fisici".

13. La chimica è stata la teoria esemplare per aver utilizzato solo i numeri razionali. Anche la termodinamica è nata (1824) con S. Carnot senza equazioni differenziali, e così è stata formulata definitivamente (1851) da Clausius e da Kelvin³¹. Solo nel 1909 Carathéodory è riuscito a riformularla con una matematica simile a quella della meccanica introducendo le equazioni differenziali; l'ha anche organizzata deduttivamente da alcuni principi astratti (tanto che è stata la prima formulazione assiomatica della fisica)³². I fisici a lungo hanno considerato questa formulazione come il definitivo superamento della "immatura" (o "ingegneristica") teoria ottocentesca³³. In realtà oggi questo atteggiamento

26. Per lo meno questa è la versione tradizionale della sequenza storica: F.M. Jaeger: *Lectures on the Principle of Symmetry*, Elsevier, New York, 1917.

27. A. Kekulé: "Sur la constitution des substances aromatiques", *Bull. Soc. chim.* Paris, 1865.

28. A.O. Barut: *Geometry and Physics*, Bibliopolis, Napoli, 1989, app. B, 49-72.

29. P. Williams: "Should Philosophers be allowed to write History?", *Br. J. Phil. Sci.*, **26** (1975) 241-253, p. 251.

30. L. Brunschvicg: *Les étapes de la philosophie mathématique*, Gauthier-Villars, Paris, 1913, 123; A. Drago: "How the mathematical concept of infinity matters to theoretical physics?" in A. Diaz, J. Echeverria, A. Ibarra (eds.): op. cit., 141-146.

31. I quali purtuttavia cambiarono la iniziale organizzazione, basata su un problema, in una organizzazione deduttiva, derivata da principi astratti.

32. C. Carathéodory: "Untersuchungen über die Grundlagen der Thermodynamik", *Math. Ann.* 67 (1909), pag. 355 (tr. ingl. *The second law of Thermodynamics*, a cura di J. Kestin, Hutchinson (ed.), Strudsburg, 1976). Per una esposizione chiara della sua tecnica si veda I.N. Sneddon: *Elements of Partial Differential Equations*, McGraw-Hill, 1957, 1-42. Per la storia si può vedere A. Drago e O. Vitiello: "Storia dell'introduzione della matematica costruttiva nella termodinamica classica", in M. Galuzzi et alii (eds.): *Giornate di storia della matematica*, Editel, Cosenza, 1991, 77-103.

33. M. Born: "Kritische Betrachtungen sur Traditionelle Darstellung der Thermodynamik", *Phys. Zeit.*, **22** (1921) 218-224, 249-254, 282-286.

non è più sostenibile³⁴; piuttosto, il chimico-fisico Broensted ha dato una nuova formulazione, che riparte da un concetto originario di S. Carnot (già sottolineato da Ostwald, ma senza essere ascoltato dai fisici): il calore a temperatura costante; che di fatto è la moderna entropia; e con ciò Broensted ha messo in luce una struttura concettuale che i fisici dell'Ottocento avevano oscurato. Anche in questa formulazione la matematica dei suoi fondamenti è quella elementare³⁵. Perciò aveva ragione Venel a dire che i chimici fanno bene a "non essere curiosi dell'infinito".

4. Un caso particolarmente importante: il terzo principio della termodinamica.

Abbiamo visto che anche la scienza altamente matematizzata ha dovuto imparare dalla chimica; la quale ha fornito apporti non laterali, ma fondazionali tra i più importanti.

A riprova di ciò, esaminerò un ultimo caso, che è particolarmente significativo, sia perché è una parte importante di una teoria fisica, sia perché racchiude in sé tutta la problematica dei fondamenti di una teoria scientifica: il terzo principio della termodinamica.

Iniziamo notando che quel principio fu suggerito dallo studio di fenomeni chimici e da uno scienziato che lavorò sia in chimica che in termodinamica: Nernst. Poi invece, il principio è diventato una affermazione della sola teoria fisica, mentre il suo uso in chimica è visto come un'applicazione. In questo senso esso è un caso esemplare di interazione-separazione tra la chimica e la fisica; e causa di ciò, nonostante esso sia nato un secolo fa, la sua storia è ancora tutta da fare, a parere di uno dei massimi storici³⁶.

Inoltre notiamo che tuttora questo principio ha diverse versioni, fino alla negazione del suo status di principio. Truesdell infatti non lo include mai nei suoi testi sulla termodinamica³⁷. Fowler e Stern hanno scritto: "Perciò raggiungiamo la cruda conclusione che il teorema del calore di Nernst, applicato rigorosamente può essere vero o no, ma è sempre irrilevante ed inutile"³⁸.

Tra le tante versioni ricordiamo le seguenti:

"L'entropia di un materiale condensato, chimicamente omogeneo, è nulla allo zero della temperatura assoluta"³⁹.

" $S = 0$ per reazioni di fase solida e a $T = 0$ "⁴⁰.

"E' impossibile raggiungere $T = 0$ con un numero finito di processi"⁴¹.

"Nessun processo finito può raggiungere lo zero assolute"⁴².

"Per la temperature che tende a zero, la grandezza cambiamento di entropia in ogni processo reversibile tende a zero"⁴³.

La prima affermazione: per $T = 0$, $S = 0$, è chiaramente un nonsenso dal punto di vista operativo; infatti $S = 0$ può essere solo approssimato, mai raggiunto. La affermazione più ripetuta è l'ultima: " $\lim S = 0$ per $T \rightarrow 0$ "⁴⁴; ma, se è intesa nella matematica che si insegna all'università non esprime l'idea del principio; che vuole dire una approssimazione che non raggiunge il limite. Quella matematica è risultata dalla rifondazione "rigorosa" compiuta da Cauchy, Dedekind e Weierstrass (1820-1870) mediante la ben nota definizione del limite mediante una serie di approssimazioni ε - δ convergenti, la quale, per definizione, raggiunge sempre il suo limite con assoluta precisione. Perciò la matematica "rigorosa" non può esprimere la irraggiungibilità termodinamica dello zero assoluto di S . La formula precedente in realtà è una regola mnemonica.

Recentemente la analisi non standard ha rivalutato pienamente gli antichi infinitesimi⁴⁵. Essa include, oltre ai numeri reali, i numeri che tendono a zero (= gli infinitesimi); pertanto manca del concetto di limite. Perciò anch'essa, come la matematica rigorosa, non ha modo di rappresentare una irraggiungibilità.

Dal 1967 è stato dimostrato che, se si usa solo l'infinito potenziale (cioè solo il principio di induzione completa e non l'assioma di Zermelo o simili) si ottiene una matematica ben sviluppata fino ai concetti più avanzati⁴⁶. In essa il

34. P.T. Landsberg: "Born's Centenary", *Am. J. Phys.*, (1983) 842-845.

35. A. Drago e O. Vitiello: "La formulazione di Broensted della termodinamica completata con il metodo originario di Sadi Carnot", *Rend. Acc. Sci XL, 110, 16, pt II*, (1992), 391-396.

36. E. N. Hiebert: "Reflections on the origin and verification of the Third Law of Thermodynamics", in K. Martinas et alii (eds.): *Thermodynamics: History and Philosophy. Facts, Trends, Debates*, World Scientific, Singapore, 1991, 90-138.

37. C. Truesdell: *Rational Thermodynamics*, McGraw Hill, 1976; C. Truesdell and S. Baratha: *Classical Thermodynamics as a Theory of Heat Engines*, Springer, Berlin, 1977.

38. R. H. Fowler and T.E. Stern: "Statistical Mechanics", *Rev. Mod. Phys.*, **4** (1932), 635-722.

39. M. Planck: *Lecons de Thermodynamique*, Hermann, Paris, 1913, 289-308.

40. W.H. Crophe: "Walter Nernst and the Last Law", *J. Chem. Ed.*, **64** (1987) 3-8, p. 6.

41. J. Wilks: *The Third Law of Thermodynamics*, Oxford, 1981, p. 119.

42. B. Pippard: *The Elements of Classical Thermodynamics*, Cambridge, 1966.

43. Ibidem.

44. J. Wilks: op. cit., p. 32.

45. A. Robinson: *Non-Standard Analysis*, North-Holland, Amsterdam, 1960.

46. E. Bishop: *Foundations of Constructive Mathematics*, McGraw-Hill, New York, 1967. Per una introduzione si veda A. Drago e P. de Martino: "Introduzione alla matematica costruttiva", *Rend. Accad. Sci. Fis. Mat. Napoli (4)* **69** (2002), 37-49.

I rapporti della chimica con le altre teorie scientifiche

limite è definito da una serie di approssimazioni che possono essere sempre migliorate ma che solo in casi particolari arrivano ad un punto limite esatto. Perché in generale non si può decidere mediante un algoritmo finito se una variabile è esattamente uguale a zero; quindi anche $S = 0$, proprio così come dicono la terza e la quarta delle precedenti versioni del principio, è irraggiungibile con mezzi operativi. Allora questa matematica è ben adeguata a rappresentare il terzo principio.

Questo solo fatto basta per segnare un divario incolmabile tra la matematica semplice di questa legge con quella sofisticata che ha sempre dominato la fisica teorica attraverso la teoria meccanica. Una volta che questo fatto sia acquisito, appare chiaro che il terzo principio è essenzialmente un vincolo sul rapporto fisica-matematica: *tutte le variabili fondamentali della termodinamica sono positive e diverse da zero*. Ma allora questo principio, preconstituendo la matematica di tutta la teoria successiva, dovrebbe essere posto non come terzo, ma come primo principio. E infatti con la matematica costruttiva molti concetti si chiariscono: per primo quello di processo reversibile, che oggi i testi definiscono in svariate maniere⁴⁷; e così il contributo teorico di S. Carnot, che sostanzialmente è stato quello di integrare non Q , che non è funzione uniformemente continua, ma Q/T , che lo è (come richiede la operazione di integrazione nella matematica costruttiva).

Inoltre, l'affermazione del terzo principio include negazioni e impossibilità. Si può dimostrare che questo fatto è connesso con la logica non classica, quella usata nelle teorie basate su un problema fondamentale⁴⁸. Se definiamo l'entropia come disordine, allora possiamo ben dire che una versione intuitiva ma essenziale del terzo principio è "il disordine non può essere mai annullato", una frase doppiamente negata che non può essere dimostrata equivalente alla corrispondente positiva: "il disordine c'è sempre", perché questa frase è indecidibile in generale⁴⁹. Quindi questa frase può ben iniziare una teoria che sia organizzata non in maniera deduttiva, ma per risolvere un problema (conversione del calore in lavoro; o minimizzazione del disordine).

In conclusione, noi vediamo che attraverso Nernst, un fisico con atteggiamento chimico, la chimica ha fornito alla fisica un principio molto importante, sfuggito a ben 80 anni di ricerca dei fisici sui fondamenti della termodinamica. Per di più notiamo che questo principio è stato sempre una spina nel fianco della teoria fisica, nella misura in cui ha riproposto quelle scelte fondamentali, matematica costruttiva e organizzazione problematica, con le quali S. Carnot aveva fatto nascere la termodinamica, ma che erano state oscurate dal dominio culturale del meccanicismo dei fisici e dalla formulazione di tipo deduttivo data da Kelvin e Clausius alla termodinamica. Esso ha manifestato uno scontro di matematiche: la meccanica ha usato in modo essenziale la matematica avanzatissima delle equazioni differenziali, la quale però rappresentare fenomeni che sono meno universali di quelli chimico-fisici, rappresentati dalla matematica molto semplice di questo principio.

E anche in questo Venel aveva ragione ad accusare la fisica "di confondere nozioni astratte con verità di fatto e, di conseguenza, di aver frainteso la natura". Per questi motivi era giusto allora pensare che "esiste una chimica veramente filosofica, una chimica ragionata, profonda, trascendente" i singoli particolari.

5. L'importanza teorica della chimica classica è stata svalutata dalla "nuova storia della scienza"

Fino a qualche decennio fa nell'ambito scientifico era ben chiaro che la chimica aveva compiuto una rivoluzione scientifica, anche se non si sapeva precisare questo concetto.

Ma la crescita della storia della scienza, da storia solo descrittiva a storia anche interpretativa, cioè la cosiddetta "nuova storiografia", ha svalutato la chimica e la sua evoluzione storica. Secondo Koyré la scienza moderna è nata in Occidente perché ha introdotto quel concetto che i Greci pensavano proibito, l'infinito, in quanto appartenente essenzialmente agli dei⁵⁰; è chiaro che la chimica invece è legata al finito. Inoltre le categorie con cui Koyré ha interpretato gli eventi storici da lui studiati sono le "due frasi caratteristiche": "Dissoluzione del cosmo finito e geometrizzazione dello spazio"; di primo acchito è chiaro che la chimica non geometrizza alcunché e che a causa della sua "finitezza" sarebbe da porre nell'area culturale che va in dissoluzione. Di conseguenza questa storiografia ha manifestamente svalutato la chimica, perché la fa apparire come una teoria tipica del mondo antico, del tutto impreparata alla scienza moderna.

Poi l'altro storiografo importante, Thomas Kuhn, quello che ha fatto la sua fortuna nel proporre, in pieno '68, "le rivoluzioni scientifiche" delle quali egli dichiarava di saper indicare la "Struttura"⁵¹, ha scelto un profilo ambiguo ver-

47. A. Drago e O. Vitiello: "Storia..." op. cit.; A. Drago "Thermodynamics as an alternative Theory" in K. Martinas et alii (eds.): op. cit.
48. A. Drago: "Aspetti del rapporto chimica-matematica" in P. Antoniotti e L. Cerruti (eds.): Atti I Conv. Naz. Storia Chimica, Torino, 1985, 200-210; "A History of Relationships Chemistry-Mathematics", *Fres. J. Anal. Chem.*, **337** (1990), 220-224; erratum **340** (1991) 787.JG.J.

49. Per sequenze binarie è il contenuto del teorema di G.J. Chaitin: "Randomness and Mathematical Proof", *Scientific American* 232, No. 5 (May 1975), pp. 47-52; oppure: *Teoria algoritmica della complessità*, Giappichelli, Torino, 2006.

50. A. Koyré: *Dal mondo chiuso all'Universo infinito*, Feltrinelli, Milano, 1970.

51. T.S. Kuhn: *La struttura delle rivoluzioni scientifiche*, Einaudi, Torino, 1969 (di questo libro sono state vendute più di un milione di copie in tutto il mondo). Si veda anche P. Hoenigen-Heune: "Kuhn and the chemical revolution", in C. Cellucci (ed.): *Prospettive della Logica e della Filosofia della Scienza*, ETS, Pisa, 1998, 483-497.

so la chimica, secondo una sottile operazione culturale. Il suo libro dedica molto spazio alla chimica, solo alla meccanica di Newton ne dà di più⁵².

Di fatto, il suo libro non poteva ignorare che nella tradizione secolare molti scienziati hanno associato le parole “rivoluzione scientifica” alla chimica. Il lettore distratto crede che l’insistere di Kuhn sul passaggio storico Priestley-Lavoisier sia un omaggio a quella rivoluzione. Ma se si ragiona con le categorie dello stesso Kuhn (una rivoluzione cambia d’improvviso il paradigma nella mente di tutti gli scienziati), la sua posizione appare incoerente: se la nascita della chimica di Lavoisier fosse stata una vera rivoluzione, avrebbe dovuto causare un cambiamento di paradigma rispetto all’unico paradigma che c’era precedentemente, cioè quello newtoniano; ma allora, dopo la chimica, tutta la fisica (ottica fisica, elettromagnetismo, termodinamica, teoria dell’elasticità, ecc.) si sarebbe dovuta basare sul nuovo paradigma della chimica.

Egli può evitare questa contraddizione solo concependo la chimica, alla quale dedica tanto spazio, come una scienza del tutto separata dalla fisica; per cui, senza farlo apparire, lui traccia due storie parallele, una per la sola fisica e una per la sola chimica; tra le due ci sarebbe un compartimento stagno tale da resistere alle rivoluzioni scientifiche; solo così una rivoluzione sarebbe avvenuta in chimica senza influenzare la fisica. Ma c’è da chiedere: perché la sua illustrazione si è allargata alla storia della chimica, se questa è diversa da quella della fisica? Quale sarebbe la loro divisione radicale, a parte i pregiudizi? E poi, a legame tra le due non esiste forse la chimica-fisica, la spettroscopia atomica e la chimica quantistica?

Se poi guardiamo accuratamente che cosa Kuhn scrive a proposito della nascita della chimica, ci accorgiamo che nel cap. 9 p. 135 egli sostiene che la sua nascita è dovuta ad un imprecisato aspetto “sovrameccanico”; per cui c’è da concludere che, se non ci fossero stati i fisici (per di più quelli newtoniani!) a far avanzare la scienza, la chimica non sarebbe nata. Questo è un chiaro pregiudizio contrario ai fatti; ma soprattutto è da notare che ora tra fisica e chimica lui vede un legame: una influenza da parte della fisica verso la chimica (ma non viceversa).

Se invece concepiamo la chimica e la fisica come scienze non diverse, allora parte dello schema storiografico di Kuhn non è più valido; nel senso che ad un paradigma non segue immediatamente un altro (infatti lui non è riuscito a dimostrarlo in fisica, quando poi ha studiato la rivoluzione dei quanti⁵³); esso è solo un modello di teoria scientifica che domina su altri modelli, comunque presenti; così come è avvenuto nel tempo dopo Lavoisier (o dopo termodinamica). La rivoluzione chimica ha messo in discussione radicale il modello di teoria scientifica newtoniano; che però ha potuto sopravvivere quasi come prima proprio creando un pregiudizio di estraneità e di primordialità verso la chimica.

Se cerchiamo tra gli storici della chimica, purtroppo non troviamo alcuno che abbia saputo controbattere ad armi pari (cioè mediante una storia interpretativa) la storiografia dominante. La migliore opera che conosco è quella di Thakaray⁵⁴, che però si ferma proprio a prima di Lavoisier. Mentre invece ci sarebbe da rivendicare che la chimica classica, lungi da essere una teoria primitiva, ha sostenuto l’ingrato compito, durante il dominio culturale del newtonianesimo, di sostenere un nuovo modello di teoria scientifica, e precisamente l’opposto; che è stato riproposto solo dopo una generazione da nuove teorie matematiche e fisiche (geometria non euclidea di Lobacevsky, termodinamica di Sadi Carnot). Cosicché la rivoluzione della chimica – l’aver creato un pluralismo di modelli teorici -, è stata svalutata come devianza laterale.

Nella storia dell’Ottocento la chimica è stata la garanzia del pluralismo scientifico di fronte ad un progetto scientifico autoritario; che alla fine, nei primi del Novecento, è crollato proprio nella fisica, laddove si è finalmente instaurato un sano pluralismo teorico (classico/moderno, relatività/meccanica quantistica).

52. P. Cerreta e A. Drago: “La struttura interpretativa de “La Struttura delle Rivoluzioni Scientifiche” di T.S. Kuhn, rivelata dall’analisi dei suoi esempi storici”, in F. Bevilacqua (ed.): *Atti del X Congr. Naz. Storia Fisica*, Cagliari, 1989, 49-61.

53. T.S. Kuhn: *Alle origini della fisica contemporanea. La teoria del corpo nero e la discontinuità quantica (1978)*, Il Mulino, Bologna, 1980.

54. A. Thakaray: *Atomi e Forze*, Il Mulino, Bologna, 1979.

NÉ DURA NÉ SOFFICE: SULLA NATURA IBRIDA DEL METODO DELLA CHIMICA

Andrea Tontini

Dipartimento di scienze biomolecolari
Università degli Studi di Urbino “Carlo Bo”

1. Premessa

La scienza è un complesso di conoscenze ed esperienze che riveste grande importanza nel mondo contemporaneo (il fatto che il termine ricorra così spesso nella comunicazione ordinaria e mediatica ne è una spia) ed è per questo che ogni progetto educativo dovrebbe favorire una appropriata riflessione in materia. In verità, la nozione di scienza è tanto ampia quanto incerta e occorrerebbe piuttosto parlare delle *scienze* per evitare di essere generici, esaminando e confrontando metodi, scopi e limiti dei singoli settori di ricerca sperimentale. La mole di informazioni risultante da tale approccio sarebbe d'altra parte inutilmente vasta e particolareggiata. Personalmente ritengo che una discussione culturale sulla scienza non possa che partire dall'analisi separata dei saperi prodotti dalla fisica, dalla chimica e dalla biologia - vale a dire le tre principali discipline scientifiche - ed eventualmente astrarre dai risultati idee più globali di scienza. Verrebbero in tal modo rispettati innegabili presupposti storici ed esperienziali: di fatto esistono tre ceppi di lingue scientifiche, da ognuno dei quali è accomunata una delle tre principali comunità di ricercatori (sicché, tanto per fare un esempio, un chimico farmaceutico potrebbe senza fatica soverchia seguire i lavori di un congresso di chimica analitica o di spettrometria di massa, mentre presumibilmente troverebbe qualche difficoltà nell'affrontare un *paper* di astrofisica o di neurologia comparata; esempi analoghi potrebbero essere fatti per un fisico o per un biologo). Ciò non significa, beninteso, che fisica, chimica e biologia siano tradizioni conoscitive separate. La presenza di figure di scopritori e di teorizzatori significative in diversi ambiti scientifici, di uomini come Faraday, Cavendish, Pasteur, è attualmente impensabile e tuttavia, ieri come oggi, ciascuna branca scientifica progredisce anche per merito delle altre. Per esempio, la determinazione della struttura delle molecole è enormemente facilitata da dispositivi, quali un diffrattometro a raggi X o uno spettrometro di risonanza magnetica nucleare, basati su fenomeni originariamente e tuttora studiati dai fisici. D'altro canto, la costruzione delle apparecchiature sofisticate necessarie alle ricerche di questi ultimi (telescopi, calcolatori, ecc.) richiede materiali dotati di peculiari proprietà, i quali vengono progettati e sintetizzati dai chimici.

Nel corso del novecento, così come in questi primi anni del nuovo millennio, filosofi e artisti, uomini di cultura e di fede hanno dedicato non poca attenzione alla fisica e alla biologia. I motivi di tale interesse sono molteplici e sicuramente validi: non è questa la sede per discuterne. E' invece da segnalare, credo, la noncuranza da parte del mondo della cultura intorno alla 'scienza centrale', la chimica, nonostante che l'opera di intellettuali del calibro di un Primo Levi e, più recentemente, un Roald Hoffmann, potesse invitare qualcuno a indagare tale sfera di pensiero. Sta di fatto che, nella mentalità comune - mentalità di cui evidentemente partecipano anche umanisti e accademici - predomina l'idea che la chimica sia un affare essenzialmente tecnico-pratico, un'attività volta alla produzione di sostanze e materiali utili (e in certi casi anche potenzialmente pericolosi per la salute e l'ambiente) alla vita degli uomini. Il che è indubbiamente vero, sebbene non costituisca che una delle dimensioni della nostra scienza. Nel seguito dell'articolo andremo a identificare aspetti metodologici e teorici della chimica, allo scopo di segnalare l'originalità epistemologica e, se è possibile, destare curiosità e interesse verso quella che resta una delle più formidabili imprese conoscitive dell'intelletto umano.

2. Fisica, chimica e biologia: similarità e dissimilarità metodologiche

Come sappiamo, sia la fisica che la chimica sono basate su esperienze i cui dati, per lo più di natura *quantitativa*, vengono interpretati attraverso linguaggi formalizzati (in particolare lo sperimentatore chimico, sulla base di osservazioni sulle proprietà di elementi, composti o miscugli, illustra aspetti del loro comportamento in termini strutturali: vedi sotto, par. 4). Pertanto è generalmente accettato il posizionamento della chimica nell'ambito delle scienze dure (sebbene in effetti il linguaggio dei fisici, di tipo matematico, sia più raffinato e complesso del linguaggio usato per descrivere i processi molecolari). Ovvero potremmo dire che una ricerca chimica appare essenzialmente diversa, dal punto di vista metodologico, da una ricerca biologica: una ricerca biologica essendo di norma realizzata registrando la *presenza* o l'*assenza* di un evento - o fornendo una descrizione *semiquantitativa* del suo andamento - al variare di determinate condizioni¹.

E tuttavia le cose sono più articolate. Contrariamente a quanto accade nella costruzione del sapere fisico, infatti, sia

1. Le relazioni causali così accertate costituiscono vaste e complesse reti descrittive ed esplicative.

nelle scienze chimiche che in quelle biologiche i dati empirici servono a ordinare gli enti in categorie appropriate ad economizzare memoria, quali ad esempio

le classi uccelli e mammiferi [...] altamente predittive circa i loro membri: si pensa che un uccello abbia le penne, un mammifero il pelo, e così via, con alcune rare eccezioni. Tali gruppi in biologia sono detti fenetici, e in chimica i gas nobili o i metalli alcalini sono esempi di tali gruppi [...] Essi devono la loro esistenza a qualche regolarità sottostante, forse sconosciuta, della natura, che determina molte delle proprietà osservate negli enti².

A proposito della funzione decisiva che la classificazione ha avuto per lo sviluppo della scienza cui è dedicato questo contributo, rappresentano episodi significativi il rimodernamento lavoisieriano del linguaggio della chimica e la scoperta della legge periodica ad opera di Mendeleev³. Sappiamo inoltre che il raggruppamento dei composti organici in classi caratterizzate dalla presenza di uno o più gruppi funzionali (o più in generale, di frammenti o *moiety* strutturali) consente di ipotizzare, ed entro certi limiti prevedere, il comportamento chimico di tali sostanze e la realizzazione di nuove sintesi.

3. Elementi, composti, leggi chimiche: nascita e maturazione del pensiero chimico

L'impiego di metodi tassonomici in chimica e biologia consegue dal fatto che tali scienze studiano sistemi molto più complessi di quelli di cui si occupano i fisici. Esiste, per dirla con Villani,

un'ottica fisica incentrata sul "semplice" ed un'ottica chimica sulla "complessità". Da un punto di vista culturale e filosofico, la peculiarità del mondo chimico è quella di essere un mondo ricco qualitativamente: i suoi tipi d'enti (molecole e composti), milioni, sono tutti diversi gli uni dagli altri al punto da meritare un nome individuale. E' questa sua caratteristica che rende la chimica atta a spiegare tanto il complesso mondo microscopico inanimato, fatto d'oggetti diversi sotto tanti punti di vista qualitativi, quanto, l'ancora più complesso, mondo vivente. [...] Non è un caso,

insiste l'autore,

che la biologia [...] utilizzi molto di più la chimica che la fisica nelle sue spiegazioni. Quest'ultima, infatti, con la sua 'insistenza' sulle leggi universali coglie della realtà materiale gli aspetti (come l'energia o il movimento) che non necessitano di un'individuazione. La chimica, invece, e ancor più la biologia, è una scienza che dà un'importanza notevole, oltre che all'universale e al generale, alle entità individuali⁴.

Con "entità [chimiche] individuali" Villani si riferisce evidentemente⁵ a quei corpi semplici⁶, le sostanze pure, distinti in elementi e composti, studiando il comportamento delle quali la chimica, la cui definizione più essenziale è quella di scienza delle proprietà e delle trasformazioni degli enti materiali, ha potuto costruire un sapere teorico coerente e fecondo. Una tappa fondamentale di tale processo è stata la scoperta dell'ossigeno, dovuta a Lavoisier, che trasformò la chimica da scienza dei principi a scienza degli elementi⁷. Notiamo come lo scienziato fisico non si curi di sistemi quali gli elementi chimici, e neppure degli atomi che costituiscono (le molecole dei) vari elementi chimici; lo scopo della fisica, abbiamo detto, è individuare i principi e le leggi fondamentali che regolano gli svariati fenomeni naturali, pertanto il fisico studierà gli aspetti generali della struttura atomica. Conoscere le caratteristiche di ciascun tipo di

2. "Thus for example in biology, the classes birds and mammals are both convenient and also are highly predictive in what can be said about their members: a bird is expected to have feathers, a mammal to have fur, and so on, with some rare exceptions. Such groups in biology are said to be phenetic, and in chemistry the noble gases or the alkali metals are examples of such phenetic groups [...] owing their existence to some underlying, perhaps undiscovered, regularity of nature which determines many of the observed properties of the entities." [Sneath (2000, pp. 238-239);]

3. Cfr. Nye (1993, pp. 81-9).

4. Villani (2005a; p. 93), (2005b; p. 334).

5. Si confronti la citazione appena riportata con ciò che più concisamente afferma il *philosophizing chemist* F.A. Paneth:

"la chimica [...] probabilmente manterrà, finché continui a esistere una scienza chimica nel significato attuale del termine, una pluralità delle sue sostanze fondamentali in completo accordo con la dottrina del suo antico maestro, Dimitri Ivanovich Mendeleeff" [riportata in Scerri (2000, p. 61); traduzione mia].

6. La rappresentazione scientifica implica una diminuzione della complessità dei sistemi e dei processi materiali che trattenga solo quanto in essi è misurabile, geometrizzabile, modellabile. In tal modo, gli scienziati possono descrivere il mondo della natura (una descrizione che, per quanto stiamo dicendo, risulterà limitata ad alcuni aspetti di esso) impiegando un linguaggio denotativo. Cfr. Tontini (2003, pp.15-16).

7. Secondo la definizione standard, un elemento non può essere trasformato in una sostanza più semplice con gli ordinari mezzi chimici; microscopicamente esso è costituito da atomi aventi un numero identico di protoni nel proprio nucleo (Cfr. *The American Heritage Dictionary of the English Language: Fourth Edition*, 2000, <http://www.bartleby.com/61>, alla voce "element": "A substance composed of atoms having an identical number of protons in each nucleus. Elements cannot be reduced to simpler substances by normal chemical means".)

Né dura né soffice: sulla natura ibrida del metodo della chimica

atomo è invece un aiuto indispensabile per il chimico, dal momento che la natura e le differenze della reattività e delle proprietà macroscopiche dei vari elementi possono essere poste in relazione con le caratteristiche dei rispettivi sistemi atomici. Contrariamente alla chimica (e alla biologia), la scienza fisica percepisce e interpreta la natura come se essa non fosse composta da una molteplicità di sostanze individuali, ma analizza la natura in termini di sistemi. Un sistema (ad esempio un fascio di elettroni, una superficie elastica, un gas a comportamento praticamente ideale) è una porzione di materia dotata di poche caratteristiche costitutive. Data l'elementarità dei sistemi fisici, questi non sono interessanti per se stessi, per le loro intrinseche proprietà. La fisica è cioè tutta incentrata sulla trasformazione dei sistemi⁸, dal momento che quando i sistemi interagiscono scambiando energia essi subiscono cambiamenti di stato suscettibili di interpretazione matematica. Perché la conoscenza fisica si incrementi è necessario concepire esperimenti in cui determinati sistemi, trovandosi in condizioni particolarmente estreme, generino processi di sufficiente complessità e interesse. Notiamo che l'impegno economico, nonché di risorse umane, necessario per realizzare ricerche di questo tipo è ingente, poiché esse richiedono apparecchiature assai sofisticate, per esempio sincrotroni⁹. Mediamente, i progetti di ricerca nei settori chimici risultano più *low cost*, a causa della pluralità e della complessità degli enti (atomi/molecole nel piano microscopico, elementi/composti nel piano macroscopico) oggetto di studio; tali corpi, contrariamente a enti quali le particelle elementari, sono infatti in grado di subire trasformazioni scientificamente significative in condizioni sperimentali relativamente blande.

Tornando all'evoluzione storica del sapere chimico, l'esperienza dimostrò poi che gli elementi non possono essere fatti reagire tra loro indifferentemente; e che, se due elementi si combinano, lo fanno dando origine a un numero finito, un numero, in effetti, assai limitato, di composti: tra la fine del '700 e i primi anni del secolo successivo, il chimico francese Joseph Louis Proust stabilì una legge, detta delle proporzioni definite, secondo la quale in un composto chimico è costante il rapporto in peso fra gli elementi, a prescindere dall'origine del composto stesso. E' l'inizio del pensiero chimico moderno, il cui sviluppo culminerà nella teoria della struttura molecolare, su cui è tuttora incentrata la chimica. Oltre alla legge periodica e alla costruzione della configurazione elettronica degli atomi, il linguaggio chimico contemporaneo infatti presuppone - in modo paragonabile a ciò che avviene con l'impiego del linguaggio matematico in fisica - la teoria strutturale. L'isolamento di nuovi composti, siano questi sintetizzati in laboratorio o derivanti da materiali naturali, e la determinazione della loro struttura¹⁰ rappresenta un'operazione epistemica fondamentale della ricerca chimica, la formazione o conversione di composti chimici essendo espressa con equazioni di reazione, espressioni che rappresentano la trasformazione, logicamente ed empiricamente fondata, di una o più formule di struttura in un'altra o in altre formule di struttura. Su questa base l'attività dei ricercatori chimici crea quella che J. Schummer¹¹ definisce *chemical network*, rete i cui nodi, coincidenti con determinate sostanze pure, sono interconnessi da procedure sperimentali che permettono la trasformazione di una sostanza in un'altra. In parole povere, se per esempio facciamo reagire in condizioni ben determinate le sostanze pure A e B, otteniamo invariabilmente i composti C e D, aventi certe formule di struttura¹². Le formule di struttura esprimono dunque l'esistenza di una correlazione costante tra fatti empirici, e vanno considerate alla stregua di leggi¹³. Col termine "legge", infatti, intendiamo anzitutto, in ambito scientifico, una "affermazione che descrive una relazione che si osserva essere invariabile tra due o più fenomeni in tutti i casi in cui sono rispettate le condizioni specificate"¹⁴. Possono dunque costituire leggi scientifiche non solo "generalizzazioni basate sull'esperienza o su risultati coerenti"¹⁵ ma anche asserzioni relative a enti particolari e individuali: sulla scorta del filosofo della chimica H. Laitko è cioè possibile ammettere che ciascuna trasformazione

8. In biologia abbiamo in qualche modo l'opposto. Gli enti trattati dalle branche tradizionali della biologia (fisiologia, etologia, ecologia...) hanno spesso una grande stabilità morfologica (si pensi alla lentezza dell'evoluzione delle specie animali e vegetali) e funzionale (un organo alterato patologicamente non subisce una modificazione completa della sua struttura): il metodo di tali discipline sarà dunque sostanzialmente descrittivo. Nondimeno, le discipline dei processi fisiologici, patologici e genetici a livello subcellulare e molecolare adottano un discorso maggiormente teorico, che include concetti fisici e chimici.

9. Il problema dei costi della ricerca si presenta anche in biologia, ed è legato in tal caso alla enorme quantità di lavoro necessaria per descrivere sistemi di elevatissima complessità (si pensi al Progetto Genoma Umano).

10. Come sappiamo, a ogni sostanza pura è assegnabile, in base alla concordanza di dati ottenuti con diverse tecniche analitiche, una e una sola formula di struttura.

11. (1997).

12. Per degli esempi si sfogli un qualunque manuale di chimica.

13. In un recente lavoro (2009) ho esaminato i motivi per cui si debba ritenere che le formule chimiche di struttura costituiscono una conoscenza indiscutibile e i problemi che questo comporta per l'inquadramento epistemologico della scienza prevalente nella filosofia novecentesca.

14. Traduco l'accezione **12a** del termine "law" in *The American Heritage Dictionary of the English Language: Fourth Edition*, 2000, <http://www.bartleby.com/61>: "A statement describing a relationship observed to be invariable between or among phenomena for all cases in which the specified conditions are met".

15. Cfr. *ibid.*, accezione **12b**.

chimica rappresenta una legge chimica¹⁶.

4. Reattività chimica e concetti chimici

Potremmo a questo punto di nuovo stabilire un parallelismo tra epistemologia della fisica ed epistemologia della chimica. Le leggi fisiche sono espresse da relazioni matematiche fra grandezze misurabili. Tali espressioni fondamentali, ricavate dai risultati di opportune esperienze, non esauriscono la portata conoscitiva della fisica. Esse infatti

si limitano a descrivere i fenomeni senza darne le ragioni: ma una volta conosciuta la esistenza di un fenomeno e trovata la sua legge, è logico risalire alle cause. Allora lo scienziato abbandona l'osservazione sperimentale e comincia a formulare delle ipotesi, che coordina e sintetizza in **teorie**, escogitando ricerche ed esperienze per confermarle. In generale *una 'teoria' è la spiegazione dei fatti osservati e descritti nelle loro leggi, mediante un semplice modello, dotato di proprietà note e riferito a fenomeni più semplici*¹⁷.

Passando alla chimica: le sintesi di nuovi composti (da intendersi alla stregua di leggi scientifiche, vedi sopra), descritte nelle riviste specializzate - dove in genere vengono riportate le relative equazioni di reazione e protocolli sperimentali -, che costituiscono "una pratica che altera il mondo introducendovi nuovi materiali", "un'attività che non ha l'analogo nelle altre scienze"¹⁸, sono accompagnate dalla creazione ed elaborazione di concetti, i quali entrano a far parte delle rappresentazioni di cui ci serviamo per interpretare e comprendere eventi a livello molecolare. Tra questi abbiamo concetti derivanti dalla rappresentazione della struttura molecolare tramite modelli spaziali (ingombro sterico, tensione d'anello, isomeria conformazionale); concetti basati su generici principi di elettrologia (effetto induttivo, elettronegatività, nucleofilia); raffigurazioni schematiche di proprietà chimiche proprie di certe categorie di composti (aromaticità, tautomeria, delocalizzazione elettronica, iperconiugazione). Concetti come questi sono per lo più induttivamente ricavati dall'esistenza di determinate trasformazioni e da dati chimicofisici e di reattività. Come semplice¹⁹ esempio consideriamo la spiegazione della differenza di acidità fra l'acido acetico (CH_3COOH , $\text{pK}_a = 4.75$) e l'acido tricloroacetico (CF_3COOH , $\text{pK}_a = 0.70$). Secondo la teoria di Brønsted-Lowry in una reazione acido base un acido (HA) cede a una base (B) uno ione H^+ , trasformandosi nella base coniugata A^- ; se B è l'acqua, la forza dell'acido è quantificata dalla costante di acidità K_a , il rapporto fra il prodotto delle concentrazioni molari, all'equilibrio, di H^+ (che esiste in acqua come ione idronio solvatato, H_3O^+) e A^- , e la concentrazione molare dell'acido indissociato.

Evidentemente, la costante di acidità è tanto maggiore quanto più stabile è la specie A^- ; ora, come sappiamo, la formula di struttura della base coniugata dell'acido tricloroacetico differisce da quella dell'acido acetico unicamente per la sostituzione degli idrogeni in alfa al gruppo carbossile con atomi di cloro: al gruppo trifluorometile (CF_3^-) va dunque necessariamente attribuita una capacità elettroneattrattrice - confermata da numerosissime altre osservazioni sperimentali - grazie alla quale la carica negativa dell'anione carbossilato viene stabilizzata.

E' solo, insisto, grazie ai concetti chimici che possiamo immaginare, elaborare immagini congrue di un mondo, il mondo molecolare, a noi invisibile. Si consideri come, attraverso nozioni come quelle di ingombro sterico e di isomeria rotazionale, noi dotiamo una molecola di aspetti geometrici analoghi a quelli di certi oggetti macroscopici. Un esempio più articolato viene discusso in un recente articolo di W.M. Goodwin (2008), che affronta il ruolo esplicativo che nozioni come quelle di tensione d'anello e di iperconiugazione giocano nella chimica organica. L'autore sottolinea l'efficacia di spiegazioni (*accounts*) strutturali che correlano le differenze e di energia [di una trasformazione molecolare] alla struttura dei composti (o degli intermedi) implicati in essa.

16. Cfr. Van Brakel (2000, p. 25-26). Laddove però per legge scientifica intendessimo soltanto una proposizione a carattere generale od universale, converremmo che "la spiegazione chimica utilizza solo in misura minore il concetto di legge. Essendo, infatti, la spiegazione chimica legata alla 'composizione' degli oggetti, essa collega le loro proprietà (...) all'individuazione delle specie chimiche presenti sia nel piano macroscopico (elementi e composti) sia in quello microscopico (atomi e molecole) e alle loro trasformazioni (reazioni). Questo mondo pluralistico di milioni di individui si adatta ben poco alla trattazione per leggi, tipica degli 'universali' (tutti gli enti hanno la determinata proprietà e il determinato comportamento), ed è molto meglio trattabile nella ricerca delle caratteristiche 'generali' che permettono di raggruppare, e quindi concettualizzare, determinati ambiti. E' da questo modo di procedere che ne discende il numero esiguo, se non nullo, di leggi chimiche contrapposto al numero elevato di concetti chimici." [Villani (2006, p. 5)]

17. De Marco (1980, p. 10; grassetto e corsivo nell'originale).

18. Rosenfeld, Bhushan (2000, p. 203; traduzione mia).

19. L'analisi degli effetti di sostituenti e conformazionali e delle condizioni di reazione sull'andamento dei processi chimici costituisce un discorso talvolta assai complesso, basato anche su calcoli teorici: fra la miriade di pubblicazioni che potrebbero essere citate a questo riguardo si veda lo studio di C.G. Swain *et al.* (1975) sul ruolo del catione fenilico nella decomposizione di tetrafluoroborati di diazonio aromatici.

Queste spiegazioni strutturali passano per un gruppo limitato di concetti efficacemente applicabili²⁰. In particolare, la tensione fornisce una spiegazione strutturale della differenza dei calori di combustione di composti per altri versi simili, perciò misurando tali differenze è possibile quantificare l'importanza della tensione in un composto ciclico. Allorché tali misure termochimiche furono effettivamente eseguite, esse confermarono quella che era stata l'esperienza dei chimici organici che lavoravano con composti ciclici: (1) era molto difficile produrre anelli a tre o a quattro membri, (2) anelli a cinque e a sei membri erano facili da preparare e risultavano stabili, e (3) anelli più grandi non erano difficili da preparare ed erano stabili, ma erano prodotti con rese relativamente basse [...Tali] basse rese possono essere spiegate senza invocare la tensione d'anello. In sostanza, le estremità di lunghe catene hanno minore probabilità di incontrarsi, e la chiusura del ciclo compete con svariati altri possibili risultati²¹.

In definitiva, il sapere chimico non consiste solo in un insieme di equazioni di reazione e di descrizioni di composti presenti nei diversi corpi naturali, nei miscugli inorganici/organici. Il sapere chimico si articola su alcune fondamentali teorie (legge periodica, configurazione elettronica degli elementi, teoria strutturale) e si espande attraverso la produzione di modelli sempre più perfezionati dell'universo molecolare, il quale è sede di processi che stanno alla base di fenomeni macroscopici di fondamentale rilevanza in biologia, medicina, geologia ecc.

20. "The real force of the explanations in organic chemistry originates in the structural accounts, which relate the energy differences appealed to by the background theoretical model to the structures of the compounds (or intermediates) involved in a transformation. These structural accounts proceed through a limited set of robustly applicable concepts, such as the 'strain' and 'hyperconjugation' encountered in this paper" [Goodwin (2008, p. 125; traduzione mia)].

21. "Strain provides a structural account of the differences in the heat of combustion of otherwise analogous compounds, and so by measuring these differences you can quantify the significance of strain [sic] in a cyclic compound. When these thermochemical measurements were actually performed, they corroborated what had been the experience of organic chemists working with cyclic compounds: (1) it was difficult to produce three or four-membered rings, (2) Five and six-membered rings were easy to make and were stable, and (3) larger rings were not hard to make and they were stable, but they were produced in relatively low yields. (...) The low yields can be explained without invoking strain. Essentially, the ends of long chains are less likely to find one another, and ring closure competes with a lot of other possible outcomes" [*Ibid.*, pp. 124-125; traduzione mia)].

Bibliografia

- De Marco, A., *Fisica – ad uso dei Licei scientifici*, volume primo, Poseidonia 1980.
- Goodwin, W.M., "Structural formulas and explanation in organic chemistry", *Foundations of Chemistry* 2008, 10(2), 117-127.
- Nye, M.J., *From Chemical Philosophy to Theoretical Chemistry - Dynamics of Matter and Dynamics of Disciplines 1800-1950*, University of California Press 1993.
- Rosenfeld, R., Bhushan, N. "Chemical Synthesis - Complexity, Similarity, Natural Kinds, and the Evolution of a 'Logic'", in Bhushan, N., Rosenfeld, S. (eds.), *Of Minds and Molecules - New Philosophical Perspectives on Chemistry*, Oxford University Press 2000 (pp. 187-207).
- Scerri, E., "Realism, Reduction, and the 'Intermediate Position'", in Bhushan, N., Rosenfeld, S. (eds.), *Of Minds and Molecules - New Philosophical Perspectives on Chemistry*, Oxford University Press 2000 (pp. 51-72).
- Schummer, J., "Challenging Standard Distinctions between Science and Technology: The Case of Preparative Chemistry", *HYLE* 1997, 3, 81-94.
- Sneath, P.H.A., "Numerical Classification of the Chemical Elements and Its Relation to the Periodic System", *Foundations of Chemistry* 2000, 2(3), 237-263.
- Swain, C.G., Sheats, J.E., Harbison, K.G., "Evidence for Phenyl Cation as an Intermediate in Reactions of Benzenediazonium Salts in Solution", *Journal of the American Chemical Society* 1975, 97, 783-790.
- Tontini, A., "Linguaggio scientifico e scrittura poetica: riflessioni su porta, Caproni, Zanzotto", *Testuale* 2003, 34-35, pp.15-28.
- Tontini, A., "La formula chimica di struttura: un problema per l'epistemologia popperiana?", *Isonomia* 2008 (<http://www.uniurb.it/Filosofia/isonomia/2008tontini.pdf>).
- Van Brakel, J., *Philosophy of Chemistry - Between the Manifest and the Scientific Image*, Leuven University Press 2000.
- Villani, G., "Il concetto di sistema strutturato/organizzato in chimica e confronto con le altre discipline scientifiche", *La Chimica nella Scuola*, XXVII, 4 (2005) 88-97.
- Villani, G., "Sistema strutturato in chimica. Confronto con la fisica e la biologia", in Atti del XI Convegno Nazionale di Storia e Fondamenti della Chimica, Torino 2005, Accademia Nazionale delle Scienze, a cura di L Cerruti e F. Turco, pp 333-351.
- Villani, G., "La chimica: una scienza sperimentale con una fitta rete di concetti", *La Chimica nella Scuola* (2006), XXVIII (1), 4-7.
-

LA RICERCA DEI COMPONENTI ULTIMI DELLA MATERIA: L'APPROCCIO FILOSOFICO, QUELLO CHIMICO E QUELLO FISICO

Roberto Zingales

Dipartimento di Chimica Inorganica e Analitica *Stanislaio Cannizzaro*
Viale delle Scienze, Parco d'Orleans II, edificio 17 - 90128 Palermo
zinko@unipa.it

Il concetto di atomo è nato e si è sviluppato, nel corso di oltre due millenni, grazie ai contributi di filosofi, fisici e chimici, che lo hanno rielaborato secondo prospettive differenti, anche se con larghe e ripetute intersezioni. Esso è il risultato del tentativo di dar conto della composizione ultima della materia, per spiegare le proprietà degli oggetti materiali e le loro trasformazioni, sia quelle spontanee, che quelle indotte dall'uomo in maniera più o meno consapevole.

Non è possibile stabilire quando l'*homo sapiens* abbia iniziato a interrogarsi sulle origini del mondo e sulla composizione degli oggetti materiali, ma, all'inizio del VI secolo a.C., sulle sponde del mediterraneo orientale, le risposte mitologiche e metafisiche, ispirate dalla fantasia, cominciarono ad essere accantonate con ipotesi formulate, per quanto possibile, su basi razionali, che portassero a conclusioni confrontabili con la realtà dei fenomeni osservati. I primi filosofi scelsero il mondo intero come campo di indagine, studiando la Natura e i suoi fenomeni, per ricercarne le cause, nella speranza di riuscire a riprodurne le trasformazioni, secondo le proprie esigenze.

L'enorme quantità di esperienze e conoscenze, accumulate a seguito di questa attenta osservazione della Natura, rese necessaria la loro sistematizzazione e classificazione e, di conseguenza, lo sviluppo della capacità di astrazione e generalizzazione, che consentisse di individuare similitudini e diversità tra oggetti o fenomeni apparentemente differenti. Questa capacità, non solo portò ad individuare un ordine (*cosmos*), laddove prima era il caos di suoni, colori, sensazioni, ma fece sorgere il sospetto che, alla base di tutti i fenomeni, esistesse una realtà immanente, più fondamentale, che poteva essere rivelata soltanto attraverso un'analisi razionale.

Un principio unico o molti elementi?

I primi filosofi naturali scelsero un approccio concettualmente molto semplice, che oggi chiameremmo riduzionista, al problema dell'origine del mondo e della costituzione degli oggetti materiali. Nacquero le filosofie *moniste*, basate sull'ipotesi che tutto avesse origine da un principio primo (*archè*), unico e immutabile, che assumeva, caso per caso, forme e aspetti differenti, generando differenze *formali*, piuttosto che *sostanziali*, tra i diversi oggetti materiali.

Per meglio precisare la natura del principio unico, Talete e i suoi allievi della scuola di Mileto scelsero sostanze (acqua, aria, fuoco) troppo familiari e caratterizzate per essere convincenti come costituenti di corpi che non avevano nessuna delle loro proprietà. Anassimene spostò il problema dalle cause dell'origine del mondo a quello della sua composizione e il termine *archè*, da origine, passò ad indicare il principio costituente¹. Malgrado questo tentativo di spiegare la molteplicità formale di aspetto e di comportamento degli oggetti, sulla base di una unicità materiale non sia riuscito a dare risposte soddisfacenti, esso segnò l'inizio della lunga e travagliata ricerca dei componenti ultimi della materia, che si è sviluppata, nel corso dei millenni, secondo due diversi percorsi. Il primo cercava di arrivare, sulla base di un processo razionale di astrazione, a stabilire la natura e le proprietà dei costituenti microscopici. Il secondo dava più enfasi all'osservazione sperimentale e tentava di definire la composizione delle sostanze sulla base di costituenti familiari, come acqua, aria, terra o fuoco, che, con la loro presenza o assenza, determinassero le proprietà macroscopiche delle sostanze materiali. Essendo stati spesso mescolati e confusi, i due approcci hanno dato risultati contrastanti e non conciliabili, proprio per la loro diversa impostazione: chi cercava di chiarire le proprietà delle particelle microscopiche, voleva trarne conclusioni sulle origini delle proprietà macroscopiche, mentre chi partiva da queste proprietà, pretendeva di arrivare a conclusioni anche sulle caratteristiche delle particelle, rendendo equivoca, fino alla fine del XVIII secolo, la differenza tra i concetti di atomo e elemento.

Il monismo toccò la sua espressione più alta con Parmenide che portò all'estremo il processo di astrazione come autentico strumento di conoscenza, andando al di là della filosofia naturale e dando origine alla logica e alla metafisica². Formulò l'ipotesi che, al di sotto degli aspetti sensoriali, esistesse una faccia nascosta della Natura, l'*essere*,

1. G. Villani, *La chiave del Mondo*, Antitesi, CUEN, Napoli (2001) 24;

2. G. Villani, rif [1], pag 25;

La ricerca dei componenti ultimi della materia

che poteva essere concepito solo dal puro intelletto³. Vedeva il mondo come un continuo, puro, solido, eterno, completamente pieno e non divisibile, perché, con la divisione, sarebbe diventato due o più. Solo l'essere, in quanto è, poteva essere pensato e nominato; in antitesi il **non essere** non esisteva, perché non è e pertanto non poteva essere concepito dalla mente umana. La mancanza di uno spazio vuoto nel quale spostarsi rendeva impossibile sia il moto, che le trasformazioni, le quali avrebbero comportato la scomparsa di ciò che era e il porsi in essere di qualcosa che prima non era, in contrasto con la continuità materiale dell'essere. Di conseguenza, i cambiamenti osservabili evidenziavano la contraddizione tra logica e sensi, e spingevano Parmenide a ritenere vera solo la conoscenza razionale, perché libera dalle ingannevoli apparenze dei sensi, che non forniscono altro che l'illusione del cambiamento⁴.

Della concezione parmenidea, i filosofi successivi accettarono l'idea che la sostanza non possa essere distrutta, cioè che esista qualcosa che non muta nel corso delle trasformazioni, e recepirono le contraddizioni nelle quali cadeva la concezione monista quando affrontava i problemi del moto, delle trasformazioni e di tutto ciò che potesse implicare disomogeneità⁵. Non accettarono, invece, il rigetto dell'esperienza sensoriale e della possibilità del cambiamento. Per superare le difficoltà delle concezioni moniste, furono sviluppate le filosofie **pluraliste**, soprattutto da parte di Anassagora e Empedocle, i quali, introducendo un numero infinito o ben determinato di componenti qualitativamente differenziati, davano enfasi alla **composizione** dei corpi naturali, legando le loro proprietà macroscopiche alla presenza di particolari **omeomerie o radici**, e al rapporto nel quale queste erano mescolate. Empedocle concepiva i corpi materiali come aggregati di particelle elementari, eterne, immutabili, e senza parti al loro interno, appartenenti a quattro diverse radici: acqua, aria, terra e fuoco. Ogni corpo materiale poteva essere diviso meccanicamente molte volte, fino a quando, separandosi le particelle appartenenti alle diverse radici primordiali, ogni ulteriore frammentazione risultava impossibile. Come si vede, per la prima volta, al concetto di frammentazione meccanica era associato quello di separazione di particelle qualitativamente differenziate.

La molteplicità delle sostanze primordiali reintrodusse nel pensiero greco la possibilità, non solo del movimento, ma anche delle trasformazioni, spiegando tutti i fenomeni, fisici, naturali e biologici come una serie di aggregazioni e disgregazioni delle particelle, determinate e governate da altri due tipi di **materia, amore (Philia)** che faceva combinare gli elementi e **discordia (Neikos)** che tendeva a separarli. Questo fu il primo tentativo di spiegare combinazioni e trasformazioni, in termini di un numero definito di agenti esterni e anticipò il concetto ottocentesco di affinità chimica, anche se Empedocle attribuiva ad amore e odio la stessa consistenza materiale degli elementi. Variamente rielaborata, la teoria dei quattro elementi dominò il pensiero chimico greco, arabo ed europeo, fino al 1700, sebbene mostrasse, nella sua totalità, alcuni punti deboli: per esempio, non spiegava perché quattro e non più elementi, e come, avendo essi una natura definita, e mantenendosi inalterati nel corso delle separazioni, potessero produrre qualcosa di diverso⁴.

In maniera indipendente, ma non per questo meno significativa, Pitagora cercò il principio di tutte le cose nei numeri interi, che raffigurava come punti nello spazio e concepiva come unità di esistenza dotate di consistenza fisica: le loro combinazioni, secondo precise figure geometriche, determinavano le caratteristiche dei corpi materiali⁶. La realtà risultava dal modo in cui i numeri si strutturavano tra loro: l'uno era il punto, il due la linea, il tre la superficie, il quattro il solido, e la formazione degli oggetti reali era governata dalle stesse leggi che regolavano la combinazione dei numeri⁷.

Gli atomi

Il primo serio tentativo di superare le obiezioni di Parmenide e conciliare la visione monista con quella pluralista fu realizzato da Leucippo e dal suo allievo Democrito. Essi accettarono il concetto di **essere** parmenideo, eterno e inalterabile, ma rinunciarono alla sua unicità, postulando che fosse suddiviso, senza perdere le sue caratteristiche, in una pluralità di porzioni, chiamate **atomi**, perché non ulteriormente divisibili. Gli atomi si differenziavano l'uno dall'altro per tre caratteristiche geometriche: **forma** (alcuni erano lisci e sferici, altri aguzzi e scabrosi, altri ricurvi o uncinati), **contatto** (l'ordine in cui erano disposti), e **direzione** (la posizione in cui si trovavano), oltre a dimensione e peso (quest'ultimo assente nella formulazione originale di Leucippo; non si sa se sia stato introdotto da Democrito o, più tardi, da Epicuro⁸).

Gli atomi esistevano indipendentemente l'uno dall'altro perché erano separati da uno spazio vuoto, il **non essere**, che Leucippo e Democrito ritenevano altrettanto reale dell'essere. Il vuoto rendeva possibile il loro movimento continuo, vorticoso e intrinseco, regolato da una precisa legge naturale, che li portava ad urtarsi, rimbalzando e separandosi inalterati nella direzione imposta loro dal fato. Tuttavia, se avevano forma, dimensione, direzione e contatto **congruenti**, gli atomi potevano, senza che le caratteristiche di ciascuno venissero alterate, rimanere **allacciati**, dando

3. B. Pullman, *The Atom in the History of Human Thought*, Oxford University Press (1988) 20;

4. M. Gorman, *J. Chem. Educ.*, 37 (1960) 100-104;

5. G. Villani, rif [1], pag 26;

6. A. C. Crombie, *The History of Science from Augustine to Galileo*, Dover Pub. Inc., New York, (1995) 47n;

7. M. Ciardi, *Breve Storia delle Teorie della Materia*, Le Bussolle, Carocci, Roma (2003) 15;

8. B. Pullman, rif [3], pag 33;

luogo ad aggregati sempre più grandi, fino a costituire gli svariati corpi macroscopici, percepibili dai sensi. Quanto più le forme degli atomi si adattavano l'una all'altra, tanto più l'aggregato risultante era duro e resistente agli urti con altri atomi, che, altrimenti, avrebbero causato la sua disgregazione in parti più piccole.

Democrito riteneva che le qualità convenzionali, o **secondarie**, osservabili o percepibili nei corpi macroscopici, come calore, gusto, colore, non corrispondessero a niente di reale, perché non esistevano in realtà nell'oggetto; esse erano, invece, generate dall'interazione con i nostri sensi, dal modo nel quale gli atomi si erano disposti per generare la struttura di ciascun aggregato. Gli atomi non possedevano qualità secondarie, ma soltanto quelle **primarie**, come peso, densità e durezza. Le trasformazioni della materia erano interpretate in chiave combinatoria⁹, come separazione meccanica degli atomi che costituivano le sostanze di partenza e la loro successiva riaggregazione secondo una differente combinazione¹⁰. In questo modo, l'indivisibilità e l'inalterabilità degli atomi garantivano la persistenza della sostanza che costituiva i corpi, rendendo plausibile l'ipotesi dell'esistenza di una realtà permanente al di sotto dei mutamenti macroscopici¹¹. Più difficile era spiegare come in questo processo si potessero produrre sostanze con caratteristiche diverse da quelle delle sostanze di partenza¹², visto che gli atomi rimanevano inalterati.

Questa difficoltà costituì l'ostacolo concettuale più forte all'accettazione dell'ipotesi di Democrito sulla composizione della materia, che, inoltre, risultava intrinsecamente laica, in quanto interpretava in chiave **meccanicistica** i fenomeni naturali, cercando di stabilire quali precedenti circostanze li avessero causato. I suoi contemporanei preferirono, invece, usare una chiave di lettura **teleologica**, che stabilisse quale finalità avesse determinato ciascun evento¹³. Infine, la mancanza di collegamento tra la teoria e i molti fenomeni attentamente osservati era particolarmente sentita in un momento nel quale i Greci stavano costruendo un tipo di conoscenza più "scientifica", nel senso che acquisivano e difendevano una vasta mole di conoscenze, in medicina, biologia, astronomia e matematica, saldamente basata sull'osservazione dei fenomeni naturali, o su veri e propri esperimenti, con un minimo tentativo di generalizzazione, anche se non mancava di discernimento o sofisticazione¹⁴.

La materia prima

Aristotele diede un contributo significativo all'indagine sulla Natura, sia per quanto riguarda le osservazioni sperimentali che le generalizzazioni e le astrazioni conseguenti. Partendo, come Democrito, dall'esigenza di superare le difficoltà evidenziate da Parmenide, formulò l'ipotesi che gli oggetti materiali fossero costituiti da una sostanza prima uniforme (**prote hyle**) che non poteva esistere indipendentemente da un secondo costituente basilico del mondo, la forma (**eidōs**). La materia prima non aveva carattere sostanziale, ma era un astratto principio metafisico che poteva essere distinto dalla forma solo con un processo di astrazione mentale¹⁵.

I principi ultimi non erano i quattro elementi di Empedocle, ma quattro **qualità primordiali**, cui potevano ridursi tutte le altre qualità osservabili. Erano divise in due coppie di opposti, caldo opposto a freddo (qualità attive) e secco opposto a umido (qualità passive), e agivano sulla materia prima, due alla volta (ma quelle opposte mai contemporaneamente), per formare da essa i quattro elementi, secondo le seguenti combinazioni: il secco e il caldo per dare il fuoco, il caldo e l'umido per dare l'aria, il freddo e l'umido per dare l'acqua, il freddo e il secco per dare la terra.

Gli oggetti materiali erano visti come combinazioni di qualità che agivano sulla materia prima, e potevano essere riconosciuti e differenziati in base a specifiche proprietà osservabili (o secondarie), come colore, viscosità, durezza, densità, che dipendevano dagli elementi che li costituivano e dal rapporto nel quale erano combinati. La forma, che Aristotele aveva ereditato da Platone, era anche strumento di classificazione perché caratterizzava una specie, rendendo simili tutti gli oggetti appartenenti a quella specie.

Per quanto riguarda le trasformazioni, Aristotele cercò di superare la negazione parmenidea del cambiamento con un approccio nettamente diverso da quello scelto dagli atomisti. Mentre, per Parmenide, i cambiamenti avrebbero implicato la formazione di qualcosa che prima non era, per Aristotele erano la messa **in atto** di qualcosa che prima esisteva soltanto **in potenza**. Questo passaggio, da essere in potenza ad essere in atto, era fondamentale nella sua filosofia naturale, perché rappresentava lo scopo ultimo che determinava sia le trasformazioni, e quindi i fenomeni chimici e biologici, che i movimenti naturali, e quindi i fenomeni fisici¹⁶. Per esempio, i passaggi di stato erano interpretati come la sostituzione di una qualità con un'altra¹⁷: l'acqua, fredda e umida, si poteva trasformare in aria, calda e umida, semplicemente sostituendo il freddo con il caldo, cioè scaldandola.

Esistevano poi una grande varietà di trasformazioni causate dal mescolamento di due o più sostanze, che portavano a un

9. B. Bensaude-Vincent e I. Stengers, *A History of Chemistry*, Harvard University Press (1996) 12;

10. F. Abbri, *L'atomo fino al XVIII secolo*, in G. Villani Ed., *Molecole*, Tessere, CUEN, Napoli (2001) 43;

11. A. Chalmers, *The Scientist's Atom and the Philosopher's Stone*, Springer (2009) 44;

12. B. Pullman, rif [3], pag 33

13. B. Russell, *Storia della Filosofia Occidentale*, TEA (1991) 84-89;

14. A. Chalmers, rif [11], pag 71;

15. G. Villani, rif [1], pag 84;

16. A. Chalmers, rif [11], pag 62;

17. P. Ball, *The Ingredients*, Oxford University Press, Oxford, (2002) 9;

La ricerca dei componenti ultimi della materia

prodotto di composizione diversa. In questi casi, Aristotele distingueva tra *sintesis* e *mixis*. La sintesi era una semplice miscela meccanica di corpi diversi (come semi di grano e orzo), a seguito della quale non si originava nessuna nuova forma sostanziale perché ciascun componente manteneva la propria identità. Quando, invece, a seguito del loro mescolamento, le qualità simili dei reattivi si combinavano tra di loro (caldo con caldo, ecc.), e quelle opposte si annullavano, se si raggiungeva un opportuno bilanciamento tra le qualità opposte, si otteneva una nuova combinazione di qualità ed elementi (*mixtio*), che era omogenea in tutte le sue parti e costituiva un corpo nuovo. Questa combinazione di qualità superava la principale difficoltà incontrata dagli atomisti, perché spiegava l'origine delle differenze di aspetto tra prodotti e reagenti, malgrado si mantenesse uniforme la materia prima della quale tutti erano costituiti.

Si pose, però la questione della presenza *reale* o soltanto *potenziale* dei costituenti in un composto, che, per molti secoli, costituì il punto cruciale nella disputa tra atomisti ed aristotelici. Nel *De Generatione et Corruptione*, Aristotele chiariva che i componenti di una *mixis*, agendo l'uno sull'altro, perdevano completamente la propria forma sostanziale, e cessavano di esistere come entità distinte, subendo una unificazione (*henosis*), per produrre un prodotto *omeomero*, identico in tutte le sue parti, anche le più minute¹⁸. I componenti rimanevano, però, potenzialmente rigenerabili¹⁹, in quanto la loro *dynamis* si manteneva nel composto, in modo che le sue proprietà riflettessero quelle degli elementi costituenti²⁰.

Aristotele ebbe con le concezioni particellari rapporti, in qualche modo, contraddittori: certamente, riteneva filosoficamente inaccettabile l'ipotesi atomica, perché i suoi presupposti meccanicistici mal si conciliavano con la propria visione teleologica. Tuttavia, alcune critiche, che, nel quarto capitolo del primo libro della Fisica, muove ad Anassagora circa la divisibilità della materia all'infinito, hanno portato qualcuno a credere che Aristotele abbia sviluppato una propria teoria corpuscolare, che comunque fu ampliata molto più tardi dai suoi commentatori, soprattutto Alberto Magno e Tommaso d'Aquino. Un corpo naturale non poteva essere diviso all'infinito, perché, oltre certi limiti, andavano perdute le sue qualità, e il corpo semplicemente, cessava di essere quello che era. Le più piccole parti di materia che si ottenevano, i *minima naturalia*, erano eguali ai corpi macroscopici da cui provenivano e differivano dagli atomi di Democrito perché non erano né immutabili, né indivisibili²¹. Mentre gli atomisti vedevano la combinazione chimica come una semplice giustapposizione degli atomi, per Aristotele si verificava un'interazione degli elementi che si modificavano, dando luogo a un reale cambiamento delle qualità²². Sebbene non avesse una rilevanza apprezzabile nel suo sistema filosofico, questa visione della materia fu accolta dalla schiera dei suoi commentatori più tardi e gradualmente elaborata nella teoria medievale dei minima, che rappresentò una sorta di teoria corpuscolare²³.

In conclusione, Aristotele sviluppò una visione della Natura che, partendo dall'osservazione dei fenomeni, applicava la logica induttiva, sicuramente più adatta alla loro comprensione, e questo probabilmente, unito alla sua istintiva tendenza a ridurre le questioni cosmiche in termini maneggiabili²⁴, contribuì a far accettare le sue idee nei secoli successivi. Ma molto più determinante, in questo senso, fu l'aspetto teleologico della sua filosofia naturale: concepiva un universo ordinato, logico, nel quale tutti i corpi naturali tendevano al conseguimento di una *finalità*, secondo un piano divino. Questo approccio era in armonia con il pensiero ebraico e, più tardi, con quelli cristiano e islamico, che, nei secoli successivi, supportarono i suoi punti di vista, accrescendone l'autorità, e includendone il pensiero nella cultura e nel linguaggio medioevali.

Gli alchimisti

Le teorie aristoteliche sulla composizione della materia costituirono fonte di ispirazione per gli alchimisti alessandrini, che le rielaborarono, per adattarle meglio ai risultati che essi ottenevano nelle loro officine. In particolare, essi fecero propria una teoria conflittuale della materia, esposta da Aristotele nel trattato *Meteorologica*, secondo la quale il calore del sole generava due *esalazioni*, una secca, calda e fumosa, l'altra umida, fredda e acquosa, che agivano nelle viscere della terra: la prima formava i minerali, la seconda i metalli²⁵. Avendo molte caratteristiche comuni, i metalli differivano non per *tipi* ma soltanto per *gradi di maturazione*²⁵. Avendo una maggiore familiarità con le sostanze e le loro trasformazioni, gli alchimisti accentuarono il carattere materiale di queste esalazioni, perché, nella loro visione esclusivamente qualitativa della Natura, ogni qualità doveva avere un portatore materiale²⁶. L'esalazione calda fu identificata con un *principio combustibile*, corrispondente allo zolfo, quella fredda con un *principio condensabile*, corrispondente al mercurio, ed il diverso contenuto in zolfo e mercurio differenziava i metalli l'uno dall'altro.

La speculazione sulla composizione della materia era ormai condotta in chiave *chimica*, e l'attenzione era ri-

18. W. R. Newman, *Atomos and Alchemy*, The University of Chicago Press (2006) 28-30;

19. B. Pullman, rif [3], pag 63;

20. B. Bensaude-Vincent e I. Stengers, rif [9], pag 29;

21. T. H. Levere, *Transforming Matter*, The John Hopkins University Press, Baltimore (2001) 15;

22. G. Villani, rif [1], pag 88;

23. D. R. Oldroyd, *J. Chem. Educ.*, 50 (1973) 450-4;

24. P. Ball, rif [17], pag 19;

25. P. Ball, rif [17], pag 18;

26. G. Villani, rif [1], pag 86;

volta, non tanto ai costituenti microscopici, quanto ai componenti macroscopici che trasferivano ai composti le loro proprietà. La scelta di zolfo e mercurio era giustificata in quest'ottica: il mercurio, liquido e lucente, causava la lucentezza e la fusibilità dei metalli che lo contenevano, mentre lo zolfo conferiva ai corpi la sua opacità, la sua capacità di essere ridotto in polvere, la sua combustibilità, era giallo come l'oro, si combinava con i metalli dando scaglie dorate e sembrava liberarsi durante la preparazione dei metalli per arrostitimento dei loro minerali²⁷.

Anche gli Arabi accolsero le teorie di Aristotele, soprattutto quelle naturalistiche, più vicine ai loro interessi, di carattere prevalentemente empirico. **Geber** (~760 - ~815) accettò la teoria delle due *esalazioni*, nella versione rielaborata dagli alchimisti alessandrini, ma considerando mercurio e zolfo, piuttosto che sostanze reali, *principi* che conferivano liquidità e combustibilità ai corpi nei quali erano presenti: se essi si combinavano nel più perfetto equilibrio naturale, si otteneva l'oro, il metallo perfetto; altrimenti, gli errori di combinazione generavano i metalli vili, anche se l'alchimista poteva correggere questi errori con l'opportuno trattamento.

Avicenna (908 - 1037) diede un contributo più originale: in netto contrasto con Aristotele, riteneva che le forme sostanziali degli elementi si mantenessero dopo la formazione dei composti, anche se le loro qualità subivano una *remissio*, un indebolimento: esse non costituivano la forma sostanziale del misto, ma preparavano la strada per la sua ricezione²⁸. Malgrado la larga diffusione e l'influenza delle sue opere, questa idea non ebbe grande seguito.

Averroè (1128 - 1196) diede consistenza reale al concetto aristotelico di *minima naturalia*: essi erano il risultato di una divisione fisica, i mattoni costituenti, qualitativamente e quantitativamente specifici, di ogni sostanza, cui conferivano proprietà caratteristiche²⁹. Ad Averroè è attribuita l'idea che, per creare una nuova sostanza, fosse necessario che i reattivi si scomponessero nei loro minimi, che questi fossero separati e poi ricomposti, agendo gli uni sugli altri. Sia le qualità che le forme sostanziali subivano una remissio, necessaria per fondersi nella forma mixti.

Vaghi accenni, spesso critici, che ne fanno diversi autori cristiani come Lattanzio e Agostino, testimoniano come il concetto di atomo, pur subendo una profonda recessione, fosse ancora presente nella cultura dell'Europa medievale⁴. Tuttavia, non si poteva più non tener conto della esperienza accumulata dalla tradizione alchemica. Ad essa si rifaceva la concezione della materia esposta nel *Summa Perfectionis Magisterii*, di un europeo di fine duecento, che si firmava Geber, recentemente identificato come **Paolo di Taranto**³⁰. I quattro elementi erano concepiti come minuti corpuscoli (*minima*) che costituivano una sorta di substrato. Essi si univano, in una *fortissima compositio*, in corpuscoli complessi più grossi, di zolfo e mercurio, che non potevano essere decomposti neanche dalla forza disgregante del fuoco. Invece, per mezzo delle semplici operazioni della chimica analitica, come il riscaldamento o l'esposizione alla fiamma, dalle varie sostanze, specie i metalli vili, potevano essere separati zolfo e mercurio; in accordo con il principio scolastico che *le cose nei quali i composti possono essere risolte sono quelle dalle quali sono costituiti*, zolfo e mercurio potevano riunirsi per dare le parti minime degli stessi metalli. Il fatto che, dopo aver calcinato i metalli, sciolta la loro calce in acido, portata a secco la soluzione, il residuo potesse essere ridotto al metallo di partenza, era per lui la prova evidente che essi, nel processo di calcinazione, non si riducevano ai quattro elementi, perché la loro successiva ricombinazione non avrebbe dovuto necessariamente riformare lo stesso metallo³¹.

La differenza principale tra il concetto geberiano e quello aristotelico di *mixis* stava nella maggiore attenzione all'esperienza pratica degli alchimisti. Era sempre più evidente che le proprietà dei composti, pur essendo differenti da quelle dei componenti, erano in qualche modo correlate ad essi, e che i prodotti potevano essere riconvertiti nei reagenti. Questo poteva essere spiegato solo rigettando l'ipotesi aristotelica della completa distruzione dei reagenti nel corso delle reazioni, e ammettendo che essi permanessero in qualche misura nei prodotti. Geber rielaborò il pensiero aristotelico sulla base di queste considerazioni empiriche, che sembravano condurre alla nozione di sostanza intermedia, stabilendo una gerarchia di forme, alla cui base stavano quelle dei quattro elementi; al successivo livello di complessità stavano i principi zolfo e mercurio, costituenti di tutti i metalli, e infine quelle dei metalli e dei minerali, accessibili alla nostra esperienza. Perciò, i metalli erano costituiti dai principi mercurio e zolfo in diverse proporzioni, a loro volta costituiti da corpuscoli più piccoli che non era possibile separare e identificare. Questa concezione era il risultato del tentativo di conciliare l'uniformità della materia e dei suoi componenti elementari con la difficoltà sperimentale di isolarli come tali, e con l'idea che esistessero dei componenti macroscopici che l'alchimista poteva isolare e manipolare.

Dal Medio Evo al Rinascimento

Per tener conto delle stesse evidenze sperimentali, **Tommaso d'Aquino** (1225 - 1274), che non ammetteva forme intermedie tra la materia prima e le forme sostanziali del misto, immaginò che il processo di trasformazione avvenisse in una ben definita serie di passaggi: inizialmente, si perdevano le forme degli elementi, mentre le loro qualità

27. Molti di questi sono solfuri, che, per intenso riscaldamento all'aria, liberano anidride solforosa, dal caratteristico odore di zolfo bruciato;

28. W. R. Newman, rif [18], pag 95,

29. B. Pullman, rif [3], pag 113;

30. W. R. Newman, rif [18], pag 26, n 6;

31. W. R. Newman, rif [18], pag 31-33, 98;

La ricerca dei componenti ultimi della materia

si conservavano, e, agendo l'una sull'altra, producevano una singola *qualitas media*, che manteneva qualcosa dei reattivi; questa, a sua volta, forniva la forma sostanziale, *forma mixti*³².

La dottrina dei minimi non risolveva il problema, insito nella nozione aristotelica delle forme sostanziali, perché era sempre difficile visualizzare esattamente cosa succedeva quando due differenti minimi reagivano tra di loro: in un senso, le loro forme originali erano perdute, in un altro, erano mantenute. Non deve sorprendere, allora, che durante il XVI e XVII secolo la teoria sia stata, in qualche modo, soppiantata da una primitiva forma di atomismo²³, riportata all'attenzione degli intellettuali rinascimentali dal ritrovamento, nel 1417, del manoscritto del *De rerum natura*.

I tempi erano maturi perché le speculazioni dei filosofi e quelle dei chimici sperimentali si differenziassero: mentre i primi si interrogavano soprattutto sulla natura e le proprietà delle particelle elementari, i secondi davano più enfasi ai costituenti delle sostanze che adoperavano. La reazione chimica non era più vista come un passaggio dall'*essere in potenza* all'*essere in atto*, come ritenevano gli aristotelici, né un processo di maturazione, per mezzo del calore o di solventi, come ritenevano gli alchimisti alessandrini e arabi, ma una separazione e ricombinazione di particelle, invariabili e incorruttibili, che esistevano come tali prima di combinarsi, e rimanevano invariate nei misti entrando a far parte **realmente** della composizione del prodotto.

Il seicento

All'inizio del '600, l'atomistica non aveva ancora una connotazione scientifica, ma permaneva nel campo dell'astrazione filosofica, mantenendo viva l'attenzione verso il problema della discontinuità della materia, dimostrando, nello stesso tempo, che la sola speculazione logica non poteva dare un supporto teorico ai fenomeni. Esperimenti di scomposizione e ricomposizione delle sostanze, condotti da chimici del calibro di **Angelo Sala** (1576 - 1637) e **Daniel Sennert** (1572 - 1637) avevano consentito di formulare una definizione operativa dei **corpi puri**, come quelle sostanze che, per il fatto di poter essere recuperate dopo essere state disgregate, dimostravano di avere un'identità che si manteneva inalterata durante le trasformazioni cui prendevano parte e che era indipendente dalle sostanze da cui erano estratti³³.

Tra le ipotesi che continuarono a formularsi sulla struttura della materia, quella di **Pierre Gassendi** (1592 - 1655) merita di essere citata per lo sforzo che egli fece di conciliare le teorie corpuscolari con l'insegnamento della Chiesa, facilitandone l'accettazione da parte di scienziati dalle forti inclinazioni religiose, come Boyle e Newton⁴.

L'approccio meccanicistico

Mentre il problema fisico della costituzione della materia sembrava trovare una risoluzione sempre più vicina alla sperimentazione scientifica, nella rinascita e nel miglioramento delle concezioni particellari, il problema chimico della definizione e del significato di principio rimase irrisolto, anche se attorno ad esso si sviluppò un ampio dibattito. I principi erano intesi in almeno tre modi differenti: o come causa, identificabile nella materia e nella forma aristoteliche, o come costituenti della materia, semplici, al limite indivisibili, ma non isolabili, o infine come costituenti concreti della materia, ottenibili allo stato puro, come prodotti ultimi dell'analisi delle sostanze e presenti in tutti i corpi. I principi non isolabili appartenevano a due categorie distinte: gli atomi di Democrito o Epicuro (principi fisici), qualitativamente omogenei, e quelli differenziati qualitativamente come gli elementi di Aristotele, o i tria prima di Paracelso. I principi isolabili chimicamente non erano considerati principi ultimi perché si originavano dalla combinazione di quelli fisici e perciò chiamati **principi secondari** o **chimici**.

D'altro canto, il grande sviluppo della Meccanica, grazie ai contributi di Galilei, Cartesio, Pascal, Huygens e Newton, favorì il tentativo di assoggettare alle sue leggi tutti i fenomeni naturali, in particolare, di spiegare anche le reazioni chimiche come effetto del movimento delle particelle le quali, mutando la loro posizione reciproca, variavano la natura dei composti. Se questa ipotesi fosse risultata convincente, la Chimica sarebbe stata assoggettata alle leggi della meccanica, realizzando quella spiegazione unitaria dei fenomeni naturali cercata da almeno due millenni. Tuttavia, il modello democriteo di atomo spiegava in maniera soddisfacente proprietà come stabilità chimica e volatilità o fenomeni come dissoluzione e evaporazione, ma non quelle più specificatamente chimiche come la reattività delle singole sostanze.

A metà del XVII secolo, **Robert Boyle** (1627 - 1691) cercò di rifondare la Chimica, utilizzando un approccio prevalentemente sperimentale. La sua opera più famosa, frutto di un decennio di indagini, è *The skeptical chymist* (1661), scritto per dimostrare che la filosofia chimica e quella corpuscolare di stampo meccanicistico potevano integrarsi a vicenda. Il chimico scettico non era chi credeva che nulla potesse essere dimostrato, ma chi, attraverso la messa in discussione delle verità accettate, cercava di accrescere le conoscenze ed acquisire una consapevolezza sempre più certa dei fenomeni naturali. Pur non proponendo una visione moderna degli elementi, Boyle voleva sostituire l'ap-

32. G. Villani, rif [1], pag 94;

33. B. Bensaude-Vincent e I. Stengers, rif [9], pag 33

procio aristotelico e quello paracelsiano³⁴, ormai inadeguati a spiegare in maniera convincente la composizione delle sostanze, con un approccio meccanicistico - corpuscolare, di ispirazione cartesiana, ai fenomeni chimici³⁵: gli elementi erano *quei corpi primitivi, semplici o perfettamente omogenei, che, non essendo costituiti da nessun altro, sono l'ingrediente di cui sono fatti i corpi chiamati misti, e nei quali questi possono, alla fine, essere decomposti*.

Le particelle fondamentali, create da Dio a partire dalla materia prima, presentavano una moltitudine di forme diverse, si muovevano nel vuoto (uno spazio completamente privo di materia), ma non si trovavano come tali in Natura. Infatti, si univano tra di loro per formare aggregati stabili, **misti o concrezioni primarie**, ognuno dotato delle qualità primarie di forma, dimensioni e movimento. Questi erano particelle degli elementi chimici e dei corpi semplici, i mattoni dell'Universo: sebbene, in principio, divisibili, non lo erano con le normali reazioni chimiche, considerate niente altro che associazioni di concrezioni primarie, per produrre i corpi composti.

Le qualità sensibili (secondarie), come colore o sapore, non dipendevano dalla presenza di un elemento comune a molte sostanze diverse, ma erano il risultato di una struttura comune a tutte, che dipendeva dalla forma e dalle dimensioni dei misti primari. Tutte le sostanze manipolate dai chimici erano composte da atomi più semplici e le loro distinte proprietà nascevano dalle quattro proprietà dei corpuscoli: consistenza, tessitura, forma e moto. Mentre la dolcezza dello zucchero dipendeva dalla rotondità delle sue particelle, e il sapore pungente e la corrosività degli acidi dalla loro forma acuta, la tessitura rappresentava il modo in cui i misti erano intrecciati nei corpi che venivano a contatto con i nostri sensi³⁶. A differenza degli atomisti classici, Boyle rifiutò il concetto di moto disordinato e scontri casuali, ritenendo che esso fosse governato da Dio, in accordo con Gassendi, dal quale aveva recepito la teoria atomica³⁷.

L'opera di Boyle non ebbe immediata diffusione tra i contemporanei: il concetto dei misti primari non fu accettato perché non era utile, in quanto non si potevano isolare sperimentalmente queste particelle, né determinarne forma e dimensioni. Alla sua definizione, piuttosto vaga, di elemento, fu preferita quella analitico - sperimentale formulata da **Nicolas Lémery** (1645 - 1715) nel *Cours de chymie* (1675): *l'elemento chimico è il termine ultimo della divisione e della separazione delle sostanze con i metodi chimici*. In questo modo, la ricerca dei costituenti elementari aveva compiuto un passo avanti fondamentale, perché era stato anche individuato, nelle operazioni chimiche di laboratorio, lo strumento per separare, non più concettualmente ma effettivamente, i componenti delle sostanze. Restava da stabilire quali reazioni portavano a sostanze più semplici e quali no.

Il flogisto

Nel XVIII secolo, la speculazione sulla composizione della materia continuò a svilupparsi lungo le due direzioni già discusse, cercando o di definire sempre meglio i *principi* costituenti, per giustificare il comportamento chimico delle sostanze, o di delucidare la struttura microscopica dei corpi, senza però riuscire a collegarla efficacemente con il loro chimismo. Nella filosofia naturale settecentesca, i *perché?* erano più frequenti dei *come?* e si preferiva chiarire le cause dei fenomeni, piuttosto che le loro modalità di svolgimento, cercando di stabilire la presenza di principi generali nelle sostanze, anziché individuarne la composizione chimica. Da questo punto di vista, la **teoria flogistica** rappresentò il primo tentativo di elaborare una spiegazione unitaria dei fenomeni chimici, al di là della loro apparente diversità.

Per **Georg Ernst Stahl** (1660 - 1734) i costituenti ultimi, anche se materiali, erano così inaccessibili da non poterne definire razionalmente le proprietà, né isolarli, per cui indirizzò la propria attenzione verso i principi chimici e le classi di fenomeni che potessero essere studiati unendo proficuamente l'analisi sperimentale e quella teorica³⁸, in particolare quello della combustione, considerata dagli alchimisti un processo di decomposizione dei corpi nei loro elementi costituenti. Rifacendosi a **Johan Joachim Becher** (1635 - 1682), Stahl affermò che sono combustibili tutte le sostanze che contengono il **flogisto** (dal greco $\phi\lambda\omega\xi$ = fiamma), principio della combustibilità: esso era una sostanza reale, materia e principio del fuoco, che poteva essere trasferita, di volta in volta, da un corpo a un altro, ma non poteva essere isolato, essendo un principio elementare. Per Stahl, tutti i metalli erano costituiti da un componente comune a tutti (il flogisto) e da una materia terrosa, che variava a seconda del metallo: in questa semplice definizione, formulata per dare conto dei fatti sperimentali, si realizzava la sintesi tra l'unità concettuale (un unico componente caratterizzante, comune a un'intera classe di sostanze) e le diversità osservabili (una calce diversa che caratterizzava ciascun metallo). Per riscaldamento, i metalli si decomponivano nei loro costituenti elementari: il flogisto, che si disperdeva nell'aria, e la calce, che rimaneva nel recipiente. La calce non era altro che metallo privato di flogisto e poteva **ridursi** nuovamente a metallo, se le veniva restituito il flogisto, per esempio, riscaldandola in presenza di un corpo che ne fosse ricco (carbone o grassi). I processi di calcinazione e di formazione dei metalli erano visti, dunque, come un trasferimento di flogisto in direzioni opposte, a seguito del quale i corpi semplicemente si scomponivano o ricomponivano, senza che variasse la

34. tre principi primi: zolfo, mercurio e sale;

35. G. Villani, rif [1], pag 101;

36. T. H. Levere, rif [21], pag 25-26

37. B. Pullman, rif [3], pag 141

38. M. Ciardi, rif [7], pagg 38-41

La ricerca dei componenti ultimi della materia

loro sostanza.

Il calibro e l'ingegnosità degli argomenti elaborati a supporto della teoria del flogisto testimoniano il livello di sofisticazione cui era giunta la Chimica, ormai una scienza pienamente costituita. Sebbene, prima che finisse il secolo, Lavoisier avrebbe dimostrato la falsità del suo presupposto di partenza, la teoria ebbe il merito di costituire il primo tentativo di unificare fenomeni chimici e fisiologici apparentemente diversi (come combustione, calcinazione, arrugginimento, respirazione) in unico vasto sistema, coordinandone e mostrandone le somiglianze fondamentali, e di aver cercato di spiegare, per la prima volta, tutte le reazioni chimiche con il trasferimento di una semplice sostanza elementare da un reagente ad un altro.

Nella prefazione alla seconda edizione della *Critica della Ragion Pura* (1787), Kant ricorda che una gran luce illuminò i naturalisti, non solo grazie a Galilei e Torricelli, ma anche quando *Stahl trasformò dei metalli in calce, e questa di nuovo in metalli, con l'aggiunta o la sottrazione di qualcosa*³⁹. Grazie alla sua semplicità, la teoria fu accettata dai chimici progressisti in tutta Europa, anche se il flogisto non era mai stato isolato, né la sua presenza rivelata, anche fuggacemente, in qualche esperimento. Semplicemente, spiegava troppe cose per essere abbandonata, e per questo regnò incontrastata fino all'avvento di Lavoisier. Al suo successo contribuirono anche le modalità con le quali erano eseguite le osservazioni sperimentali: fino alla metà del settecento, nella scia della tradizione alchemica, la chimica era considerata la scienza delle trasformazioni qualitative dell'aspetto esteriore delle sostanze (colore, consistenza e, più recentemente, stato fisico), piuttosto che di parametri come volume o massa, e quindi le determinazioni quantitative non erano considerate essenziali nell'indagine chimica.

Newton

Negli ultimi anni della sua attività scientifica, Newton diede un contributo originale alle ipotesi sulla struttura della materia, mettendo a punto una teoria estremamente elaborata, basata sull'ipotesi che tutti i corpi macroscopici fossero formati da particelle primordiali chiamate *minima*, molto somiglianti agli atomi di Democrito ed Epicuro, separate da pori assolutamente vuoti. I minima erano invisibili, immutabili, solidi, rigidi, duri, impenetrabili, mobili, molto probabilmente creati in principio da Dio, e differivano l'uno dall'altro solo per forma e dimensioni, alle quali Newton aggiunse una proprietà immanente, l'*inerzia*, cioè la capacità di persistere nello stato di quiete o di moto⁴⁰. I corpuscoli potevano aderire tra di loro per formare particelle più grosse (aggregati del primo ordine), che, a loro volta, potevano formare aggregati di ordine sempre crescente, fino a quelli dell'ultimo ordine, i comuni corpi visibili. In questo processo di aggregazione, le particelle si disponevano secondo una configurazione e un ordine prestabilito, generando la diversità delle sostanze naturali.

Mentre i suoi predecessori, Boyle incluso, avevano dato enfasi alla forma delle particelle, tenute insieme da ganci, scabrosità delle superfici o movimenti coordinati, Newton formulò una teoria dinamica, nella quale le particelle erano tenute insieme da forze attrattive di tipo particolare, probabilmente di natura elettrica. Le forze attrattive più intense in assoluto tenevano insieme le particelle degli aggregati del primo ordine, e diventano via via più deboli, man mano che cresceva l'ordine dell'aggregato. Le forze che si manifestavano nel corso delle reazioni chimiche erano in grado di separare o unire gli aggregati dei diversi ordini, ma non di decomporre quelli del primo ordine nei corpuscoli che li costituiscono, che perciò si mantenevano inalterati nel corso delle reazioni: la differenza tra qualità interne della materia e qualità esterne era dunque dovuta alle differenze tra minima e aggregati primari⁴¹.

Per esempio, quando il mercurio era convertito nei suoi sali, rimaneva inalterata la struttura delle sue particelle di più piccola composizione, che ne determinava le proprietà caratteristiche, e che consentiva, eventualmente, di ottenere di nuovo il metallo di partenza. Questo modo di concepire la struttura degli aggregati primari preparò la strada all'idea della diversità delle particelle microscopiche dei diversi elementi, che sarebbe stata formulata da Eulero e ripresa in modo più consapevole da Dalton.

La teoria della materia di Newton riscosse un consenso generalizzato nella comunità dei fisici. **Leonard Euler** (1707-1783) estese al livello microscopico la definizione macroscopica di Lémery, assegnando a ciascun elemento particelle indivisibili, tutte eguali tra di loro, con proprietà eguali, e capaci di esercitare la stessa azione; di conseguenza, esistevano, non tre o quattro elementi, ma tanti quanti erano i tipi differenti di atomi esistenti in natura, e ogni elemento si differenziava dagli altri, non solo per le proprietà macroscopiche, ma anche per la natura e l'aspetto delle sue particelle microscopiche. Il numero degli elementi non era ovviamente illimitato, ma poteva essere stabilito solo per via sperimentale; suggeriva quindi ai chimici, come strategia di ricerca, il decomporre i corpi fino a ridurli ai loro principi e considerare elementi quelli da cui non era possibile estrarre qualcosa di diverso.

La divisibilità chimica

Alla fine del '700, i chimici sentivano sempre più pressante l'esigenza di affiancare al concetto di divisibilità

39. F. Abbri, *Le terre, l'acqua, le arie*, Il Mulino, Bologna (1984) 26-31

40. B. Pullman, rif [3], pag 137

41. T. H. Levere, rif [21], pag 12

ideale, geometrica o fisico - meccanica, quello di divisibilità chimica⁴², intesa non più come frammentazione, ma come analisi, cioè separazione di componenti diversi, per raccogliere insieme quelli identici. Nel *Dizionario di Chimica* (Macquer, 2^a ed, 1777) e poi anche nella *Filosofia chimica* (1806) di **Antoine-Francois Fourcroy** (1755-1809), ogni corpo materiale era considerato un insieme complesso di *particelle costituenti e particelle integranti*: *la particella integrante è la più piccola molecola [sic] nella quale un corpo può essere ridotto, senza essere decomposto*⁴³. Aveva le stesse caratteristiche dell'intero, ma era sempre più piccola man mano che procedeva la divisione fisico-meccanica, fino al limite inferiore, non osservabile: *la molecola primitiva integrante*. Essa era indivisibile meccanicamente, ma le diverse *particelle costituenti* che la componevano potevano essere separate per mezzo dell'analisi chimica, che distruggeva l'identità del corpo composto, sostituendolo con le sue particelle costituenti, ciascuna dotata di una propria identità individuale. Esse rappresentavano il limite della divisibilità chimica⁴⁴ e potevano riunirsi in modi diversi, per formare i corpi composti: ad esempio, la particella integrante di ciascun sale era composta dalla particella costituente di un acido e dalla particella costituente di una base.

In questo modo, il corpo semplice, o *elemento*, dotato di individualità chimica, e riconoscibile a livello sensibile, era messo in relazione con la propria particella integrante, che costituiva il livello insensibile. Ad ogni livello, l'individuo chimico era caratterizzato, non solo dalla sua indivisibilità, ma anche dal fatto che, nel corso delle reazioni, si manteneva sempre eguale a se stesso, sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo. Poiché l'elemento era chimicamente non decomponibile, si fece coincidere la sua particella integrante con quella costituente⁴⁵. Per molti anni questo equivoco di fondo avrebbe portato a considerare monoatomiche le molecole degli elementi puri.

Per l'enfasi che diede sempre alla sperimentazione, Lavoisier rinunciò a indagare la struttura microscopica della materia, non accessibile sperimentalmente, preferendo studiare il livello macroscopico, nel quale operano le reazioni chimiche. Non riteneva possibile alcuna connessione tra le particelle ultime (eventualmente indivisibili) che, non potendo essere osservate, andavano considerate metafisiche (una finzione mentale), e le sostanze chimiche elementari, prodotte dall'analisi dei corpi macroscopici in sostanze sempre più semplici. Formulò, invece, una definizione operativa di elemento (1789) come *quella porzione di materia, qualitativamente differenziata dalle altre, non suscettibile di ulteriore divisione chimica, ma solo compatibilmente con gli strumenti e le forze a disposizione del ricercatore, in un dato momento dello sviluppo della disciplina*.

Finalmente, le difficoltà concettuali nelle quali si era impantanata la filosofia delle particelle elementari erano superate: l'elemento era l'individuo chimico, portatore delle qualità primarie, che lo distinguevano dagli altri elementi, e lo mettevano in relazione con le sostanze composte che lo contenevano. Veniva inoltre stabilito attraverso quali criteri si dovessero distinguere le sostanze semplici da quelle composte: il peso di un corpo semplice era sempre inferiore a quello delle sostanze dalle quali si era generato, e aumentava sempre nel corso delle reazioni. Contrariamente a quanto ritenevano i flogististi, il vigoroso riscaldamento all'aria non dissociava il metallo (composto) nei suoi elementi (calce e flogisto), ma dava luogo a una reazione di sintesi, nella quale il metallo si univa all'ossigeno, per dare un prodotto più pesante.

Le leggi quantitative e la teoria atomica

L'uso sistematico della bilancia per misurare le masse delle sostanze che prendevano parte alle reazioni ebbe effetti dirimpenti sulla Chimica, evidenziando certe regolarità nelle combinazioni e nella composizione delle sostanze⁴⁶, e facendo nascere l'esigenza, non solo epistemologica, ma anche didattica, di una teoria che le disciplinasse e razionalizzasse, agevolando l'apprendimento, e consentendo di classificare i nuovi materiali. Le indagini di **Carl Friedrich Wenzel** (1740-1793) e **Jeremias Benjamin Richter** (1762-1807) portarono alla formulazione del principio di equivalenza, poi generalizzato da **Joseph Louis Proust** (1754-1826) nella legge delle proporzioni definite: *i rapporti tra le masse secondo cui due o più elementi si combinano sono fissi e non sono suscettibili di variare con continuità*. Questi risultati erano molto utili per le applicazioni pratiche, ma andavano, in qualche modo, razionalizzati.

Il primo tentativo coerente di mettere in relazione le leggi quantitative della Chimica con le ipotesi sulla costituzione microscopica della materia fu opera di un insegnante di Manchester, **John Dalton** (1766-1844), il quale, dilettandosi di meteorologia, studiava le caratteristiche dell'aria. Lavoisier aveva dimostrato che essa è una miscela di sostanze gassose e che queste costituiscono uno stato fisico a sé stante. Le indagini sperimentali dei chimici delle arie avevano consentito di differenziare i diversi gas e caratterizzare la reattività chimica e le proprietà fisiche di ciascuno. Queste ultime risultavano, in qualche modo, contraddittorie: la dilatazione termica (Amontons) e la risposta alla compressione o alla rarefazione (Boyle) erano quantitativamente eguali per tutti, mentre erano diverse per ciascun gas la densità e la solubilità in acqua, la quale, come lo stesso Dalton aveva accertato sperimentalmente, dipendeva anche dalla sua pressione sovrastante. Inoltre, i gas mostravano una resistenza alla compressione e una tendenza spontanea a

42. A. Di Meo, *Atomi e molecole nella chimica del XIX secolo*, in G. Villani, *Molecole*, CUEN, Napoli (2001) 62;

43. M. Boas Hall, *The Background of Dalton's Atomic Theory*, Chem. in Brit. (1966) 341-5;

44. A. J. Roche, *Chemical Atomism in the Nineteenth Century*, Ohio State University Press (1984) 5;

45. A. F. Fourcroy, *A general system of chemical knowledge*, tradotto da W. Nicholson, Cadell e Davies, London (1804) vol I, pag 92;

46. J. R. Partington, *A short History of Chemistry*, Dover Publications Inc., New York (1969) 153;

La ricerca dei componenti ultimi della materia

espandersi nel vuoto o negli altri gas, ed erano perfettamente miscibili in tutte le proporzioni, dando sempre miscele a composizione uniforme, a differenza dei liquidi, che si stratificano in funzione della loro densità.

Per spiegare le proprietà dei gas, era necessario tener conto anche di queste differenze. Dalton rielaborò (1801) un modello già proposto da Lavoisier, immaginando che le particelle dei vari aeriformi fossero costituite da una parte centrale, dotata di una *massa caratteristica*, circondata da un'atmosfera di calorico, responsabile delle repulsioni che si esercitavano tra particelle dello stesso gas, ma non tra quelle di gas differenti. Inoltre, attribui l'origine delle differenze di solubilità alla natura e alle dimensioni delle particelle ultime: più piccole e isolate esse erano, meno facilmente le assorbiva il solvente, e la solubilità cresceva all'aumentare delle loro dimensioni e complessità⁴⁷. Formulò quindi una propria ipotesi particellare, chiamando *atomi*, come Democrito, le particelle che costituivano il termine ultimo della divisione meccanica dei corpi, e assumendo, come Eulero, che gli atomi di ciascun elemento fossero tutti eguali tra di loro, non solo qualitativamente, ma anche quantitativamente. Identificò nel peso il fattore discriminante tra atomi di elementi diversi: quelli dello stesso elemento avevano lo stesso peso, diverso da quello degli atomi degli altri elementi.

In questo modo, Dalton estendeva al piano microscopico l'intrinseca differenza qualitativa della materia, che Lavoisier aveva evidenziato sul piano macroscopico, rendendo la copresenza dei due piani l'aspetto caratterizzante della interpretazione chimica della Natura e rimuovendo definitivamente l'uniformità della materia tipico della tradizione chimica precedente⁴⁸.

Questo modello fisico, nel quale gli atomi di ciascun elemento avevano una massa caratteristica, era giustificato dalle leggi della Chimica, perché spiegava la costanza dei rapporti tra i pesi di combinazione. Dalton intuì che da questi rapporti si potevano *apprezzare i pesi relativi delle particelle ultime, sia dei corpi semplici che composti, e il numero delle particelle semplici che costituiscono ciascuna particella composta ...*⁴⁹, rammaricandosi che i chimici non avessero già colto questa opportunità.

Infatti, essendo inaccessibile la dimensione atomica, il problema poteva essere risolto su scala macroscopica; partendo dall'ipotesi che le particelle integranti si formassero dall'unione di atomi indivisibili dei diversi elementi, Dalton decise di far coincidere i rapporti tra i pesi atomici degli elementi con i loro rapporti di combinazione, nell'ipotesi che le particelle integranti dei composti binari si formassero dalla *giustapposizione* di una particella costituente di ciascun elemento. Questa ipotesi, giustificata dal criterio di semplicità, si accordava con il modello di particella elementare da lui adottato. Poiché l'atmosfera di calorico che li circondava respingeva gli atomi di uno stesso elemento, era negata - o, almeno, limitata - la possibilità che due o più atomi eguali si unissero nello stesso composto. Solo nei casi in cui era noto che due elementi potessero formare due o più sostanze a differente composizione, occorreva ammettere che ad esse corrispondessero particelle integranti con un differente contenuto di atomi di uno stesso elemento: la più semplice era costituita da un atomo di ciascuno, le più complesse potevano contenere due o più atomi dello stesso elemento, posizionati in modo da essere separati il più possibile dall'atomo dell'altro elemento.

Come termine di riferimento cui assegnare il valore di peso unitario, Dalton scelse l'idrogeno, l'elemento che dava sempre il contributo minore alla massa dei composti e, partendo dai rapporti di combinazione delle sostanze, costruì una prima tabella di pesi atomici (1803), che in qualche modo giustificava e dava corpo alla teoria. Sebbene, per molti elementi esso era grossolanamente sbagliato, il peso atomico relativo costituiva così l'unico parametro numerico, determinabile sperimentalmente, che caratterizzava gli elementi e, mantenendosi costante nel corso delle reazioni, ne garantiva l'identità chimica.

Così formulata, la teoria atomica spiegava il principio di conservazione di massa, e la costanza dei rapporti di combinazione, e dava un senso anche alle recenti osservazioni di Davy sui rapporti di combinazione tra i gas: nell'*ossido nitroso* (N_2O), nel *gas nitroso* (NO) e nell'*acido nitrico* (NO_2), i rapporti in peso e in volume tra le quantità di ossigeno combinate con la stessa quantità di azoto stavano nel rapporto 1 : 2 : 4. Dalton trovò una relazione simile nei rapporti carbonio/idrogeno del *gas di palude* (metano, CH_4) e nel *gas olefacente* (etilene, CH_2) e la generalizzò nell'enunciato della *legge delle proporzioni multiple*: fissata la quantità in peso di un elemento, l'altro è presente in ciascuno dei diversi composti con quantità diverse, che sono tutte multipli interi e piccoli di quella più piccola. Questa legge confermava quel combinarsi *per salti* che poteva essere causato solo da una struttura particellare della materia; la discontinuità della composizione delle sostanze era una prova a favore della teoria atomica, la cui correttezza non poteva essere dimostrata dalla sola legge di Proust.

In breve, furono accumulate tante nuove prove sperimentali a favore, che i soci della Royal Society si convinsero della validità delle idee di Dalton, malgrado il carattere evidentemente arbitrario delle sue assunzioni. Thomson vide nell'atomismo non tanto la chiave per interpretare le reazioni come combinazione di atomi a peso differente, quanto un criterio generale che consentiva di cogliere da un punto di vista unitario molti fatti scollegati, e di interpretare, allo stesso tempo, le regolarità osservate.

47. A. J. Roche, rif [44], pagg 22-25;

48. G. Villani, rif [1], pagg 120-1;

49. J. Dalton, *A New System of Chemical Philosophy*, [excerpts], (Manchester, 1808) [from facsimile edition (London: Dawson)] <http://webserver.lemoyne.edu/faculty/giunta/paper.html>;

Il merito di Dalton non fu soltanto quello di aver tentato di dare consistenza scientifica a un'ipotesi filosofica, ma di averlo fatto cercando di conciliare l'approccio fisico con quello chimico, anche se, inizialmente, fu quest'ultimo a rivelarsi più produttivo. Infatti, i chimici erano disposti ad accettare l'esistenza di atomi di peso differente, perché essi, anche se non spiegavano né le proprietà, né la reattività delle sostanze, davano conto delle regolarità di composizione riscontrate sperimentalmente e consentivano di esprimerle, con grande vantaggio concettuale, con il linguaggio delle formule, sintetico e facile da ricordare. Questo, non solo conferiva un fondamento matematico alla Chimica, ma costituì anche un passaggio cruciale nello sviluppo del linguaggio e nella comprensione dell'origine delle differenze tra le sostanze, semplici o composte, che così era più facile caratterizzare con un nome specifico e classificare.

Anche nel continente europeo il concetto di atomo fu accettato dai chimici, almeno come modello ipotetico, in sostituzione della *molecola costituente*, corrispondente microscopica dell'elemento di Lavoisier. La sua utilità pratica era tale che molti erano disposti a sorvolare sulla sua reale esistenza, pronti ad accantonare ogni concezione teorica che non si accordasse con i risultati sperimentali. Così, la distinzione tra atomo chimico e atomo fisico fornì un denominatore comune a tutti coloro che, non volendo lasciarsi coinvolgere in dibattiti metafisici sull'esistenza degli atomi, cercavano di praticare la chimica in maniera pragmatica⁵⁰. La differenza tra l'atomo chimico, che spiegava le leggi della stechiometria e il comportamento dei gas, e l'atomo fisico, ancora legato al modello newtoniano, deve essere ben chiara se si vogliono comprendere gli avvenimenti che seguirono, in particolare certe freddezze o rifiuti nei confronti della teoria atomica, ai nostri occhi ingiustificabili⁵¹.

Avogadro e le combinazioni tra gas

Negli stessi anni, dallo studio dei rapporti tra i volumi di combinazione delle sostanze gassose, Gay-Lussac giunse a una conclusione del tutto generale, enunciando la *legge dei volumi* (1808): *le sostanze gassose si combinano sempre nei rapporti più semplici, espressi da numeri interi*⁵². Per esempio, 100 volumi di azoto si combinano con 50 di ossigeno per dare ossido di azoto e, decomponendo 200 volumi di ammoniaca, se ne ottengono 100 di azoto e 300 di idrogeno. Molto attento ai risultati analitici, **Jöns Jakob Berzelius** (1779-1848) vide una stretta analogia tra la legge di Proust, che si riferiva ai corpi solidi, e quella di Gay-Lussac, che si riferiva a quelli gassosi, perché la costanza dei volumi implicava quella dei pesi di combinazione, visto il valore univoco della densità di ogni singolo gas. Pur senza aderire integralmente all'ipotesi di Dalton, Berzelius introdusse l'uso delle formule chimiche, nella forma da noi comunemente adottata, perché pensava che esse sintetizzassero correttamente i rapporti di combinazione in peso e in volume tra i componenti di una sostanza, senza ricorrere a ipotesi non dimostrate sulla struttura atomica della materia⁵³.

Dalton, invece, rigettò la legge dei volumi, convinto che le particelle dei diversi fluidi elastici avessero dimensioni differenti, e perché i valori sperimentali dei volumi di combinazione sembravano indicare che, nel corso delle reazioni, alcune particelle costituenti si dividessero, ipotesi inconciliabile con la teoria atomica. Partendo da presupposti diversi, Dalton dall'analisi chimica, Gay-Lussac dalla determinazione di grandezze fisiche, non tennero in grande considerazione l'uno il lavoro dell'altro, e persero l'occasione per accorgersi che i due metodi potevano essere integrati. Alla base delle loro divergenze, stava il mancato riconoscimento della differenza tra atomi e molecole e la loro relazione parte/tutto: le leggi dei rapporti di combinazione erano giustificabili in termini di atomi, quella dei volumi era corretta solo in termini molecolari.

Chi colse questa differenza fu il fisico italiano **Amedeo Avogadro** (1776-1856). Partendo dalla eguaglianza dei coefficienti di dilatazione termica dei gas, cercò di conciliare l'evidenza macroscopica sperimentale (legge di Gay-Lussac) con la visione microscopica del fenomeno (teoria atomica), e uniformare la spiegazione delle regolarità nelle proporzioni ponderali e in quelle volumetriche. Nei *Saggi e memorie sulla teoria atomica* (1811), commentando i risultati di Gay-Lussac, affermava: *Bisogna dunque ammettere che vi siano pure dei rapporti molto semplici tra i volumi delle sostanze gassose e il numero delle molecole semplici o composte che le formano. La prima ipotesi che si affaccia a questo riguardo e che pare sia la sola ammissibile è di supporre che il numero delle molecole integranti in qualunque gas è sempre eguale, a volume eguale, o sempre proporzionale ai volumi*⁵⁴. Una conseguenza di questa ipotesi è che i gas reagiscono secondo rapporti in volume espressi da numeri interi e piccoli perché le loro particelle si combinano secondo rapporti espressi da numeri interi e piccoli⁵⁵.

Se accettato, questo principio avrebbe fornito un nuovo criterio per determinare i pesi atomici e molecolari: poiché il rapporto tra le densità di due gas esprime quello tra le masse di due volumi eguali, se si ammette che essi contengano lo stesso numero di particelle, il rapporto tra le densità è eguale a quello delle masse di un egual numero di particelle e quindi al rapporto tra le masse delle due singole particelle. Applicando questo criterio, Avogadro attribuì a etilene e metano le corrette formule molecolari (C_2H_4 e CH_4), al posto di quelle proposte da Dalton (CH e CH_2). Ovviamente, il

50. A. Chalmers, rif [11], pag 189;

51. A. J. Roche, rif [44], pagg 22-25;

52. M. Ciardi, *Introduzione a Amedeo Avogadro, Saggi e memorie sulla Teoria Atomica*, Giunti, Firenze (1995) 28;

53. A. Chalmers, rif [11], pag 183;

54. L. Rolla, in *Amedeo Avogadro commemorato nel primo centenario della sua morte*, Tip. Unione Biellese, Biella (1957) 61;

55. T. H. Levere, rif [21], pag 110;

La ricerca dei componenti ultimi della materia

metodo si poteva applicare solo a un limitato numero di sostanze, quelle gassose, mentre per le altre occorrevo strumenti teorici e sperimentali differenti.

Dalton considerò inattendibili i valori dei pesi atomici ricavati dalle misure di densità gassosa, perché in molti casi diversi dai suoi, e rifiutava il principio di Avogadro: il fatto che l'ossigeno gassoso (che riteneva costituito da atomi singoli) avesse densità maggiore di quella del vapor d'acqua (che riteneva formata dall'unione di un atomo di ossigeno e uno di idrogeno) gli sembrava in evidente contrasto con l'ipotesi che volumi eguali dei due gas contenessero lo stesso numero di particelle. Inoltre, era noto che idrogeno e cloro gassosi reagivano nel rapporto volumetrico di 1 : 1, per dare due volumi di acido cloridrico gassoso. Per interpretare questi e altri risultati simili alla luce del principio di Avogadro, occorreva assumere che la quantità di materia contenuta in un volume di ossigeno, azoto, cloro, idrogeno, dovesse essere divisa in due per fornire la quantità di vapor d'acqua, ammoniaca e acido cloridrico contenuta in un volume.

Ritenendo che il livello materiale di riferimento delle combinazioni chimiche fosse quello delle molecole integranti, e non quello degli atomi, Avogadro era in grado di spiegare queste incongruenze: le molecole integranti risultavano, a loro volta composte dall'unione di due (o altro numero pari) molecole elementari (o costituenti), proprio come le molecole integranti dei corpi composti. Distingueva, perciò, tra *molecole elementari* (corrispondenti agli atomi) e *molecole integranti*, costituite da più atomi, eguali o diversi. Le molecole integranti elementari, dunque, non coincidevano con il livello ultimo della materia, e perciò, prima di reagire con un altro elemento per dare un composto, potevano dividersi nelle loro molecole elementari costituenti, causando così un aumento di volume: se da una molecola di idrogeno e una di cloro se ne ottenevano due di acido cloridrico, esse dovevano essere biatomiche, e per motivi analoghi, la formula dell'acqua risultava H₂O e non HO.

Complicazioni concettuali e sperimentali

Questo costituì un grosso ostacolo concettuale alla possibilità di integrare la teoria atomica con la legge dei volumi. L'esistenza di molecole elementari biatomiche era vietata sia dalle teorie sull'affinità, che si esercitava solo su atomi differenti, che dalla *teoria del dualismo elettrochimico*, formulata da Berzelius, secondo la quale le molecole si formavano a seguito dell'attrazione reciproca di particelle di carica opposta: due atomi dello stesso elemento non potevano che avere la stessa carica elettrica e quindi la loro combinazione era impossibile. Questo equivoco richiese mezzo secolo per essere chiarito e perché fosse finalmente accettata la differenza tra l'atomo, che è il costituente minimo dei corpi composti, e la molecola, che è l'entità più piccola capace di esistenza indipendente.

Anche l'ostinazione a tenere separati i differenti approcci sperimentali complicò la situazione, perché i diversi metodi fornivano differenti valori del peso atomico, multipli interi l'uno dell'altro; per decidere a quale di essi assegnare lo status di peso atomico, si sarebbe dovuto conoscere la formula molecolare del composto⁵⁶. Invece, proliferavano tabelle dei pesi atomici in competizione tra loro, in molti casi con valori differenti per lo stesso elemento, dalle quali si ricavavano formule differenti, non solo per le molecole più semplici, come acqua, metano, ammoniaca, acido nitrico e carbonico, ma anche per le nuove sostanze isolate o sintetizzate in chimica organica.

Queste insanabili divergenze sperimentali e teoriche accesero il dibattito sull'esistenza, reale o fittizia, degli atomi e sulle loro proprietà, che animò tutto l'ottocento scientifico. I fisici ritenevano la teoria atomica troppo primitiva, perché, a differenza di quella newtoniana, si basava su un'entità poco caratterizzata, della quale, a parte il peso (e in modo incerto), non era nota né la struttura interna, né la natura del legame, né le cause delle reazioni. Persino negli anni tra il 1840 e il 1860, mentre fisici come Herepath, Joule, Clausius, Waterston e Maxwell determinavano le dimensioni e la velocità delle particelle di gas, ancora non si accettava la realtà degli atomi e si riteneva che l'atomo concepito dai chimici (unità di composizione) fosse differente da quello dei fisici (unità di costituzione). Anche molti chimici prestigiosi, quali Kekulé, Frankland, Gerhardt e Kolbe, non credevano nell'esistenza materiale dell'atomo, e ancora nel 1890 August Hofmann e Wilhelm Ostwald lo ritenevano niente di più che un'utile fantasia. Eppure, che piacesse o no, questo concetto era indispensabile allo sperimentatore, soprattutto a chi si occupava di Chimica organica; a parte le difficoltà concettuali, era estremamente comodo rappresentare le sostanze con formule sintetiche che tenessero conto della composizione atomica delle loro molecole.

Integrandosi perfettamente con la concezione degli elementi chimici di Lavoisier, la teoria atomica servì come punto di partenza per gli ulteriori sviluppi della Chimica e della Fisica, perché contribuì a rafforzare il concetto che gli elementi sono sostanze immutabili e indipendenti, che non possono in alcun modo essere convertite le une nelle altre. Postulando l'esistenza di un gran numero di particelle elementari, diverse e non intercambiabili, quanti erano gli elementi presenti in Natura, la teoria atomica smentiva l'ipotesi filosofica, greca e recente, che la materia fosse costituita da una sostanza primaria unica e uniforme, fatta di particelle eguali, organizzate in aggregati più o meno complessi. Questo portò molti scienziati, tra i quali Davy, a rifiutarla: sembrava impossibile che Dio avesse creato 50 o 60 tipi di atomi, e si cercava nelle relazioni numeriche tra i pesi atomici, la chiave per diminuirne il numero. Per esempio, il fatto che molti pesi atomici risultavano prossimi a valori interi e quindi multipli interi di quello dell'idroge-

56. A. J. Rocke, *Nationalizing Science, Adolphe Wurtz and the Battle for French Chemistry*, The MIT Press, Cambridge, Mass. (2001) 301;

no, portò **William Prout** (1785-1850) a formulare, nel 1815, l'ipotesi che l'atomo di idrogeno fosse il componente universale della materia, e che ogni elemento chimico fosse costituito dall'unione di un differente numero di atomi di idrogeno⁵⁷. Questa ipotesi riduzionista ebbe un'enorme attrattiva sui chimici perché dava unità e coerenza alla varietà degli elementi e, quando Darwin elaborò la teoria dell'evoluzione (1859), sembrò che anche gli elementi più pesanti potessero essersi evoluti a partire dall'idrogeno⁵⁸.

Il rifiuto quasi generalizzato della reale esistenza degli atomi assunse un ruolo paradigmatico nella crisi che rischiò di travolgere la scienza ottocentesca, quando dovette scegliere tra il limitarsi alla mera raccolta di dati sperimentali e l'esigenza di collegarli e razionalizzarli in uno schema teorico generale. La comunità scientifica assunse tre diversi atteggiamenti nei confronti della teoria atomica:

- a) accettare la realtà del mondo atomico, cercando prove sperimentali a sostegno;
- b) assumere una posizione di cauta neutralità, riconoscendone l'impatto intellettuale e l'utilità, ma evitando accuratamente di schierarsi sul tema del mondo materiale che essa presumeva;
- c) rigettarla, a priori, o, almeno, negare possibilità di poterne mai provare la validità. Questa posizione ostile risultava, alla fine, niente di più che un ottuso pregiudizio, che portò alcuni dei più preminenti e, purtroppo, influenti chimici del tempo a combattere una fiera guerra di retroguardia contro la teoria atomica⁵⁹.

Emblematico è il caso del francese Dumas, il quale, pur avendo portato contributi decisivi alla determinazione dei pesi atomici e molecolari, probabilmente deluso dal disaccordo tra i valori ottenuti con tecniche differenti, decise di attenersi rigidamente ai dati sperimentali, ritenendo le teorie atomiche *sterili concezioni che avrebbero potuto soltanto gettare entro una deplorabile confusione lo studio dei fenomeni chimici*, e aggiungendo: *se tanto io potessi, cancellerei dalla scienza questa parola (atomo), persuaso che nelle sue attribuzioni vada oltre i limite dell'esperienza, la quale noi ci dobbiamo studiare di non mai oltrepassare*.

Sebbene inizialmente ruotasse intorno a un problema squisitamente scientifico - la bontà o meno di un modello teorico esplicativo - la disputa assunse ben presto il carattere di dibattito filosofico, attorno ai meccanismi della conoscenza e a come si dovesse impostare e sviluppare il metodo scientifico di indagine della Natura, per evitare che portasse a conclusioni false o erranee. Che ne fossero consapevoli o no, i più accaniti oppositori della reale esistenza degli atomi si rifacevano a un particolare tipo di filosofia, formulata da **Isidore Auguste Comte** (1798-1857). Sebbene intrinsecamente non corretta, questa concezione della conoscenza che, tra l'altro, rifiutava l'idea stessa di unità della materia e condannava ogni ricerca volta a determinarne la struttura, al punto di proibire l'uso del microscopio, ebbe grande influenza su un certo numero di autorevoli scienziati ottocenteschi, molti dei quali si unirono a filosofi e teologi nella battaglia anti-atomistica⁶⁰.

Mentre la teoria atomica combatteva questa strenua battaglia per la sopravvivenza, la chimica organica subiva un notevole sviluppo, sia dal punto di vista della sintesi che della caratterizzazione dei prodotti. L'analisi delle sostanze organiche aveva evidenziato la loro scarsa differenziazione qualitativa, essendo essenzialmente composte di carbonio, idrogeno, ossigeno e, in misura minore, azoto, fosforo e zolfo, e una enorme differenziazione quantitativa, perché erano possibili svariate diverse combinazioni degli stessi elementi. Questo fece nascere l'ipotesi che le proprietà delle sostanze non dipendessero da *quali* e *quanti* atomi erano costituite, ma piuttosto da *come* essi fossero disposti nelle molecole, ipotesi rafforzata dalla scoperta dell'isomeria.

Il francese **Michel Eugène Chevreul** (1786-1889) si rese conto per primo del fatto che le analisi distruttive delle sostanze, pur fornendo dati accurati sulla loro composizione elementare, ne annullavano le caratteristiche significative, e quindi non riuscivano a fornire spiegazioni del loro comportamento. Occorreva invece isolare i *principi prossimi*, tanto numerosi, se confrontati con il limitato numero di elementi costituenti, da lasciar supporre anche differenze nel riarrangiamento interno degli atomi⁶¹. Per questo, Berzelius aveva introdotto la differenza tra la formula empirica, che indicava la proporzione in peso degli elementi in un composto, e quella razionale, che implicava un certo ordine nella distribuzione dei simboli, collegato alla proprietà macroscopiche della sostanza⁶². Le formule letterali da lui proposte erano state accettate ed estesamente utilizzate, non solo per questioni di economia concettuale, ma anche perché esse si prestavano ad essere manipolate per meglio evidenziare le posizioni relative dei *principi prossimi*.

Le varie teorie che cercavano di razionalizzare il comportamento delle sostanze organiche e classificarle, quella dei radicali, dei tipi, del nucleo, trovavano nelle formule razionali la maniera migliore per evidenziare similitudini e differenze, ma soprattutto quelle relazioni tra i composti che potessero indirizzare la progettazione dalle procedure di sintesi o decomposizione utilizzate per trasformarli gli uni negli altri. Lo studio delle reazioni di sostituzione permise di differenziare gli atomi dello stesso elemento presenti nella stessa molecola, sulla base della loro reattività. Per esempio, l'acido acetico aveva una formula minima di CH₂O, ma, per sostituzione dell'idrogeno con il cloro dava quattro prodot-

57. M. Ciardi, *Chimica nella Scuola*, XVII n° 3 (2007) 28-9;

58. G. Villani, rif [1], pag 125;

59. B. Pullman, rif [3], pagg 225-6;

60. B. Pullman, rif [3], pagg 204-5

61. B. Bensaude-Vincent e I. Stengers, rif [9], pag 129;

62. A. Chalmers, rif [11], pag 186;

La ricerca dei componenti ultimi della materia

ti diversi, tre molto simili all'acido di partenza. Questo risultato venne interpretato raddoppiando la formula minima e differenziando un atomo di idrogeno dagli altri tre, scrivendo la formula razionale come $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$.

Cannizzaro e il congresso di Karlsruhe

In definitiva, dagli anni '30 agli anni '60, i chimici organici andarono ben al di là della rigorosa razionalizzazione dei rapporti di combinazione alla quale si era fermato Dalton, aggiungendo una serie di assunzioni teoriche, che collegavano le proprietà delle sostanze a una struttura invisibile che poteva essere *mappata* per mezzo delle formule razionali, con le quali era facile rappresentare la formazione di un composto più complesso a partire da uno più semplice (serie omologhe) o la sostituzione di un elemento con un altro. Questi notevoli risultati furono ottenuti nonostante molti chimici utilizzassero formule sbagliate in assoluto, perché, per fortuna, la sostanza delle loro argomentazioni non ne risultava alterata⁶³.

Alla fine degli anni '50, era comunque assodato che non era più tollerabile il disaccordo tra i valori dei pesi atomici e tra le formule grezze delle differenti sostanze. **Friedrich August Kekulé von Stradonitz** (1829-1886), giovane professore di Chimica all'Università di Gand, prese l'iniziativa di riunire tutti i chimici che operavano in Europa per un ampio dibattito che contribuisse ad eliminare molte incomprensioni, e favorire un accordo su alcuni temi fondamentali, tra i quali la definizione dei concetti di atomo e molecola. Al Congresso, che si tenne dal 3 al 5 settembre 1860, nella città tedesca di Karlsruhe, presero parte più di 140 chimici, tra i quali il palermitano **Stanislao Cannizzaro** (1826-1910), che vi assunse un ruolo da protagonista, proprio per la chiarezza con la quale seppe distinguere tra questi concetti e per aver presentato un metodo certo per la determinazione dei pesi atomici e molecolari.

Un aspetto particolarmente importante dell'intervento di Cannizzaro è che esso non era stato preparato in vista del Congresso, ma, a testimonianza dello scrupolo con il quale si dedicava all'insegnamento, riprendeva la metodologia e le argomentazioni che utilizzava nel proprio corso di lezioni, e che aveva pubblicato qualche anno prima, con il titolo di *Sunto di un Corso di Filosofia Chimica fatto nella R. Università di Genova*⁶⁴. Per lui, la corretta interpretazione della teoria atomica era un punto cruciale, sia per le attività di ricerca che per la didattica, che andava svolta presentando agli allievi i fenomeni chimici e fisici in modo sistematico e organizzato, collegando i fatti e le spiegazioni, senza cadere in contraddizioni.

Il suo punto di partenza era il passaggio obbligato attraverso il quale la Chimica poteva mettere chiarezza nel materiale sperimentale e teorico che la caratterizzava: riconoscere il differente stato ontologico di atomo e molecola, e operare una distinzione chiara e netta tra i due concetti, che, pur implicandosi a vicenda, non coincidono, ma sono legati da una relazione parte/tutto. Cannizzaro subordinò il concetto di atomo a quello di molecola; solo le molecole possono esistere come entità isolate, mentre gli atomi, pur essendo i veri enti indivisibili, i costituenti elementari delle sostanze, non esistono al di fuori delle molecole. Proprio per dare enfasi alla loro differenza e interdipendenza, Cannizzaro chiamava la teoria **atomico - molecolare** e non semplicemente atomica: il cambio di termini non era banale, ma dava chiarezza e coerenza al quadro teorico e sperimentale della Chimica.

Poiché considerava imprescindibile integrare i risultati sperimentali di carattere chimico (pesi di combinazione) con quelli di carattere fisico (densità, calore specifico), utilizzava il principio di Avogadro, per tradurre a livello microscopico la legge dei volumi e ricavare, dal confronto diretto tra le densità relative dei gas, i pesi molecolari relativi, piuttosto che quelli atomici⁶⁵. Convinto che non potessero esistere atomi singoli, propose la *mezza molecola* di idrogeno come unità di riferimento dei pesi atomici e molecolari. Il suo criterio operativo per determinare i pesi atomici (rimasto valido fino all'avvento degli spettrometri di massa) consisteva nell'esaminare, per ciascun elemento, un gran numero dei suoi composti gassosi, determinarne la densità relativa e la composizione chimica percentuale, e combinare queste coppie di dati per arrivare a individuare il peso di quell'elemento, contenuto in una molecola di ogni composto.

Esprese come *legge degli atomi* la regolarità evidenziata da questa procedura: *le varie quantità dello stesso elemento contenute in volumi eguali sia del corpo libero, sia dei suoi composti, sono tutte multiple intere di una medesima quantità*. Questa quantità macroscopica corrispondeva, a livello microscopico, alla presenza, in una molecola, di un solo atomo dell'elemento in questione, e quindi poteva essere presa come il suo peso atomico. Se, invece, una molecola conteneva una quantità di un elemento multipla intera di questo minimo, il valore del multiplo indicava il numero di atomi presenti. Molti elementi (come idrogeno, ossigeno, azoto, cloro), allo stato gassoso non combinato, mostravano un peso doppio rispetto a quello minimo, e quindi consistevano di molecole biatomiche. Infine, il concetto di atomo di Cannizzaro era così svincolato da quello di molecola da consentire di determinare il peso atomico anche di elementi che, come il carbonio, non potevano essere portati allo stato gassoso, e stabilire correttamente la composizione atomica delle molecole di zolfo, fosforo, arsenico e mercurio, che avevano messo in crisi Dumas.

63. A. Chalmers, rif [11], pagg 197-211;

64. S. Cannizzaro, *Nuovo Cimento*, 7 (1858) 321-66;

65. F. Abbri, *L'atomismo chimico*, in *Storia della Scienza moderna e contemporanea*, ed. P. Rossi, TEA, Milano, (2000), vol. II, 269-300;

Il metodo di Cannizzaro consentì di introdurre, finalmente, una netta distinzione tra peso atomico e peso equivalente (o di combinazione), dalla cui relazione fu possibile dedurre la valenza degli elementi, che contribuì ad assegnare correttamente la posizione degli elementi nelle formule razionali. La teoria della valenza e dei legami tra gli atomi, il riconoscimento dell'esistenza di catene di atomi di carbonio, l'esatta definizione di atomo e molecola, la messa a punto di metodi per la determinazione precisa dei pesi atomici e molecolari costituirono le premesse fondamentali che prepararono il terreno alla nuova teoria strutturale⁶⁶.

La *legge degli atomi* costituiva la conferma macroscopica della teoria atomica, perché consentiva di individuare e quantificare con certezza l'indivisibile della Chimica, cui era attribuita la realtà e la concretezza di materia dotata di peso. Cannizzaro liberò i chimici dal bisogno di risolvere il problema dell'esistenza, a livello microscopico, di enti materiali, definibili come atomi e molecole, per i quali, tuttavia, la teoria cinetica dei gas, ancora in pieno sviluppo forniva indizi favorevoli assai probanti. Concepiva atomi e molecole come *entità macroscopiche*, caratterizzate da pesi esprimibili nelle unità di misura correnti (per esempio grammi), che, proprio per il loro carattere relativo, mantenevano gli stessi valori anche in scala microscopica e riteneva la teoria una semplice ipotesi sulla struttura ultima della materia, a carattere soltanto descrittivo, da utilizzare per armonizzare e rendere comprensibili le leggi delle combinazioni chimiche.

I pesi atomici che Dalton aveva ricavato da un'ipotesi non dimostrata, per Cannizzaro erano il risultato del trattamento di *dati sperimentali*. Se il numero di composti esaminati era sufficientemente ampio, la procedura scongiurava il pericolo di ottenere valori contrastanti, multipli o sottomultipli di quello corretto. Dalton non aveva potuto risolvere il problema perché aveva a disposizione un numero di relazioni (i rapporti tra i pesi di combinazione) inferiore a quello delle incognite (la composizione atomica e i pesi atomici). Cannizzaro aumentò il numero delle equazioni indipendenti nelle stesse incognite, perché, grazie al principio di Avogadro, poteva correttamente paragonare i pesi di uno stesso numero di molecole in fase gassosa. Partendo dall'assunzione che la legge della composizione costante si potesse applicare a ogni singola sostanza, fino all'ultima molecola individuale, ridusse il problema centrale della chimica teorica a un banale esercizio di ricerca del massimo comun denominatore⁶⁷. I pesi atomici calcolati da Cannizzaro si riferivano soltanto a 21 elementi ed erano stati rifiniti utilizzando la legge di Dulong e Petit e il criterio dell'isomorfismo, ma certamente non contenevano errori grossolani.

La concezione che Dalton aveva degli atomi, come espressione dei rapporti dei *pesi di combinazione* degli elementi, venne confermata e arricchita dalla concezione che essi esprimano anche la *composizione* di volumi eguali di gas. La definizione concettuale di Dalton era integrata da una definizione operativa, più utile ai chimici e quindi più facilmente accettabile: svincolato da ogni immagine di forma, grandezza, distanza, continuità o discontinuità, *l'atomo non è altro che un peso costante che costituisce per multipli interi (e mai sottomultipli) i composti chimici* e prende parte, quantitativamente inalterato, alle reazioni chimiche. I fisici non riuscirono a chiarire la struttura delle particelle elementari fino al XX secolo, i chimici a metà ottocento avevano perfettamente identificato e caratterizzato *le unità di composizione e combinazione, gli enti invarianti* (qualitativamente e quantitativamente) nelle reazioni chimiche.

L'intervento di Cannizzaro non convinse tutti i Congressisti, ma quelli che lessero il Sunto ne rimasero profondamente colpiti: per **Julius Lothar Meyer** (1830-1895) fu come squarciare i veli che gli offuscavano la vista, e ne trasse ispirazione per il libro di testo che pubblicò nel 1864. Anche **Dmitrij Ivanovič Mendeléev** (1834-1907) dichiarò di aver concepito un criterio per classificare gli elementi proprio a seguito di questa lettura. Negli anni successivi, comunque, i chimici cominciarono ad usare la notazione di Cannizzaro: nel suo *Dictionnaire de chimie*, Wurtz definì l'atomo *la più piccola massa di un elemento capace di esistere in combinazione e la molecola la più piccola massa capace di esistere allo stato libero*.

Il rifiuto degli atomi

Lo studio delle interazioni tra elettricità e sostanze chimiche, che aveva portato Berzelius a formulare la teoria del *dualismo elettrochimico* per spiegare la reattività e le modalità di combinazione tra atomi, Faraday a scoprire le leggi dell'elettrolisi, Hittorf e Kohlrausch a chiarire i meccanismi della conducibilità elettrica in soluzione, aveva anche fatto sorgere nuove difficoltà concettuali intorno al postulato della presunta inalterabilità e indivisibilità degli atomi. Nel 1884 **Svante August Arrhenius** (1859-1927) pubblicò la propria tesi di dottorato, nella quale giustificava la conducibilità elettrica in soluzione acquosa da parte degli elettroliti, sulla base della dissociazione delle loro molecole in parti più piccole (ioni) dotate di cariche elettriche positive o negative. Di conseguenza, gli atomi potevano acquistare cariche elettriche e, a seguito di questo processo, mutare sensibilmente le loro proprietà, pur mantenendo la loro identità chimica. Per esempio, prima di combinarsi, sodio e cloro scambiano cariche elettriche, assumendo quella *qualitas media*, intuita dagli aristotelici medievali, che li trasforma in ioni sodio e ioni cloro, meno reattivi e più commestibili dei prodotti di partenza, che poi costituiscono il cloruro di sodio. Questo spiegava finalmente le variazioni di aspetto che gli elementi subiscono nel corso delle reazioni: la perdita di lucentezza e altre proprietà da parte dei metalli per

66. G. Villani, rif [1], pag 211;

67. J. Bradley, *Before and After Cannizzaro*, Whittles Publishing Services (1992) 72.

La ricerca dei componenti ultimi della materia

azione degli acidi, per esempio la trasformazione del rame metallico rosso in *vetriolo blu* o *malachite*, verde-azzurra, contenenti ioni rameici azzurri, solubili in acqua.

La spiegazione della combinazione chimica sulla base delle interazioni tra specie aventi cariche elettriche differenti portava alla conclusione che, a parte il segno, le cariche elettriche degli ioni fossero eguali o multiple intere di una quantità elementare, che **George Johnstone Stoney** (1826-1911) nel 1891 propose di chiamare *elettrone*. L'ipotesi che anche la carica elettrica fosse quantizzata avrebbe poi portato all'individuazione dell'elettrone, della struttura atomica e della carica nucleare, del protone e del neutrone, arrivando alla conclusione sorprendente che, a dispetto della loro presunta indivisibilità, gli atomi erano in realtà composti di parti più piccole.

Tuttavia, nel passaggio tra il XIX e il XX secolo, gli ultimi difensori della causa persa dell'antiatomismo si impegnarono nel tentativo di limitare la ricerca scientifica ad una pura e semplice osservazione dei fenomeni, che si potevano, eventualmente, ordinare e classificare, rifiutando categoricamente qualsiasi tentativo di formulare, non solo teorie per razionalizzarli, ma anche qualsiasi modello che cercasse di interpretarli, giustificarli, formulare previsioni, combattendo una guerra senza quartiere contro il modello atomico che, nonostante tutto, a metà dell'ottocento, era quello più evoluto e utilizzato nelle diverse scienze sperimentali.

Eredi del nucleo storico degli oppositori all'atomismo erano gli *equivalentisti*, che rifiutavano il concetto di atomo, ritenendolo basato su ipotesi non dimostrate, e, al posto dei pesi atomici, preferivano usare i pesi equivalenti, perché direttamente ricavabili dai rapporti di combinazione. Tra di essi si segnalano per attivismo **Henri Sainte-Clare Deville** (1818-1881) e, soprattutto, **Marcelin Berthelot** (1827-1907), il quale, addirittura, approfittò della sua posizione governativa di alto rango per interferire con la diffusione delle idee che non approvava, arrivando a bandire l'insegnamento della teoria atomica a favore di quella dei pesi equivalenti. Di conseguenza, almeno fino al 1890, in Francia la maggior parte dei libri di testo citava l'ipotesi atomica come un ripensamento, alla fine del capitolo dedicato alle leggi chimiche, alcuni relegandola in appendice, per enfatizzare il fatto che la chimica dovesse essere insegnata in una forma positivista incorrotta, attraverso i fatti e i fatti soltanto⁶⁸.

Al positivismo di Comte si ricollegava, per alcuni aspetti, una scuola di pensiero, poi chiamata *empiriocriticismo*, della quale il fisico austriaco **Ernst Mach** (1836-1916) fu uno dei più influenti rappresentanti. Mach riteneva che la sola fonte di conoscenza fossero le percezioni derivate dall'esperienza immediata: gli oggetti materiali non erano niente altro che *simboli mentali concisi per rappresentare un gruppo di sensazioni*, e che ognuno di questi simboli *non avesse esistenza fuorché nel pensiero*. L'attività dello scienziato doveva limitarsi ad acquisire e organizzare queste sensazioni, alla ricerca di connessioni stabili tra di esse, riproducendo formalmente i fenomeni nel pensiero, in accordo con il criterio della massima economia concettuale, *Denkökonomie*. Quello che lo scienziato non poteva e non doveva fare era cercare le cause dei fenomeni e pretendere di ricavare, dalle osservazioni sensoriali, rappresentazioni sperimentali e modelli della realtà⁶⁹. Mach si oppose sempre alle più importanti teorie ottocentesche, che cercavano di ottenere informazioni e costruire teorie sulle realtà non osservabili, come, appunto, gli atomi, considerati *enti mentali*, che non potevano essere percepiti dai sensi. Era disposto ad ammettere, con qualche riluttanza, che gli atomi avessero qualche valore euristico o didattico, per coordinare una enorme massa di dati empirici, ma non a concedere loro qualsiasi carattere di realtà⁷⁰. In conclusione, anche se riproponeva una problematica che risaliva ai presocratici, determinata da un eccessivo empiricismo, la posizione di Mach non era totalmente sterile; per esempio, la sua critica epistemologica della meccanica newtoniana influenzò enormemente Einstein, aiutandolo a chiarire certi aspetti della teoria della relatività.

Infine, la corrente di pensiero chiamata *energeticismo* affermava che la sola realtà vera fosse l'energia⁷¹, grandezza fisica fondamentale dell'universo, mentre la materia non aveva esistenza reale. Alla guida di questo movimento si pose il chimico tedesco **Wilhelm Ostwald** (1853-1932), che attribuiva alla scienza il compito esclusivo di ricondurre tutte le leggi naturali alle *leggi delle diverse forme di energia*, senza che nessuna di esse avesse un ruolo privilegiato. Le sole realtà accessibili all'osservatore erano la somma delle sensazioni che gli oggetti naturali generavano in lui; la scienza doveva descrivere queste sensazioni nella maniera il più possibile chiara e libera da ipotesi e da rappresentazioni del mondo.

A questi feroci oppositori delle teorie scientifiche e di quella tomica si contrapponevano quegli scienziati che, come **Ludwig Eduard Boltzmann** (1844-1906), avevano una visione realistica del mondo e ritenevano che solo andando al di là della semplice esperienza si poteva acquisire una visione di insieme più generale dei fenomeni e scoprire nuovi fatti ancora più sorprendenti di quelli osservati. Le teorie dovevano perciò cercare di costruire rappresentazioni interiori della realtà, rielaborandole e perfezionandole di continuo, per adattarle sempre meglio al mondo esterno. Mentre Ostwald non accettava che lo scienziato si formasse un'immagine del mondo, per Boltzmann era importante che in quest'immagine fossero inclusi il minor numero possibile di elementi arbitrari. Le teorie atomiche

68. B. Pullman, rif [3], pag 235;

69. C. Cercignani, *Ludwig Boltzmann, The Man Who Trusted Atoms*, Oxford University Press (1998) 13;

70. D. Oldroyd, *Storia della Filosofia della Scienza*, EST (1998) 234;

71. B. Pullman, rif [3], pag 236;

avevano in sé la capacità di allargare l'orizzonte delle idee, suggerire nuove associazioni di concetti, spingere verso la progettazione di nuovi esperimenti.

Lo scontro scientifico tra Ostwald e Boltzmann raggiunse il suo apice in occasione del 67° congresso annuale dell'Associazione Tedesca degli Scienziati Naturali e dei Medici (Lubecca, 1895), dove Ostwald definì *ipotetico e persino metafisico* il materialismo meccanicistico, che per lui era *un puro e semplice errore*, suscitando la vivace opposizione di Boltzmann, Nernst, Klein, von Oettinger e Sommerfeld. Anche se Ostwald continuava ad utilizzare l'atomismo chimico, almeno in senso formale, come ipotesi che funzionava bene, la polemica continuò sulle pagine degli *Annalen der Physik und Chemie*, e si sviluppò principalmente attorno alla teoria cinetica e all'atomismo fisico, per i quali gli energitisti avevano previsto vita precaria. Intorno agli anni '70, la teoria cinetica dei gas, basata sulla concezione di una struttura discontinua della materia, aveva raggiunto un alto grado di formalizzazione, utilizzando metodi statistici per prevedere, a livello macroscopico, il comportamento del grandissimo numero di molecole che costituivano un gas. Nella prefazione al secondo volume delle *Lezioni sulla Teoria dei Gas* (Agosto 1898), Boltzmann ne dimostrò il contributo determinante alla formulazione delle equazioni di stato dei gas non ideali di van der Waals, alla scoperta di argon e neon da parte di Ramsay, ricordando come Smoluchowski avesse verificato la correttezza delle predizioni su base cinetica dagli aspetti altrimenti anomali della conduzione termica nei gas rarefatti. A tutto ciò andava aggiunta l'efficacia dell'atomismo chimico nel giustificare, sia le relazioni stechiometriche, che arcani fenomeni come l'isomeria strutturale e la stereoisomeria; nelle relazioni stabilite tra l'attività ottica e i modelli strutturali formulati per le diverse molecole, Ida Freund vedeva la prova più schiacciante di quanto valido e utile fosse stata l'introduzione nelle scienze di queste grandezze ipotetiche, l'atomo e la molecola.

I costituenti dell'atomo

Malgrado il pessimismo di Boltzmann, i suoi avversari si avviavano a una rapida sconfitta, travolti dagli avvenimenti scientifici, e ne erano, in larga parte, consapevoli. Già tre mesi dopo il congresso, Röntgen aveva scoperto i raggi X, cui si erano aggiunti, nel decennio successivo, la scoperta della radioattività (Becquerel), la determinazione del rapporto carica massa dell'elettrone (Thomson), l'identificazione di radio, polonio e attinio (Curie), la formulazione dell'ipotesi quantistica (Planck) e della teoria speciale della relatività e della emissione della luce da parte di Einstein, che studiò pure il moto browniano.

Il modello di atomo che si andava affermando in campo fisico era, però ben diverso da quello di Democrito, Newton e persino di Dalton, soprattutto perché era sempre più difficile conciliare la sua rigidità e la sua indivisibilità, non solo con la presenza di cariche elettriche al suo interno, ma anche con un numero crescente di fenomeni, come l'assorbimento e l'emissione di radiazioni tra stati energetici ben definiti. La scoperta delle particelle subatomiche, la formulazione della teoria dei quanti luminosi di Planck-Einstein, e la possibilità di osservare il movimento microscopico delle particelle colloidali, causato da processi cinetico - molecolari casuali, indebolirono le posizioni di energitisti e positivisti. Ostwald si convinse intorno al 1908, dopo gli studi di Einstein, Smoluchowski e Perrin sul moto browniano. Perrin utilizzò tredici metodi sperimentali diversi per determinare il valore del numero di Avogadro, ottenendo risultati consistenti e dimostrando che gli atomi e le molecole si potevano, addirittura, contare⁷². Pare che, ancora prima, Mach abbia ammesso l'esistenza degli atomi, dopo aver visto le macchie fluorescenti delle particelle alfa, ma questo aneddoto non trova riscontro nella sua successiva produzione scientifica.

La scoperta che gli atomi sono costituiti da parti più piccole e i tentativi di chiarirne la natura rappresentano uno degli aspetti più interessanti della Storia delle Scienze moderne, perché la conoscenza della struttura atomica ha consentito di comprendere meglio il comportamento delle sostanze chimiche e di descriverne in modo semplice e sistematico le proprietà, facilitando la memorizzazione di numerosi fatti chimici⁷³. La teoria del legame ha chiarito le modalità di combinazione degli elementi e come e in che misura essi vengano effettivamente modificati dall'interazione con gli altri costituenti all'interno delle molecole e, perché la molecola sia ben diversa dalla semplice somma delle proprietà dei suoi componenti, come aveva, in qualche modo intuito Aristotele.

Conclusioni

A conclusione di questa breve ricostruzione della lenta evoluzione delle teorie sulla struttura della materia, resta da chiedersi se la teoria atomica elaborata dai filosofi greci possa considerarsi precursore della sua versione moderna. Le risposte che oggi si danno non sono tutte concordi. Essa è certamente negativa se si tiene conto che l'atomo democriteo aveva un carattere puramente qualitativo, e la sua non dissociabilità e indivisibilità, punti fondanti delle teorie originali, sono ormai assolutamente inappropriate. Nella fisica e nella chimica moderna il termine atomo è usato con un significato diverso da quello originario, perché le più piccole particelle rappresentative degli elementi chimici sono sistemi composti da entità più piccole; è a queste che a buon diritto va riconosciuto lo status di particelle elementari.

72. G. Villani, rif [1], pag 151;

73. L. Pauling, *General Chemistry*, 3rd ed., Dover Publ. Inc., (1988), New York, 39;

La ricerca dei componenti ultimi della materia

Ai filosofi greci va tuttavia riconosciuto il merito di aver posto il problema della realtà della materia e della sua costituzione, e di aver cercato di risolverlo attraverso una riflessione razionale, senza perdere di vista la realtà osservabile. Democrito diede più enfasi all'aspetto strutturale (e per questo il suo modello rimase punto di riferimento per i fisici fino alla fine del XIX secolo), mentre Aristotele affrontò l'aspetto più propriamente chimico connesso alle trasformazioni che le sostanze subiscono quando si combinano.

Quello che gli atomisti greci non riuscirono a concepire fu l'esistenza di un livello intermedio tra quelle che potremmo chiamare entità elementari fondamentali e le entità elementari derivate. Sono queste ultime che noi chiamiamo atomi e sulle quali è fondata la chimica moderna, come testimoniato dalle affermazioni di Kekulé: *anche se il progresso scientifico porterà un giorno a una teoria sulla struttura interna della materia, questo farebbe poca differenza in Chimica, perché l'atomo chimico rimarrà sempre il suo mattone costitutivo*⁷⁴.

Questo significa che l'atomo è indivisibile al livello di complessità proprio della Chimica, mentre, ad altri livelli di complessità, l'indivisibile può, di volta in volta, essere un organismo, la cellula, il DNA, la cella cristallografica elementare. Per quanto riguarda il livello di complessità della Fisica, alla luce delle nostre attuali conoscenze, protoni e neutroni non possono più essere considerati indivisibili, mentre lo è ancora l'elettrone, anche se accompagnato da una moltitudine di altre particelle elementari.

Lo stesso dualismo atomi/vuoto, introdotto da Democrito, non può più sussistere; non solo il vuoto ha invaso gli atomi al punto da occuparne virtualmente l'intero volume, non solo si sono individuate svariate particelle elementari in reciproca interazione, ma persino le proprietà più intrinseche dell'atomo, come la sua spontanea emissione di radiazioni, sono condizionate dallo spazio vuoto che lo circonda. E questo non è più lo spazio libero nel quale gli atomi si trastullano, ma un vuoto attivo dal quale il mondo è stato creato *da una gigantesca fluttuazione originale* (qualunque cosa questo significhi) e alla cui evoluzione esso partecipa attivamente⁷⁵.

74. B. Pullman, rif [3], pag 333;

75. B. Pullman, rif [3], pag 352.

LA LEGGE DELLA “CONSERVAZIONE DELLE MASSE” DI LAVOISIER

Giovanni Villani

Istituto di Chimica dei Composti OrganoMetallici (ICCOM) – CNR, Pisa
villani@iccom.cnr.it

1. Introduzione

Lo scopo di questo lavoro è apparentemente limitato: proporre un cambiamento di dizione alla legge di Lavoisier della “conservazione della massa” che si dovrebbe chiamare legge di “conservazione delle masse”. In realtà, questa “piccola” modifica è possibile solo in una particolare ottica metascientifica e filosofica, dove il ruolo delle singole discipline è mutato e anche il loro rapporto è diverso da quello dell’ottica riduzionista, a lungo dominante. Come ho sottolineato altrove [1], nella seconda parte del XX secolo, sia in ambito strettamente scientifico sia negli ambiti di riflessione sulla scienza, si è sviluppato un nuovo paradigma scientifico/epistemologico, che abbiamo chiamato “complessità sistemica” per evidenziare le connessioni sia alle Scienze della Complessità sia alla Sistemica. Tutto questo, come vedremo, è implicito in questo piccolo cambiamento di nome della legge di Lavoisier, ma procediamo con ordine.

Per prima cosa mostreremo perché finora tale legge è stata chiamata legge della “conservazione della massa” (al singolare). L’esistenza di una massa come proprietà generale della materia implica, infatti, un’ottica scientifica, che chiameremo “fisica”, che ha svolto il ruolo di “quantificare” una materia indifferenziata qualitativamente. A tale ottica scientifica contrapporremo un’ottica “chimica” di una materia differenziata qualitativamente. La legge di Lavoisier si applica altrettanto bene sia all’ottica fisica (e quindi alla conservazione della massa) sia all’ottica chimica (e quindi alla conservazione delle masse) ed è lo stesso Lavoisier a esplicitarla in questo duplice modo. Va comunque detto che l’ottica chimica è più stringente dell’ottica fisica. In pratica, la conservazione delle masse è anche conservazione della massa totale e, quindi, conservazione della massa indifferenziata, mentre la sola conservazione della massa totale non implica ovviamente la conservazione di tutte le masse differenziate qualitativamente.

Un secondo punto da chiarire è che la legge a cui vorremmo cambiare nome è proprio quella enunciata da Lavoisier e questo ci consente di dire che l’ottica scientifica/filosofica della complessità sistemica nasce con quello che viene definito il “padre della chimica moderna” e, quindi, è un’ottica che nasce in ambito chimico. Altrove ho, infatti, definita la chimica “una scienza della complessità sistemica *ante litteram*” [1] e questo è un aspetto fondamentale della storia della scienza da mettere ben in evidenza e da valorizzare per i chimici e per la chimica tutta. È infatti opinione corrente che gli ambiti della Scienza della Complessità e della Sistemica si siano sviluppati nel XX secolo, dimenticando, quindi, l’apporto fondamentale della chimica ottocentesca.

Una volta accettata l’esistenza di un’ottica chimica della materia ne conseguono una serie di conseguenze prettamente scientifiche, alcune nel piano macroscopico della materia, altre in quel piano microscopico (atomico/molecolare) che la chimica dopo Lavoisier ha sviluppato, a partire da Dalton. In particolare, nel piano microscopico andremo a giustificare la “ipotesi atomica” proprio con la conservazione delle masse differenziate, mostrando, quindi, l’introduzione di un atomo non più “pezzo indifferenziato di materia” (un atomo alla democrito, per intenderci), ma tanti atomi differenti quanti sono gli elementi macroscopici. Indagando queste differenze storicamente è venuto fuori prima un atomo inquadrato nello schema (Tavola) di Mendeleev e poi l’atomo strutturato del XX secolo. Il concetto di struttura, una volta esteso dall’atomo alla molecola (da un punto di vista storico va notato che in realtà si procedette al contrario, prima la struttura molecolare e poi la struttura atomica), sarà il concetto chiave del mondo microscopico. Noi non andremo ad indagare questo aspetto essenziale della chimica perché ci porterebbe troppo fuori dello scopo che ci siamo proposti (cambiamento la dizione della legge di Lavoisier) e che, comunque, abbiamo trattato per esteso altrove[2,3]. Non bisogna comunque sottovalutare che è proprio il concetto di “struttura” a connettere la chimica alla Sistemica, e ad inserire la chimica tra le avanguardie culturali del nuovo paradigma della complessità sistemica.

Concludendo questa introduzione forse un po’ criptica (ma che si spera si chiarisca nel seguito del lavoro) esplicitiamo come intendiamo procedere. A questa Introduzione, faremo seguire un paragrafo che ci mostrerà sia l’importanza storica sia quella attuale del concetto di “massa”, inteso come “materia fisica”. Tale lunga dissertazione storico-filosofica serve a evidenziare l’importanza del cambiamento introdotto da Lavoisier. Il successivo paragrafo su Lavoisier servirà, infatti, a mettere in evidenza uno degli snodi concettuali più importanti della scienza moderna (il “nuovo concetto di elemento” e la sua legge di conservazione), nata con Galileo e, quindi, incentrata sulla fisica e sulla meccanica, in particolare. Proseguiremo poi con la differenziazione qualitativa del mondo atomico, concentrandoci principalmente su Dalton e sulla “risposta riduzionista” di Prout. Seguirà un paragrafo sulla Tavola periodica di Mendeleev ed uno sul nuovo concetto di elemento e di atomo all’inizio del XX secolo. Una Conclusione tirerà le fila di tutto il discorso.

2. Materia fisica: la massa

Il concetto di materia può essere fatto coincidere per lunga parte della storia del pensiero scientifico con il concetto di massa in ambito fisico e più in generale con quello di sostanza, portando all’apogeo della cosiddetta concezione sostanzialistica della materia. Infatti, il concetto classico di sostanza (ciò che esiste senza necessitare di alcuna altra cosa per la propria esistenza) di ambito metafisico diviene quello di “materia” come veicolo di qualità mutevoli, dai cui cambiamenti non viene modificata. La materia è, quindi, considerata qualcosa di assoluto – come lo è lo spazio e il tempo newtoniano, nei quali gli oggetti fisici si muovono senza generare azione su di loro – ma è anche, in virtù del principio stesso di questa intangibilità, qualche cosa di invariabile, immutabile ed eterna; è uno degli *invarianti* fisici per eccellenza. Ancora nel 1896 Charles de Freycinet affermava nei suoi saggi sulla filosofia delle scienze[4]: “Se dovessi definire la materia direi: la materia è tutto ciò che ha massa e tutto ciò che richiede una forza per acquistare movimento”. Nella scienza dell’Ottocento, e soprattutto in quella del Novecento, i due concetti di massa e materia hanno preso strade diverse e, per quello che a noi più interessa, accanto ad una materia che, guardata da un’ottica fisica, si presenta uniforme e non differenziabile qualitativamente si è affermata una materia che, in ottica chimica, è multiforme e differenziata qualitativamente.

Alcuni sostengono che la massa, come la temperatura ed altre grandezze fisiche, sia strettamente legata all’osservazione diretta e alla percezione sensoriale. Così, per esempio, Rudolf Carnap [5], in un’indagine sul significato empirico dei concetti teorici, parla di una “linea ininterrotta che prende l’avvio da termini strettamente connessi con l’osservazione, per esempio ‘massa’ e ‘temperatura’, e continua poi con termini meno immediati, come ‘campo magnetico’ e ‘funzione ψ ’”. Per quanto riguarda la “massa”, certamente nella fisica moderna, una tale caratterizzazione non è assolutamente giustificabile. Il concetto moderno di massa non ha una controparte sensoriale e neppure si rivela in modo diretto attraverso un qualsiasi esperimento concepibile. Tale concetto ha molte sfaccettature. Essa può presentarsi come “carica gravitazionale”, come inerzia o come energia, ma non appare mai ai nostri sensi nella sua identità libera e spoglia. Inoltre per la fisica moderna, la materia in quanto tale è necessariamente un residuo incompreso e incomprensibile nell’analisi scientifica e perciò stesso incommensurabile. Soltanto le qualità di cui gode sono, per così dire, suscettibili di valutazione quantitativa. Quindi poiché la quantità di materia viene sempre definita per mezzo della caratteristica quantitativa di una delle sue proprietà, questa determinazione dipenderà ovviamente dalla proprietà prescelta come criterio di misura. Nella fisica classica, ad esempio, è puramente accidentale che due diverse proprietà della materia, l’inerzia e la gravità, portino al medesimo risultato quantitativo. L’inerzia e la capacità termica, se fossero state scelte come criteri, avrebbero dato certamente risultati numerici diversi.

Il principio della permanenza della materia costituì uno dei fondamenti della teoria atomica di Democrito [460-370 a.C.], il quale affermava che nulla viene dal nulla e nulla ritorna nel nulla. Il principio di non creazione della materia è espresso dalla famosa, e spesso citata, affermazione di Lucrezio [I sec. a.C.], all’inizio del suo poema filosofico *De rerum natura* [6]: “Non nasce nulla dal nulla, mai, per volere divino”. Il secondo grande principio sostenuto da Lucrezio è l’indistruttibilità della materia, in quanto [7] “I corpi tutti ne’ suoi atomi poi la natura se li risolve di nuovo, non ne distrugge nessuno”. Per Lucrezio il peso poteva essere la misura della quantità di materia e al principio della sua indistruttibilità si sarebbe potuto dare un senso operativo, intendendolo come principio della conservazione del peso. L’idea della conservazione del peso, pur non essendo del tutto assente nell’antichità, rimase minoritaria ed essa non fu all’origine della formazione del concetto di “quantità di materia” in senso tecnico.

Nella teoria aristotelica, la trasformazione dei corpi per scambio degli opposti (caldo/freddo, secco/umido) era spiegata postulando l’esistenza di un substrato in cui potesse avere luogo tale scambio. Il substrato, costituente dei “corpi”, non era ritenuto del tutto privo di forma, essendo la sintesi di materia prima e di forma, quest’ultima denominata *forma corporalis*. La materia elementare, il substrato comune dei quattro elementi (acqua, aria, terra, fuoco), era, quindi, materia prima e forma corporea. Secondo Aristotele, la materia prima era priva di estensione, mentre la materia elementare (sostanza degli elementi) era estesa. A questo punto sorse il problema della relazione tra “forma corporea” ed “estensione”. La controversia sulla natura della forma corporea fu abbastanza importante per lo sviluppo del concetto di massa, ma non può essere seguita in dettaglio in questa sede. Tale controversia rifletteva, infatti, la tendenza generale a cercare qualche cosa, di diverso dall’estensione, per caratterizzare l’essenza della materia.

In conclusione, possiamo dire che il mondo antico non giunse a formulare il concetto di massa, né nel senso di *quantitas materiae* né nel senso di massa dinamica. Questo fu conseguenza dell’idea generale che la materia in sé stessa, non potesse essere descritta in termini quantitativi: concezione questa diametralmente opposta a quella della fisica moderna, il cui scopo è di ridurre le qualità a caratteri quantitativi e che non considera la quantità come un genere speciale di qualità (o forma). Questa fondamentale differenza nell’atteggiamento concettuale del pensiero antico rispetto alla scienza moderna spiega l’assenza del concetto di *quantitas materiae* nell’Antichità, rispetto all’importanza di questo concetto nella scienza galileiana/newtoniana.

La corrente di pensiero che emerse nell’alto Medioevo dalla fusione della filosofia platonica con quella ebraico-cristiana, il Neoplatonismo, si rivelò importante per lo sviluppo futuro del concetto di massa. In tale visione la natura della massa era fondamentalmente spirituale e immateriale. La filosofia neoplatonica degradò, quindi, la materia fino all’impotenza e tali filosofi la concepirono come “inerte”, cioè assolutamente priva di attività spontanea o “forma”.

L'idea di privazione, che in Aristotele era ancora neutra e indifferenziata, divenne distintiva di depravazione e di degradazione. Fu, tuttavia, proprio questo concetto neoplatonico di materia inerte, lentamente liberato dalle sue connotazioni negative, a diventare nel Seicento, alla nascita della meccanica, il carattere distintivo del comportamento della materia e, quindi, il fondamento del concetto di massa inerziale.

Il concetto di *quantitas materiae* naque tra il XIII ed il XIV secolo ad opera dagli Scolastici, dalle modifiche alla teoria aristotelica della materia e fu largamente utilizzato dalla scienza medievale. Per esempio Giovanni Buridano [8] [XIV secolo], nella teoria dell'*impetus*, nella spiegazione perché sotto l'azione di una stessa forza motrice un sasso andasse più lontano di una piuma, ammetteva che: "La causa di ciò risiede nel fatto che la ricezione di tutte le forme e disposizioni naturali si fa nella materia e in ragione della materia; perciò quanto più un corpo contiene di materia, tanto più, e più intensamente, può ricevere di quell'impeto. Ora, in un [corpo] denso e grave, a parità di tutto il resto, c'è più di materia prima che in uno raro e leggero". Il bisogno del concetto di quantità di materia per la formulazione di leggi fisiche era stato avvertito, quindi, già prima della nascita della meccanica moderna, ma il suo uso non era generale. Galileo [1564-1642], per esempio, nel *Saggiatore* [9] dice che: "Io dico che ben sento tirarmi dalla necessità, subito che concepisco una materia o sostanza corporea, a concepire insieme ch'ella è terminata e figurata di questa o quella figura, ch'ella in relazione ad altre è grande o piccola, ch'ella è in questo o quel luogo, in questo o quel tempo, ch'ella si muove o sta ferma, ch'ella tocca o non tocca un altro corpo, ch'ella è una, poche o molte, né per veruna immaginazione posso separarla da queste condizioni". In questo passo Galileo elenca le qualità primarie della materia: forma, dimensione, posizione, contiguità, numero, moto, qualità che sono tutte di carattere o geometrico (forma, dimensione, posizione, contiguità), o aritmetico (numero), o cinematico (moto). In questo elenco non compare alcun aspetto della materia che non sia geometrico-temporale. Fu soltanto Evangelista Torricelli [1608-1647] ad aggiungere a queste qualità primarie la "massa" come "dimensione", e ciò molto tempo dopo che Keplero [1571-1630] ne ebbe spiegato il concetto. Giorgio de Santillana [10] così descrive l'idea della massa in Galileo: "Esistono dunque proprietà matematiche inerenti alla materia, ma la massa, benché esprimibile in termini matematici, non è tra quelle, essendo essa un altro nome della materia, nome che la contraddistingue dalla materia astratta, cioè dalla geometria. Realtà fisica e massa sono due nomi per una stessa cosa dotata di movimento, mentre le forme geometriche ne sono prive. Ne consegue che la massa non può essere definita in termini di nessun'altra cosa: infatti essa è un *primum*". Esistono, tuttavia, alcuni brani di Galileo che possono dare l'idea di massa inerziale quando parla di *resistenza interna* al moto, per distinguerla da quelle esterne e accidentali. Tuttavia, la fisica di Galileo non elaborò una chiara formulazione di quello che si rivelò essere poi uno dei concetti basilari della fisica moderna: la massa inerziale.

Fu l'astronomia di Keplero a colmare questa lacuna, completando in tal modo la base su cui in seguito Newton avrebbe costruita la struttura della meccanica classica. Keplero diceva [11]: "Se nella materia di un globo celeste non ci fosse alcuna inerzia, che fosse per esso qualcosa di paragonabile al peso, non sarebbe necessaria alcuna forza per muoverlo; e, data una pur minima forza motrice, non vi sarebbe allora alcuna ragione per cui il globo non dovesse mettersi in movimento. Poiché tuttavia le rivoluzioni dei globi avvengono in un periodo determinato, che in un pianeta è più lungo e in un altro più breve, è chiaro che l'inerzia della materia non sta alla virtù motrice come il nulla a qualche cosa", e poi "L'inerzia, che si oppone al moto, è una caratteristica della materia, ed è tanto più forte quanto maggiore è la quantità di materia in un certo volume". Questa ultima affermazione è importante sotto il profilo storico perché collega la nozione degli Scolastici della *quantitas materiae* con il suo nuovo concetto di massa inerziale.

Secondo Cartesio [1596-1650] l'essenza della materia era l'estensione spaziale: la geometria e il principio di conservazione della quantità di moto (la *quantitas motus* cartesiana) regolavano il comportamento degli oggetti fisici. L'estensione era l'unico attributo essenziale della materia. I *Principia philosophiae* di Cartesio, che presentavano in modo sistematico le sue teorie scientifiche, ignoravano, infatti, totalmente la massa (quantità di materia) come proprietà intrinseca della materia. Per Cartesio la quantità di materia s'identificava con il volume. Il peso e la gravità erano aspetti puramente accidentali, generalmente non proporzionali alla quantità di materia.

La strada, che avrebbe condotto al concetto della massa inerziale, fu aperta dallo studio sulle forze centrifughe. Huygens [1629-1695] nel trattato *De vi centrifuga* studiò l'intensità della forza centrifuga di un corpo in rotazione o in rivoluzione. Nell'ipotesi che le particelle mobili si spostavano con uguale velocità, descrivendo cerchi di raggio uguale, egli concludeva che le forze centripete stanno fra loro come i loro "pesi" o le loro "quantità solide": $F_1:F_2=m_1:m_2$.

Molto importante, per la definizione del concetto di massa inerziale, fu poi lo studio sistematico dei fenomeni di urto dei corpi elastici e anelastici, svolto da Marci [1595-1667], Wallis [1616-1703], Wren [1632-1723] e Huygens. Va poi ricordato che nel 1671 Giovanni Richer fece l'importante scoperta che il peso di un corpo è funzione del luogo.

La concezione inerziale della materia di Keplero, le conclusioni tratte dagli esperimenti d'urto, la dinamica rotazionale, andarono a confluire nell'opera di Newton [1643-1727] e portarono alla sistemazione del concetto di massa. Newton, che usava di preferenza l'espressione *quantitas materiae*, o semplicemente *corpus*, in luogo di massa, ne definì il concetto nella I definizione dei *Philosophiae naturalis principia mathematica* [12]: "La quantità di materia è la misura della medesima ricavata dal prodotto della sua densità per il volume". Questa definizione è accompagnata dalla seguente spiegazione: "Aria di densità doppia, in uno spazio a sua volta doppio, diventa quadrupla; in uno triplice, sestupla. La medesima cosa si capisca per la neve e la polvere condensate per compressione e liquefazione. [...] In se-

guito indicherò questa quantità indifferentemente con i nomi di corpo o massa. Tale quantità diviene nota attraverso il peso di ciascun corpo. Per mezzo di esperimenti molto accurati sui pendoli, trovai che è proporzionale al peso, come in seguito mostrerò”. Nella III definizione, Newton descrisse la *vis insita*, ossia la forza insita della materia, intesa come “la sua disposizione a resistere; per cui un ciascun corpo per quanto sta in esso, persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme”. La spiegazione che segue a questa definizione è particolarmente importante in questo contesto [13]: “Questa forza è sempre proporzionale al corpo, né differisce in alcunché dall’inerzia della massa altrimenti che per il modo di concepirla. A causa dell’inerzia della materia, accade che ogni corpo è rimosso con difficoltà dal suo stato di quiete o moto. Per cui anche la forza insita può essere chiamata col nome molto espressivo di forza di inerzia. Il corpo, in verità, esercita questa forza solo nel caso di mutamento del suo stato per effetto di una forza impressa dall’esterno; e quell’azione è, sotto diversi rispetti, di resistenza e di impulso: di resistenza, in quanto il corpo per conservare il proprio stato si oppone alla forza impressa; di impulso, in quanto il medesimo corpo, poiché la forza di resistenza dell’ostacolo cede con difficoltà, tenta di mutare lo stato di quell’ostacolo. Comunemente si attribuisce la resistenza ai corpi in quiete e l’impulso ai corpi in moto; ma moto e quiete, come sono comunemente concepiti, sono distinti solo relativamente l’uno all’altro. Non sempre sono in quiete le cose che comunemente sono considerate in quiete”.

La definizione di massa data da Newton lascia immaginare che per l’autore la nozione di densità fosse primaria e anteriore al concetto di massa. Fattori di tale interpretazione furono Rosenberg [14] e Bloch [15]. Crew sostiene che al tempo di Newton la densità, sinonimo di peso specifico, la lunghezza e il tempo erano le tre dimensioni fondamentali della fisica. Quindi era naturale e logico definire la massa rispetto alla densità. Secondo Cohen l’interpretazione di Crew è conforme alla concezione atomistica per cui la proprietà fondamentale dei corpi è il numero di corpuscoli per unità di volume, o densità. Cajori fa comunque notare che alcuni brani del *Opticks*, Newton, per esempio affermava [16]: “Dio è in grado di creare particelle di materia di varia misura e figura, e in varia proporzione rispetto allo spazio e aventi forse diverse densità e forze”, dove per “forze” Newton intendeva *vis inertiae*.

La concezione newtoniana della materia era dominata da due nozioni fondamentali e distinte: la *quantitas materiae* e la *vis inertiae*. Newton pose come postulato una proporzionalità tra queste due caratteristiche fondamentali. Quindi, a differenza di quanto accadde nella cosiddetta “meccanica newtoniana”, la “massa inerziale” era una proprietà riducibile dei corpi fisici, dipendente dalla “quantità di materia”. La *quantitas materiae* era per Newton un concetto avente significato fisico e, poiché corpi di eguale volume possedevano in generale forze inerziali diverse, la loro “quantità di materia” doveva essere anch’essa diversa. Questo identificava un fattore “intensivo”, inteso cioè come indipendente dal volume, responsabile della differenza della *quantitas materiae* tra corpi aventi uguale volume e questo fattore doveva essere una proprietà anche della più piccola particella concepibile. Tale fattore, pensato in senso puramente intensivo e qualitativo e, a somiglianza della nozione di affinità nella chimica classica, irriducibile, era per Newton identificato con la “densità”.

Che la gravità o peso fosse proporzionale alla *quantitas materiae* per una data località venne dimostrato da Newton in una serie di esperimenti da lui descritti nel libro III, proposizione 6, teorema 6 dei *Principia*. Che peso e massa, nonostante la proporzionalità esistente tra loro, fossero concetti completamente diversi, fu infine dimostrato sperimentalmente da Giovanni Richer nel 1671. Incaricato dall’Accademia Francese di recarsi a Cayenna nella Guinea Francese allo scopo di eseguire osservazioni astronomiche e le relative misurazioni per determinare la parallasse solare, egli constatò che il suo orologio a pendolo ritardava di 2 minuti e mezzo al giorno rispetto all’ora solare media. Newton fa riferimento a queste osservazioni nei suoi *Principia* sotto il titolo “per determinare e confrontare il peso dei corpi nelle diverse regioni della terra”. Il “peso”, che dai tempi di Epicuro era stato generalmente considerato un attributo fondamentale e costitutivo della materia, si rivelò riducibile a massa e accelerazione. La quantità di materia, o massa, e il peso divennero da allora in poi due concetti distinti e diversi. La sistemazione newtoniana del concetto di massa, e la relazione di questo con il concetto di peso, furono essenziali per lo sviluppo della meccanica, della fisica e, più generalmente, della scienza. Nella meccanica la massa divenne la caratteristica fondamentale dei corpi e si identificò con il “corpo”. La definizione dei corpi fisici come masse fu la conquista preminente di cui necessitava la meccanica moderna.

Le conclusioni di Newton non furono comunque accettate da tutti. Leibniz [1646-1716], per esempio, divideva la materia in due. La *materia prima*, o *moles*, era un’astrazione; era il corpo concepito come ciò che puramente occupava spazio e che impediva ad altri corpi di occupare lo stesso luogo. Estensione e impenetrabilità erano i suoi attributi. La massa era riservata alla *materia seconda* e aggiungeva alla materia un’idea di attività; poiché la massa era in grado di opporre resistenza, anche se soltanto contro la variazione di moto, esse stessa doveva essere fonte di potenza, entità dinamica. La geometria da sola non riusciva a spiegare il comportamento spazio-temporale dei corpi interagenti. La massa inerziale diveniva così per Leibniz una necessità concettuale, che doveva essere postulata, in conformità con l’esperienza fisica, perché venisse garantita empiricamente la corrispondenza tra causa e effetto.

L’influenza del nuovo concetto di massa in chimica verrà trattato nel prossimo paragrafo, Qui diciamo solo che tale concetto di massa contribuì al declino dell’alchimia, favorendo l’ascesa della chimica quantitativa moderna. Si ricorderà, infatti, che per l’alchimia il “peso” era una proprietà accidentale della materia, di modo che un aumento di

esso non era necessariamente messo in relazione all'immissione di materia aggiuntiva. In altre parole, la *quantitas materiae* non mutava necessariamente se, per esempio, il piombo si trasformava in oro e aumentava di peso nel corso della trasmutazione. Gli alchimisti erano convinti che, con una piccola dose di *magisterium*, qualche libbra di piombo si potesse tramutare in centinaia di libbre d'oro. La pesata, come metodo sistematico della ricerca chimica e fisica, riuscì ad avere fondamento scientifico soltanto con Newton, in particolare dopo la proporzionalità da lui stabilita tra massa e peso.

Il problema della massa, e della sua relazione con l'energia, formò l'argomento principale di quattro pubblicazioni di Kant [1724-1804]. Nel primo di questi scritti (1747) *Gedanken von der wahren Schätzung der lebendigen Kräfte* (*Pensieri sulla vera valutazione delle forze vive*), Kant, dichiarando di seguire Aristotele e Leibniz, attribuiva a ogni corpo fisico forze intrinseche anteriori all'estensione spaziale. Diceva Kant che non vi sarebbe stato né spazio né estensione se le sostanze non avessero posseduto una forza con cui agire al di fuori di sé stesse. Senza una tale forza non vi sarebbe stata infatti connessione, senza tale connessione non vi sarebbe stato ordine e senza tale ordine non vi sarebbe stato spazio. Nella *Monadologia physica* Kant identificava l'impenetrabilità (Proposizione 8) e l'inerzia (Proposizione 11) della materia con forze a essa inerenti. Ciascun elemento di un corpo fisico possedeva una forza inerziale in grado diverso da elemento a elemento. Nel corollario 1 alla proposizione 11, Kant descriveva ancora la *vis inertiae* come un tipo particolare di *vis motrix*, e nel corollario 2 identificava la "massa" con l'intensità di questa forza. Nel *Neuer Lehrbegriff der Bewegung und Ruhe* (*Nuova dottrina del moto e della quiete*) (1758), tuttavia, Kant concludeva che la *vis inertiae* era un concetto fondamentalmente inutile e superfluo e nel *Die metaphysischen Anfangsgründe der Naturwissenschaften* (*Primi principii metafisici della scienza della natura*) respingeva integralmente il concetto newtoniano di *vis inertiae* perché una forza che di per sé non causi movimento, ma soltanto resistenza, era "una espressione priva di significato". In luogo della "forza di inerzia", Kant pose la "legge dell'inerzia", corrispondente alla categoria di causalità: ogni cambiamento nello stato di moto era prodotto da una causa esterna. La massa, che originariamente Kant aveva definito come l'intensità della "forza di inerzia" divenne allora la quantità di materia in un volume definito del corpo mobile, attiva in ogni sua parte contemporaneamente. Una tale definizione, non avrebbe avuto significato se non si fosse stabilito anche come misurare tale quantità. Nella proposizione 1 Kant dichiarava esplicitamente: "La quantità di materia, a somiglianza di ogni altra quantità, può venire misurata solo per mezzo della quantità di moto a una velocità data". Eliminando le metafisiche *vis insita* e *vis inertiae*, Kant aprì la via a uno studio di carattere più positivista del concetto di massa.

Come detto, la massa veniva intesa come sinonimo di "quantità di materia", ma senza che si specificasse tale quantità e senza che si fornisse alcuna interpretazione operativa. In pratica, nonostante la grande importanza di questo concetto, non se ne poteva dare alcuna definizione formale. In questa ottica, la *Mechanica* di Eulero [1707-1783] emerse per importanza poiché costituì la transizione logica dall'originale concezione newtoniana, basata sul concetto di *vis inertiae*, alla più moderna concezione astratta che intende la massa come coefficiente numerico, caratteristico dei singoli corpi fisici e determinato dal rapporto tra forza e accelerazione: la massa di un corpo è misurata dalla forza necessaria ad ottenere una certa accelerazione.

Un'altra via seguita per definire la massa era basata sull'assunto puramente concettuale che le particelle ultime costituenti tutte le sostanze fossero fondamentalmente uguali. In forza di questo assunto la massa di un corpo era definita semplicemente come il numero di queste particelle. Questa idea della materia che, come abbiamo visto, si può far risalire a Democrito è stata sempre, ed è ancora, implicita in buona parte della fisica. È proprio contro questa idea della materia che la differenziazione micro/macro, introdotta dalla chimica, rappresenta la controparte di sostanza e di immagine.

Un'ulteriore via seguita nella definizione della massa fu quella energetica di Wilhelm Ostwald [1853-1932]. Egli riteneva l'energia come prima e fondamentale nozione della fisica. La massa doveva perciò definirsi in termini di energia. Nelle sue lezioni sulla filosofia naturale Ostwald si chiedeva se l'energia cinetica di un oggetto fisico, a parte la sua dipendenza dalla velocità, fosse funzione di qualche ulteriore variabile [17]: "Questo carattere speciale, a parte la velocità, da cui dipende l'energia di un corpo in movimento è detto massa". La massa era, dunque, per Ostwald semplicemente una capacità di energia cinetica, come il calore specifico era una capacità di energia termica. La concezione di Ostwald della massa di un oggetto fisico in termini di energia e velocità, del suo volume in termini di comprimibilità e della sua forma in termini di elasticità costituì una delle ultime tappe della visione, iniziata con la filosofia di Locke, che avrebbe posto termine alla concezione sostanzialistica della materia. Ciò che cadeva sotto i nostri sensi non era più la "materia" vaga, e di per sé completamente indefinita, che i primi fautori della meccanica classica ritenevano di avere assoggetta a una precisa determinazione quantitativa con il loro concetto di *quantitas materiae* o di *vis inertiae*. Il substrato passivo e inerte delle proprietà dei corpi veniva ora messo da parte; l'oggetto era soltanto ciò che appariva essere: fonte di attività, di modi per colpire i nostri sensi.

La maggior parte delle assiomatizzazioni della meccanica adottarono la massa come concetto primitivo, in aggiunta alle nozioni non definite di posizione, tempo e punto materiale (o insieme di punti), mentre altri concetti, come forza o momento, essendo non osservabili, dovevano essere nozioni definibili. Hans Hermes, invece, definì il concetto di massa, cioè specificò un procedimento per associare ad esso un numero positivo, in funzione di due particelle. Il sot-

tofondato epistemologico di questo modo di procedere era che, la fisica non era niente altro che un elenco di condizioni e specificazioni mediante le quali a certe operazioni o osservazioni venivano associati dei numeri e l'oggetto della ricerca era la dipendenza funzionale fra questi numeri. Il significato fisico di un concetto si riduceva, quindi, alle relazioni matematiche fra il numero associato al concetto e i numeri associati ad altri concetti o fenomeni. Per esempio, la concezione machiana della massa, come grandezza matematica, si riduceva a grandezza che [18]: “semplicemente soddisfa un'importante equazione”, ma i tentativi di formalizzazione della meccanica newtoniana con una precisa ed esplicita definizione di massa non ebbero successo. Questo perché tali definizioni dovevano o essere basate sul concetto di forza, assunto come concetto primitivo, o presupporre una certa legge dinamica che, esplicitamente o implicitamente, contenesse di nuovo la nozione di forza (senza contare la difficoltà connessa con la scarsa determinabilità di un sistema inerziale appropriato). È, quindi, giustificata l'osservazione di Whitehead secondo cui [19]: “noi otteniamo la nostra conoscenza delle forze mediante qualche teoria sulle masse, e la nostra conoscenza delle masse mediante una qualche teoria sulle forze” e continua dicendo che, data questa situazione, non insisterà oltre su definizioni esplicite del concetto di massa *prima* della costruzione della teoria, ma piuttosto prenderà atto del suo significato *all'interno* delle differenti teorie.

La definizione prerelativistica del concetto di massa inerziale è parte integrante della teoria dei fenomeni fisici nel suo complesso; così la determinazione sperimentale della massa relativistica è correlata assai strettamente con un vasto insieme di operazioni e interpretazioni e non deve essere considerata un fatto isolato. Nella meccanica relativistica, accettata l'interpretazione corretta che al crescere della velocità cresce la massa è evidente che ci è del tutto preclusa, come avveniva anche per la teoria elettromagnetica della materia, qualsiasi associazione col concetto che storicamente ha preceduto quello di massa, ossia la *quantitas materiae*. In caso contrario si dovrebbe concludere che il moto crea materia, risultato che fu vivamente respinto già nel 1639 da Boulliau [20].

La teoria della relatività, e le convalide della fisica nucleare, modificarono sostanzialmente il concetto di massa. In primo luogo la dinamica relativistica, riconoscendo la variabilità della massa propria nei processi d'interazione fra le particelle di un sistema, invalidava la legge di Lavoisier. È interessante notare come, alla fine del XIX secolo, parecchi anni prima dell'introduzione della relatività, la validità rigorosa di questa legge fosse già stata posta seriamente in dubbio. D. Kreichgauer fu forse il primo, in seguito a certi esperimenti su reazioni attinenti al mercurio, al bromo e allo iodio, a esprimere, dei dubbi sull'esattezza della legge di Lavoisier. Non molto tempo dopo, H. Landolt iniziò una serie di esperimenti sulla riduzione del solfato d'argento, nel corso dei quali ritenne di aver trovato differenze percettibili fra le masse prima e dopo la reazione. Egli sostenne tenacemente che tali differenze erano superiori all'errore attribuibile ai suoi metodi di pesata. Più tardi si comprese che i procedimenti di pesata erano affetti da un'imprecisione, dovuta alla spinta dell'aria e originati dalla dilatazione termica dei contenitori dei campioni provocata dal calore di reazione. Oggi sappiamo con certezza che nessun procedimento ordinario di pesata è anche oggi abbastanza sensibile da rivelare la variazione di peso, e quindi di massa, corrispondenti al calore di reazione di una reazione chimica. Quindi, i sospetti sorti intorno alla legge di Lavoisier sul volgere del secolo XIX furono dovuti ad errori strumentali e di metodo. Tuttavia, tali studi ebbero il merito di mettere in questione la necessità *a priori* della legge di Lavoisier. Wilhelm Ostwald nel 1901 osservò, riferendosi alla legge di Lavoisier [21]: “Che questa legge sia rigorosamente valida non si può affermare a priori. I vari tentativi di presentare la legge come una necessità logica – come fece anche, tra gli altri, un profondo pensatore quale Schopenhauer – ricordano la prova ontologica. La linea di pensiero è infatti questa: la materia è concepita come veicolo immateriale di qualità variabili; pertanto la massa, essendo una proprietà fondamentale della materia, dev'essere essa stessa immutabile. Nello stesso modo si potrebbe allora dimostrare la paradossale affermazione che la materia non può cambiare di luogo, poiché anche l'occupare spazio è una proprietà fondamentale della materia”.

Dopo le modifiche al concetto di massa introdotte dalla Meccanica Relativistica, il problema concettuale che si pose era se le due entità interscambiabili di massa ed energia non fossero state in realtà la stessa cosa. Quella che era comunemente ritenuta un'equivalenza non era, forse, un'identità? E di conseguenza “massa” ed “energia” non erano solamente due sinonimi della stessa realtà fisica? La risposta che la fisica moderna ci dà è senza dubbio la seguente: la massa e l'energia sono identiche, esse sono due sinonimi dello stesso substrato fisico. Tuttavia la natura non esplica sempre tutte le sue possibilità teoriche. Nella grande maggioranza dei processi fisici noti – a parte i fenomeni nucleari e i processi d'interazione delle particelle fondamentali – la massa di un corpo e la sua energia si conservano separatamente. La natura si comporta abitualmente come se esistessero due leggi di conservazione. Poiché la parte predominante della massa-energia di un corpo spetta alla sua componente passiva (massa) e solo una frazione estremamente piccola a quella attiva (energia), l'insufficiente sensibilità dei procedimenti di pesata simula una conservazione della massa, e allo stesso modo, i metodi calorimetrici, e altri analoghi procedimenti, simulano una conservazione dell'energia, cosicché, da un punto di vista pratico, il mantenimento della distinzione prerelativistica fra massa ed energia sembra in qualche misura giustificato. Si deve però tenere presente che la ripartizione della massa-energia in una parte attiva e una passiva dipende dalle circostanze. Nelle reazioni chimiche ordinarie, l'energia dei gusci elettronici interni fa parte – insieme con l'energia intranucleare – della componente passiva, mentre nei processi che avvengono ad alta temperatura (quando la ionizzazione degli atomi è completa) essa fa parte della componente attiva.

Nelle reazioni nucleari che comportano riordino di nucleoni, l'energia intranucleare diviene parte della componente attiva, mentre le masse proprie dei nucleoni appartengono ancora alla parte passiva. Infine, nella fisica delle particelle elementari, la distinzione fra massa ed energia perde ogni significato, poiché tali particelle possono trasformare le loro masse o totalmente o per niente in energia. La differenziazione prerelativistica fra massa ed energia (considerate due categorie fondamentalmente distinte) ha anche radici nella natura fisiologica/biologica del corpo umano. La sensibilità del corpo umano relativamente alla percezione di energia, come la radiazione elettromagnetica nel caso della vista o le vibrazioni acustiche nel caso dell'udito, è molto maggiore della sensibilità rispetto alla percezione della massa, cioè della risposta agli effetti inerziali o gravitazionali delle masse. Si può dimostrare che l'apparato sensoriale umano è 10^{32} volte più sensibile alla percezione dell'energia che alla percezione della massa.

In conclusione possiamo dire che una caratteristica essenziale del meccanicismo fu la cosiddetta concezione "sostanzialistica" della materia. La scienza e, più in generale, la filosofia meccanica del XVIII e XIX secolo, fu dominata da questa concezione della materia che affermava che gli oggetti materiali erano dotati di un substrato sostanziale che fungeva da base di tutte le proprietà. Tale substrato era considerato assoluto, poiché non subiva l'influenza del mutare delle qualità sensibili dei corpi, assoluto in quanto sistema inerziale della trasformazione di tutti gli oggetti materiali, dei quali non subiva l'azione. La conservazione nel tempo dell'identità degli oggetti fisici, nonostante il costante mutamento delle qualità sensoriali, era affidata alla sostanzialità della materia. L'idea di spiegare il mutamento in termini di un immutato substrato sottostante aveva, però, come controparte che tale sostanza era non conoscibile perché trascendeva la nostra esperienza. Con l'affermarsi della nozione di massa inerziale, queste considerazioni metafisiche parvero acquistare base scientifica nel principio della conservazione della massa. L'idea che la quantità di materia fosse conservata nel corso della storia di un sistema fisico si trovava già, come presupposto implicito, nei *Principia* di Newton. Kant ne sottolineò l'importanza metodologica e l'assunse come postulato. In effetti, essa era considerata essenzialmente una riaffermazione dell'antica nozione dell'indistruttibilità e della non-creazione della materia, come l'avevano espressa i primi atomisti. Le conclusioni che si possono ottenere dalla fisica contemporanea sembrano andare, anche se in maniera non lineare, verso un ridimensionamento del concetto di massa e verso una sua fusione con altri concetti, come l'energia. Interessante è anche notare il tentativo di ridurre la massa ad una caratteristica dello spazio (curvatura) e l'equivalenza che si viene a creare tra la fisica, che si occupa di corpi dotati di massa, e la geometria, che si occupa dello spazio. Per molti fisici e, di seguito, per molti epistemologi, il ridimensionamento, se non la scomparsa, del concetto di massa è anche un ridimensionamento del concetto di materia.

3. Differenziazione qualitativa della materia macroscopica. Lavoisier: il concetto di elemento e la sua conservazione nelle reazioni chimiche

Il concetto di elemento risale alla filosofia greca e si riallaccia all'idea riduzionista che vi era una sola (o poche) sostanza elementare [22]. Nella visione aristotelica era stata inglobata la teoria dei quattro elementi (acqua, aria, terra e fuoco) di Empedocle e, quindi, tramite Aristotele, la teoria dei quattro elementi aveva superato il medioevo ed era del tutto attuale fino a tutto il Settecento. È alla fine del Settecento che Lavoisier impose una nuova concezione di elemento (e con la sua definizione ne trovò ben 33) compiendo in questo modo il primo ed essenziale passo verso la direzione lungo la quale si muoverà la chimica successiva. Il passaggio dai quattro ai trentatré elementi creò, infatti, una discontinuità epistemologica. Quattro elementi potevano rientrare nella logica riduzionista del "pochi", trentatré elementi andavano oltre e configuravano un mondo spiegato con "molti" elementi [23].

Un primo passo in questa direzione fu compiuto nel 1781 quando Lavoisier confermò alcune esperienze di altri chimici che bruciando l' "aria infiammabile" (o idrogeno, in dizione moderna) in presenza dell' "aria pura" (o ossigeno) si formava l'acqua pura. Questa era stata già ottenuta da Cavendish, ma interpretata secondo la teoria flogistica. Infatti, l'idrogeno in quella teoria era considerato come acqua satura di flogisto e l'ossigeno acqua deprivata di flogisto. Quando queste due sostanze erano messe insieme, il prodotto era l'acqua, che rimaneva per Cavendish una sostanza semplice. Per Lavoisier, invece, l'idrogeno e l'ossigeno erano elementi chimici e, quindi, l'acqua diveniva un composto. Quest'ultima, dunque, non era una sostanza semplice, come si era sempre ritenuto, e portatrice della qualità della liquidità, ma un composto di due sostanze ancora più semplici, già ricavate per altre vie. La cosa più impressionante di questa scoperta era che la formazione dell'acqua era il risultato della reazione di due corpi semplici che possedevano separatamente proprietà assai diverse dal prodotto finale: l'acqua, liquida, era un composto di due sostanze altamente infiammabili e gassose.

La sensazionale scoperta che l'acqua era un ossido fu storicamente decisiva nella campagna condotta da Lavoisier contro il concetto di flogisto e in favore di un concetto positivo della combustione, come una reazione chimica in cui si combina l'ossigeno. Con l'ossigeno di Lavoisier si costituì un principio nuovo [24]; infatti, pur essendo una sostanza semplice (tipo principio fisico), era isolabile sperimentalmente (tipo principio chimico). Quest'apporto del chimico francese è uno degli aspetti più importanti della sua rivoluzione chimica e segnò il declino definitivo dei principi tradizionali.

Nel 1783 da Lavoisier partì un attacco frontale alla teoria del flogisto [25]: «I chimici hanno fatto del flogisto un principio vago, di cui danno una definizione niente affatto rigorosa, che perciò si adatta a qualsiasi spiegazione che pas-

si loro per la testa. Una volta questo principio ha un peso, e un'altra è senza peso; ora è fuoco puro e semplice, e ora è fuoco combinato con l'elemento terra; una volta può penetrare attraverso i pori di un recipiente, e un'altra volta i corpi sono impenetrabili ad esso. Può spiegare la causticità e contemporaneamente il suo opposto, la traslucidità e l'opacità, i colori e l'assenza di colori; è veramente proteiforme, e cambia ad ogni istante. È giunto il momento di portare la chimica ad un maggiore rigore razionale: è tempo di rimuovere tutto ciò che è meramente sistematico o ipotetico dalla quantità di fatti, cui ogni giorno questa scienza va aggiungendo qualcosa: è tempo, in breve, di rendere evidente lo stadio che hanno raggiunto le conoscenze di chimica, in modo che coloro che ci seguiranno potranno cominciare da quel punto per avanzare con sicurezza per il progresso della scienza».

È nel *Traité élémentaire de chimie* del 1789 che la trasformazione del concetto di elemento giunge a compimento. Vale la pena evidenziare il passo di Lavoisier più chiaro a tale proposito perché, a nostro avviso, questo è uno dei momenti cruciali, non solo per la chimica, ma per l'intera costruzione concettuale della scienza. Lavoisier dice che [26]: “se con il termine *elementi* vogliamo indicare gli atomi semplici e indivisibili di cui è costituita la materia, allora è molto probabile che non sappiamo praticamente nulla di essi; ma se usiamo il termine *elementi*, o *principi dei corpi*, per esprimere la nostra idea del limite cui possiamo arrivare con la nostra analisi, allora dobbiamo includere fra gli elementi tutte le sostanze in cui siamo capaci di scomporre, con qualsiasi mezzo, i corpi”. Poi Lavoisier continua dicendo che non possiamo certo assicurare che tali sostanze non siano a loro volta costituite da due o più elementi; ma poiché questi elementi sono inseparabili (o meglio non abbiamo i mezzi per separarli) essi si comportano ai nostri occhi come sostanze semplici, e non dobbiamo pensarle come composte finché l'esperienza e l'osservazione non ce ne forniscano la prova. Va notato che Lavoisier per ottenere lo storico risultato di un nuovo concetto di elemento deve scindere i due livelli di complessità della chimica, quello macroscopico, e sperimentalmente indagabile, da quello microscopico, e solamente ipotetico. Sarà, come vedremo nel prossimo paragrafo, Dalton a ricomporre i due piani di spiegazione, pochi anni dopo.

Lavoisier, sempre *Traité élémentaire de chimie*, assunse anche che la legge della conservazione della massa si applicava pure alle reazioni chimiche e questo rafforzò la nuova concezione di elemento. Il chimico francese affermò che nel corso di reazioni naturali o artificiali nulla si creava, e si poteva considerare un assioma che in ogni reazione la quantità iniziale di materia era uguale alla quantità finale. Vediamolo con le parole di Lavoisier [27]: “Nulla si crea, nelle opere dell'arte come in quelle della natura, e si può affermare in principio che, in ogni operazione, c'è la stessa quantità di materia, prima e dopo; che la quantità e la qualità dei principi sono le stesse e che ci sono solo dei cambiamenti, delle modifiche. È su questo principio che si fonda tutta l'arte di fare esperimenti in chimica: in ognuno si è costretti a supporre una vera uguaglianza o equazione”.

Nell'analisi delle parole di Lavoisier quasi sempre ci si ferma alla prima parte che è incentrata sul concetto di “quantità di materia” (e si è già visto come questo fosse sinonimo di “massa”) e sulla sua conservazione nelle reazioni chimiche. In verità Lavoisier, dopo il punto e virgola, continua con affermazioni fondamentali, forse anche più importanti di quelle della prima parte della citazione. Il dire che “la quantità e la qualità dei principi” (e si ricordi che “principio” è sinonimo di “elemento”) si conserva, non solo rafforza la legge di conservazione della massa, ma la dettaglia e l'arricchisce: si conserva la massa e si conservano le singole differenze qualitative e quantitative. Questa è la motivazione che ci spinge a chiedere il cambiamento di nome per la Legge della Conservazione della Massa di Lavoisier. Su questo punto torneremo nella Conclusione.

Lavoisier portò l'esempio della fermentazione vinosa, in cui il peso o la massa dei materiali presenti, acqua, zucchero, ecc. prima della fermentazione era uguale al peso dei componenti dopo che la reazione era avvenuta (liquido residuo e anidride carbonica gassosa). Il principio fu prontamente accettato dai primi fautori della chimica moderna e furono studiate quantitativamente molte altre reazioni chimiche ricorrendo all'uso della bilancia. Nel frattempo era diventato ormai noto che il peso variava in funzione del luogo. Era chiaro, quindi, che nelle operazioni chimiche si conservava in realtà la massa e non il peso. Inoltre, poiché la massa era la caratteristica universale che si conservava dei corpi fisici, il concetto di massa fu identificato, a tutti gli scopi pratici, con quello di sostanza, portando all'apogeo la concezione sostanzialistica della materia.

4. Differenza qualitativa della materia microscopica: l'atomismo scientifico

La visione atomica della materia, anche dopo la sua “riscoperta” in epoca rinascimentale, era rimasta a lungo inapplicabile al campo chimico. Due erano i motivi, uno pratico l'altro concettuale, che si frapponevano al concreto utilizzo di tale ipotesi in chimica. Partiamo da quello pratico. Gli atomi non erano “rivestiti” di numeri, non esisteva una qualche loro proprietà quantificabile e, quindi, anche i chimici che accettavano l'ipotesi atomica (si parla di “ipotesi” proprio per la mancanza di dati concreti di laboratorio), la utilizzavano come “quadro concettuale”, ma mai allacciavano ad essa “concreti risultati”. L'aspetto concettuale della visione atomica classica che più si scontrava con la teoria e la pratica chimica era, invece, rappresentato dall'uniformità qualitativa degli atomi. Gli atomi democritei, quelli di Gassendi, quelli di Boyle o quelli di Newton erano tutti qualitativamente simili, o meglio non avevano altre qualità che quelle quantitative della forma, della dimensione e del movimento. Era, invece, ben noto che la materia chimica si comportava in maniera qualitativamente differenziata. Ogni sostanza aveva “simpatia” per alcune e “antipatia” per altre

sostanze. Come queste differenze qualitative si trasformassero in quelle quantitative a livello microscopico non era per niente chiaro.

Le questioni aperte per trasformare l'ipotesi atomica in teoria atomica furono risolte da Dalton e questo spiega perché, nonostante non sia stato l'inventore dell'ipotesi atomica in chimica, questo autore sia ricordato come il "padre" dell'atomistica chimica. È solo quando si trovò il modo di *misurare* (ovviamente in modo indiretto) delle proprietà atomiche, e tale proprietà con Dalton sarà il peso, che l'ipotesi atomica diventerà un banco di prova scientifico e non una precondizione filosofica. È solo quanto si trovò il modo di *differenziare* oltre che le sostanze macroscopiche anche quelle microscopiche, e anche questo fu opera di Dalton, cioè quando si posero le basi per andare oltre il riduzionismo da sempre implicito nell'ipotesi atomica, solo allora la teoria atomica cominciò ad avere reale effetto in chimica. Quando J. J. Berzelius [1779, 1848], da un breve riassunto di Wollaston in Nicholson's Journal, seppe della teoria atomica di Dalton (solo nel 1812 ricevette dallo stesso Dalton una copia del *New System*) capì immediatamente [28] che un'interpretazione corpuscolare delle regolarità analitiche era "il più grande passo che la chimica aveva fatto verso la sua completezza come scienza". Infatti, come abbiamo detto, la definizione di elemento chimico data da Lavoisier aveva volutamente separato il piano macroscopico, determinabile sperimentalmente, da quello microscopico. Fu Dalton a rimuovere questa separazione costituendo, di fatto, l'aspetto caratterizzante della spiegazione chimica: la compresenza del piano microscopico e di quello macroscopico, atomi ed elementi, molecole e composti, ambedue i piani qualitativamente differenziati [29].

Fu lo stesso Dalton, probabilmente sbagliando anche le date, a raccontarci come gli era venuta in mente l'idea che gli atomi potessero essere di differente "grandezza" [30]: "considerando ulteriormente questa questione mi è venuto in mente che non avevo mai tenuto conto dell'influenza della differenza di grandezza delle particelle dei fluidi elastici [...] Questo pensiero mi è nato nel 1805. Presto ho potuto stabilire che le grandezze delle particelle dei fluidi elastici debbono essere diverse [...] Dopo che fu riconosciuta tale differenza di grandezza delle particelle per i fluidi elastici presi nelle stesse condizioni di temperatura e di pressione, sorse il problema di definire le loro grandezze e pesi relativi, come pure il numero relativo degli atomi contenuti in un determinato volume [...]. Così è stata preparata la strada per la determinazione del *numero* e del *peso* di tutte le sostanze chimiche elementari che entrano tra loro in combinazione di vario genere". In tal modo Dalton giunse all'idea originale che gli atomi dei differenti elementi chimici erano diversi in peso tra loro e che ogni elemento era costituito da atomi identici. Dalton introdusse, quindi, una nuova concezione di massa chimica esprimendola con il peso atomico dell'elemento. Il 6 settembre 1803 apparve nel suo giornale di laboratorio la prima tabella dei pesi atomici. Inoltre la teoria dell'esistenza di pesi atomici diversi portò Dalton alla scoperta della legge delle proporzioni multiple da cui discesero due importanti conseguenze: la prima era che la composizione dei composti chimici aveva carattere discontinuo e poi che i rapporti quantitativi degli elementi che formavano diverse combinazioni con un altro elemento erano dati da rapporti tra numeri interi.

La teoria di Dalton implicava quattro assunzioni, ragionevoli, ma di base.

1. Tutti i materiali erano costituiti di atomi solidi e indivisibili. Diversamente dalle particelle elementari di Newton o di Priestley, gli atomi di Dalton non contenevano spazio vuoto interno. Essi erano completamente incompressibili. Tuttavia, accettando il modello calorico di Lavoisier, essi erano circondati da un'atmosfera di calore, differente per i diversi stati di aggregazione (solido, liquido e gassoso) della materia.
2. Gli elementi chimici, e quindi gli atomi che li componevano, erano aggregati in maniera diversa, ma non distrutti nelle reazioni chimiche. Se, infatti, non si fosse assunta questa legge di conservazione degli atomi e degli elementi, la trasmutazione degli elementi, cercata dagli alchimisti e dai primi chimici, sarebbe stata possibile.
3. Vi erano tanti tipi differenti di atomi quanti erano gli elementi chimici. Diversamente da tutta la tradizione atomistica precedente per Dalton non esisteva una sostanza primaria e uniforme, base comune di tutta la materia.
4. Si poteva determinare il peso atomico relativo con particolari tecniche sperimentali; acquistava quindi esistenza realmente scientifica quella che, fino a questo momento, era stata l'*ipotesi atomica*.

Le prime tre tesi portarono Dalton completamente al di fuori della tradizione chimica precedente. Questa ultima aveva sempre enfatizzato che alla base della diversità qualitativa della materia esistesse una sostanza unica. È questo un momento fondamentale per la nascita della chimica come noi la intendiamo. Abbiamo visto che Lavoisier aveva riconosciuto l'intrinseca differenza qualitativa della materia macroscopica, ricavandone l'indicazione dell'esistenza di molti elementi, cioè sostanze non ulteriormente decomponibili. Abbiamo anche visto che lo stesso Lavoisier aveva staccato questa diversità macroscopica, accertabile empiricamente, dalla sua base teorica microscopica. È con Dalton, e con le sue prime tre assunzioni, che si completa il processo di inclusione dell'aspetto *qualitativo*, sia macroscopico sia microscopico, nella chimica. Diceva Dalton [31]: "Alcuni filosofi hanno immaginato che tutta la materia, per quanto dissimile, è probabilmente la stessa cosa, e che la grande varietà delle sue sembianze si origina da certe proprietà che le vengono conferite e dalla varietà di combinazioni e arrangiamenti di cui è suscettibile [...]. Secondo me esiste un considerevole numero di quelle che possono essere chiamate particelle *elementari*, che non possono andare incontro a

La legge della “conservazione delle masse” di Lavoisier

metamorfosi l’una nell’altra”. Con la quarta ed ultima assunzione si trovava la via sperimentale per *misurare* gli atomi che da questo momento diventavano oggetti non dissimili dagli oggetti macroscopici e, quindi, suscettibili di “analisi scientifica”.

Sebbene basata su semplici assunzioni, la teoria di Dalton non era semplice da accettare e oggi, con la critica della visione riduzionista, se ne capisce il perché. In particolare l’ipotesi di esistenza di tanti tipi diversi di atomi, quanti erano gli elementi chimici, creava l’esistenza di circa cinquanta atomi diversi. Molti chimici ritenevano impossibile che Dio si fosse servito di cinquanta differenti tipi di blocchi per la sua costruzione del mondo. Ancora nel 1864 Lothar Meyer [1830-1895] diceva che [32]: “L’esistenza di sessanta e più forme di materia primordiale interamente differenti è improbabile; la conoscenza di certe proprietà degli atomi, specialmente le relazioni esibite dai pesi atomici di elementi differenti, renderebbe tutto ciò altamente improbabile”. Vi era scetticismo che Lavoisier avesse realmente identificato delle sostanze elementari, e che, quindi, gli atomi sovrapposti a tali sostanze da Dalton fossero realmente diversi. Tale scetticismo si rinforzò con i lavori sperimentali di Davy che mostrò che alcuni elementi di Lavoisier non erano tali. Come conseguenza di ciò molti chimici del XIX secolo si rifiutavano di chiamare tali sostanze “elementi” e preferivano usare la circonlocuzione “corpi non decomposti”. In molte occasioni Davy diede per implicito che i “corpi non decomposti” contenevano elementi più semplici, per esempio idrogeno.

Questo atteggiamento fu di stimolo a William Prout [1785-1850]. Egli notò che i pesi atomici di molti elementi erano quasi esattamente multipli di quello dell’idrogeno e quindi suppose che gli atomi pesanti fossero formati dall’aggregazione di più atomi di idrogeno. In altre parole, se il peso atomico del cloro era 36 (assumendo per l’idrogeno peso atomico 1), questo indicava che 36 atomi di idrogeno si erano condensati per formare questo atomo. Prout aveva così trovato la sostanza unica e uniforme che componeva tutta la materia: l’idrogeno. Le due assunzioni: i pesi atomici (rispetto all’idrogeno assunto come unità di misura) sono interi e l’idrogeno è l’unica sostanza elementare costituiscono la cosiddetta “ipotesi di Prout”.

In realtà [33], a partire dalla metà dell’Ottocento, la battaglia per affermare l’esistenza di una “materia prima”, dalla condensazione della quale avevano avuto origine tutti gli atomi degli elementi, vedrà come stratega principale, un chimico importante J. Dumas [34],*: “Così ci troviamo di fronte due opinioni. Una, che sembra esser stata seguita da Berzelius, conduce a considerare i corpi semplici della chimica minerale come esseri distinti, indipendenti gli uni dagli altri, le molecole dei quali non hanno niente di comune, se non la loro fissità, la loro immutabilità, la loro eternità. Si avrebbero tante materie distinte per quanti sono gli elementi chimici. L’altra, al contrario, consente di supporre che le molecole dei diversi corpi semplici attuali potrebbero essere costituiti proprio dalla condensazione di una materia unica, come per esempio l’idrogeno, accettando tuttavia, ben inteso, come vera la relazione osservata dal Dr. Prout e anche come fondata la scelta della sua unità. Questa condurrebbe all’ammissione che quantità simili di questa materia unica potrebbero, mediante arrangiamenti differenti, costituire elementi o radicali dello stesso peso, ma dotati di proprietà distinte [...]. Infine, grazie alla loro presunta composizione, essa assimilerebbe i radicali supposti semplici della chimica minerale ai radicali composti della chimica organica la cui costituzione è conosciuta; i primi, tuttavia, differiscono dai secondi per una stabilità infinitamente più grande e tale che le forze di cui la chimica dispone oggi sarebbero insufficienti ad operarne lo sdoppiamento”. L’adesione di Dumas alla ipotesi di Prout, quindi, e l’analogia fra radicali organici e corpi semplici, nasceva dalla constatazione che i radicali organici (per esempio il radicale cianidrico -CN) si comportavano come se fossero degli enti dotati di una propria individualità chimica, relativamente irriducibile. Essi, quindi, pur essendo composti, erano assimilabili agli elementi, nell’ambito della reattività chimica più comune. Da qui l’idea che anche i corpi semplici ed elementari (all’epoca in numero di 60) non fossero altro che radicali composti di una sostanza ancora più elementare che al momento non era stato possibile ricavare per via analitica.

L’ipotesi di Prout che riguardava il peso atomico poteva essere soggetta a sperimentazione. Quando si trovò che non era vera non per questo si abbandonò l’idea di Prout. Diceva, infatti, Dumas [35]: “Siccome la legge di Prout non è confermata nella sua espressione assoluta, e siccome gli equivalenti dei corpi semplici non sono tutti multipli di quello dell’idrogeno secondo un numero intero, bisogna concluderne che Prout ha scritto nella storia della scienza una illusione e non una verità? Questa non è la mia opinione. Prout aveva riconosciuto:

1. che gli equivalenti dei corpi semplici comparati a una certa unità si rappresentavano per mezzo di numeri interi;
2. che questa unità sembrava essere l’idrogeno, vale a dire il corpo il cui peso equivalente finora è il più leggero.

A mio avviso la prima parte della legge di Prout rimane sempre vera. Gli equivalenti dei corpi semplici sono tutti multipli secondo un numero intero di una certa unità; solo che [...] questa unità per il cloro, il bario, il manganese, il cobalto, il nickel, sarà rappresentata da un corpo sconosciuto il cui equivalente avrebbe un peso eguale alla metà di quello dell’idrogeno. Raddoppiando gli equivalenti dell’alluminio, dello zinco e dello stronzio, si sarebbe anche dispensati di porre l’unità più in basso, se nient’altro ci obbligasse a mantenerli. Ora, poiché si vede che la maggior parte degli elementi meglio studiati hanno equivalenti rappresentati da numeri interi, sembra naturale porre l’unità più in basso per far rientrare i corpi eccezionali nella regola, e non di negare l’esistenza di una regola che tanti esempi confermano”.

Dal nostro punto di vista epistemologico l'ipotesi di Prout rappresenta l'ennesimo tentativo di negare, in campo chimico, la pluralità delle sostanze elementari annullando il lavoro fatto da Lavoisier e da Dalton. Dietro questo tentativo vi è la visione riduzionista della realtà, che è stata sempre presente in molti atomisti, a partire da Democrito.

L'ipotesi di Prout influenzò a lungo la chimica e in molti chimici sopravvisse fino ai lavori sugli isotopi di Francis Aston, negli anni venti del XX secolo e, forse, anche oltre. Essa si riconnette anche al concetto moderno di atomo e del quale parleremo. Inoltre, l'annuncio nel 1859 di Darwin della teoria dell'evoluzione degli esseri viventi portò in chimica un'equivalente ipotesi: gli elementi più pesanti si erano evoluti dal più leggero di tutti: l'idrogeno.

Vi erano inoltre autori, come Lothar Meyer, che non ritenevano in contrasto l'ipotesi daltoniana e quella del protilo (la materia prima elementare): bastava ritenere la materia strutturata gerarchicamente secondo ordini crescenti di complessità e composizione. Le molecole dovevano essere considerate sostanze composte del primo ordine, cioè composte di atomi più piccoli (o particelle del secondo ordine), questi, a loro volta, erano composti di particelle di materia di un terzo ordine, e ancora più semplici e più piccole. Questa ipotesi era in grado di dare una soluzione a un problema molto sentito dai chimici: quello di dare unità e/o coerenza alla molteplicità degli oggetti che loro stessi ricavano dalla loro pratica sperimentale, specialmente di quelli semplici o elementari.

5. La tavola periodica degli elementi: individualità e proprietà di gruppo [36]

La tavola periodica degli elementi fu proposta da Mendeleev [1834-1907] nel 1869. Prima del chimico russo altri chimici avevano notato analogie tra gli elementi, e vi erano stati altri tentativi parziali di raggruppamenti, ai quali conviene accennare per potere poi rimarcare la differenza qualitativa, oltre che quantitativa, della tavola di Mendeleev.

Nel 1829 Dobereiner enunciava la legge detta delle "triadi", che aveva già intuito nel 1817. Secondo questa legge il peso atomico dell'elemento centrale della triade si collocava a metà strada tra i pesi atomici dei due estremi. Per esempio il peso atomico dello stronzio era 42.5, essendo lo stronzio tra il calcio ed il bario e quindi il suo peso atomico era la media tra quelli del calcio (20) e dello bario (65). Ciò valeva anche per la triade cloro - bromo - iodio e per quella zolfo - selenio - tellurio. Nel 1862 Béguvier de Chancourtois e nel 1865 John Newlands fecero un tentativo di collocare gli elementi in funzione della loro massa atomica. Fu lo stesso Mendeleev a difendersi da un'accusa implicita di plagio [37]: "Né de Chancourtois, al quale i francesi attribuiscono la priorità della scoperta della legge periodica, né Newlands, citato dagli inglesi, né L. Meuer, considerato dai tedeschi il fondatore della legge periodica, si sono azzardati a predire le proprietà degli elementi non ancora scoperti". Vediamo un po' più in dettaglio la proposta di Chancourtois proprio al fine di poter poi evidenziare le "differenze" introdotte da Mendeleev.

L'idea guida sottesa al progetto classificatorio di Chancourtois era quella dell'unificazione di tutti i corpi e la subordinazione delle sostanze ai numeri, in una visione pitagorica. Egli ordinava gli elementi lungo un'elica e ogni elemento era la somma di elementi che lo precedono e nei quali poteva svanire. Per esempio diceva che il potassio, che ha tante analogie con l'ammonio, poteva benissimo non essere altro che un radicale composto di tallio e di sodio $Tl+4*Na/5 = 103+92/5 = 39$. Egli chiamava la sua spirale *tellurica* per evidenziare il privilegio del "tellurio", posizionato in mezzo alla tavola, e poiché *tellus* significava terra nel senso più positivo, più familiare, nel senso di terra nutrice. Il sistema di Chancourtois, con il suo sottofondo simbolico e mistico, suggerisce l'unità degli elementi, annullando la loro individualità. Non si può considerare questo come un precursore del progetto di Mendeleev.

Da un punto di vista pratico, la tavola periodica di Mendeleev si basava su due principi. Il primo era detto principio del "quadrilatero" e permetteva di determinare il peso atomico di un elemento, conosciuto o sconosciuto: poiché l'elemento si disponeva nell'intersezione delle diagonali del quadrato formato dai quattro vicini immediati (uno in alto, uno in basso, ed uno per lato) il suo peso atomico era la media di quelli che lo circondavano. Per esempio il selenio, precedeva il bromo (80) e seguiva l'arsenico (75); verticalmente esso era tra lo zolfo (32) e il tellurio (135), quindi il suo peso atomico era $(32+125+75+80)/4=78$. Mendeleev propose anche di designare gli elementi sconosciuti con il nome dell'elemento precedente appartenente allo stesso gruppo, aggiungendo il prefisso *eka*. Il secondo principio, che rafforzava il primo, sosteneva che tutti gli attributi di un corpo non potevano che confermare o chiarire il peso atomico. Notava lo stesso Mendeleev [38]: "Se le proprietà degli atomi sono in funzione del loro peso una quantità di nozioni più o meno radicate in chimica subiscono una modifica, una trasformazione nel senso di questa conclusione. Quantunque, a prima vista, sembri che gli elementi chimici siano delle individualità assolutamente indipendenti, attualmente, da questa nozione sulla natura degli elementi, occorre sostituire quella della dipendenza delle proprietà degli elementi nei confronti della loro massa, cioè vedere la subordinazione dell'individualità degli elementi al principio generale che si manifesta nella gravitazione e in tutti i fenomeni psicochimici".

Con la Tavola di Mendeleev, da un punto di vista filosofico, l'universo si semplifica e si stratifica. Il chimico russo infatti ha saputo evitare i due rischi che minacciano *a priori* tutti i tentativi di classificazione, portandoli al fallimento. Da un lato occorre semplificare, ma un eccesso di semplificazione, uniforme, nega e appiattisce. In questo caso è facile perdere la varietà, per la necessità di trattenere l'essenziale. Da l'altro lato, se ci si mette a rispettare le pluralità, non si riesce più a creare l'insieme e tutto crolla sotto il peso della varietà. Mendeleev evitò questo doppio pericolo con l'enunciato della legge: il peso atomico cresce con regolarità, ma senza una progressione regolare. Tra un elemento e l'altro i salti sono inevitabili [39]: "La legge periodica non deve dunque essere espressa con l'aiuto di figure geometri-

La legge della “conservazione delle masse” di Lavoisier

che che presuppongono sempre la continuità, ma con un procedimento simile a quello che si adoperava nella teoria dei numeri [...] la massa degli elementi non cresce in maniera continua: tutte le transizioni avvengono a salti”.

Nel costruire la tavola periodica a Mendeleev i caratteri chimici non sembravano il mezzo più sicuro: la reattività gli appariva a volte scarsa (sostanze inerti) e a volte eccessiva (sono troppi i risultati possibili e ci si perdeva nello scegliere quali prendere). Per esempio se ci si fosse voluto basare sull'ossidazione avremmo avuto che [40]: “Se CO_2 e SO_2 sono due gas dalle proprietà chimiche e fisiche molto vicine, la causa non sta nella rassomiglianza tra il carbonio e lo zolfo”, ma derivava dall'ossigeno, che era in grado di eclissare l'altro elemento. D'altra parte anche i mezzi fisici erano insufficienti per trovare gli accostamenti tra gli elementi. Mitscherlich nel 1820 aveva provato ad usare l'isomorfismo (forma di cristallizzazione simile) per definire gli elementi analoghi, utilizzando la proprietà che elementi isomorfi potevano cristallizzare insieme in qualsiasi proporzione. Mitscherlich aveva così accostato l'arsenico e il fosforo. Poi il quadro si era complicato: l'esistenza del dimorfismo, del pseudomorfismo, del paramorfismo, ecc., mettevano in evidenza la difficoltà di usare questa proprietà fisica per trovare le analogie tra gli elementi.

Mendeleev diffidava delle qualità e cercava un criterio quantitativo che, infine, trovò nel peso atomico [41]: “Disponendo gli elementi secondo la crescente grandezza del loro peso atomico, si ottiene una ripartizione periodica delle proprietà. È ciò che enuncia la legge periodica: le proprietà dei corpi semplici, come le forme e le proprietà delle combinazioni, sono una funzione periodica della grandezza del peso atomico”. Tutti i corpi semplici erano l'intersezione di due linee di discendenza: l'orizzontale e la verticale. Il periodo (o serie), che seguiva la discendenza orizzontale, comprendeva le sostanze con proprietà chimiche molto differenti, ma con pesi atomici simili, dunque con proprietà fisiche vicine. I gruppi, che seguivano la discendenza verticale, raccoglievano invece corpi con pesi atomici molto diversi, ma che possedevano le medesime proprietà chimiche. Il corpo semplice si otteneva da queste due discendenze, ma la discendenza verticale generalmente era più importante. Limitarsi, tuttavia, a considerare il peso atomico come unico criterio di classificazione adottato da Mendeleev significa indebolire la sua idea. Egli, infatti, utilizzò il peso atomico per classificare, ma seppe anche distaccarsene quando gli sembrò opportuno: dopo avere squalificato la reattività, Mendeleev la utilizzò per modificare il peso atomico, nel caso in cui questo non permetteva di dedurre il “comportamento dell'elemento”.

Diceva Mendeleev [42]: “Dopo aver scoperto la legge periodica (1869-1870), ne ho dedotto delle conseguenze logiche, proprio a dimostrare se quella legge era esatta oppure no. Tra queste ultime conseguenze c'è la previsione delle proprietà degli elementi non ancora scoperti e la correzione dei pesi atomici di vari elementi non ancora studiati. Per esempio l'uranio [...] ho proposto di raddoppiarne il peso atomico. [...] Lo stesso è accaduto per il cerio, il cui peso atomico ha dovuto essere modificato conformemente al sistema periodico”.

Con Mendeleev la classificazione non cercò più di raggruppare o di condensare il sapere; ma lo elevò e lo teorizzò. Prima della tavola periodica si classificava ciò che si conosceva; d'ora in poi era la classificazione a darci nuove conoscenze. Per capire nella tavola periodica l'ordine degli elementi, che Mendeleev aveva trovato ma non poteva spiegare, occorreva entrare dentro all'atomo e scoprire che anch'esso costituiva a sua volta un insieme altrettanto ricco quanto quello dell'insieme degli elementi. Questo è un punto su cui torneremo.

Nel Novecento Bachelard, nel quadro del rapporto tra pluralità e razionalità che cerca di dominarla, attribuisce un'importanza fondamentale all'opera di Mendeleev. La tavola periodica degli elementi, con la sua storia e le sue modifiche, costituisce una delle pagine più filosofiche della chimica e della scienza tutta; la sua scoperta determina una rivoluzione copernicana ed apre un'era nuova per la chimica portandola a superare definitivamente le antiche classificazioni. Insomma, con la tavola periodica, è posta in maniera illuminante la prospettiva di una sistematica degli elementi della materia, la quale provoca il passaggio[43]: “dall'era analitica di Lavoisier all'era sintetica di Mendeleev”. Per Bachelard, Mendeleev ha, infatti, dimostrato che in chimica il tutto viene prima delle parti e che l'attività della ragione fornisce il piano generale dentro il quale trovano posto i singoli elementi; la chimica offre anzitutto un piano del reale, un progetto di costruzione; l'elemento esiste in quanto trova un posto preciso in questo piano organico. Il piano, la struttura, il progetto, la legge generale, dice Bachelard facilita le induzioni più audaci, essa permette di predire l'esistenza e le proprietà dei corpi non ancora esistenti, di predire, prima della scoperta effettiva, le proprietà di una sostanza ancora sconosciuta. Una volta individuato il piano generale, il razionalismo attribuisce un posto agli elementi per cui, ed è questo il lavoro del chimico di laboratorio, si tratta, con la tecnica, di riempire le caselle vuote del piano generale che prevede questi elementi; le caselle vuote sono riempite razionalmente poi confrontate con l'esperienza: nella tavola di Mendeleev le ultime quattro caselle sono state colmate da elementi che certamente si possono chiamare introvabili attraverso la conoscenza comune, ma la tecnica ha trovato questi elementi introvabili. Per Bachelard nella sistematica di Mendeleev la tavola stabilisce come un'organica totalità l'insieme una volta indeterminato di corpi semplici, perciò ogni elemento è definito non come qualcosa in sé, come un'individualità isolata, ma nella sua relazione con gli altri elementi. Il carattere relazionale attribuisce all'elemento le sue proprietà sia di esistenza sia delle sue qualità. La legge predice l'esistenza dei fatti chimici proprio perché predice le loro proprietà. Così, se Lavoisier e Dalton hanno aiutato a distinguere gli elementi chimici liberandoli dai loro caratteri qualitativi e materiali del tutto singolari, dice sempre il filosofo francese, Mendeleev ha intravisto una dottrina generale delle qualità particolari e preparato l'armonia delle sostanze. Dove si tratta non di un'armonia data dalla natura, di un'armonia trovata nelle cose

bensi realizzata dalla ragione. Vi è quindi un cambiamento epistemologico del concetto di armonia dal concetto realistico di armonia all'idea di armonia che risulta da un processo di costruzione, attuato dalla funzione razionale. Per Bachelard, la sistematica di Mendeleev determina dunque il definitivo passaggio ad una chimica razionalistica.

Noi siamo d'accordo con Bachelard sull'importanza epistemologica della Tavola di Mendeleev, ma a noi sembra che essa rappresenti la sintesi tra l'individuale che persiste (i simboli differenti) e il generale che li connette (gruppi e periodi). Ci sembra, invece, che Bachelard accentui nella Tavola Periodica l'aspetto generale fino a confonderlo con un supposto aspetto universale che di fatto eliminerebbe l'individuale. Quindi, pur essendo d'accordo con Bachelard su molti aspetti del lavoro di Mendeleev, non condividiamo la cornice globale in cui Bachelard inquadra il lavoro dello scienziato russo.

6. Evoluzione del concetto di elemento e di atomo all'inizio del XX secolo

Nel 1865, J. Plucker e J.H. Hittorf, studiando gli spettri ottici dei gas, scoprirono due cose: un tipo inedito di radiazione (i raggi catodici) che rivelava la possibilità di una materia più complessa di quanto fino allora si ritenesse, e che un certo numero di sostanze elementari fornivano differenti tipi di spettri, in funzione della temperatura alla quale erano portate. Questa seconda scoperta sembrava mettere in crisi l'idea originaria che ad ogni specie atomica dovesse corrispondere un solo spettro. Gran parte dei chimici spiegarono quest'anomalia affermando che le differenti serie di righe spettrali fossero dovute ai differenti moti vibrazionali degli atomi, causati dalle differenti temperature. Lockyer, invece, la interpretò come indice dell'esistenza di componenti ancora più elementari degli atomi nelle sostanze considerate semplici e che, solo alle alte temperature, era possibile rivelare, mentre alle condizioni ordinarie della sperimentazione chimico-fisica erano invisibili. Studiando gli spettri solari, stellari e terrestri, Lockyer era arrivato alla conclusione che vi fosse una correlazione fra la temperatura delle differenti stelle e la presenza in esse di determinati elementi e che gli elementi più pesanti fossero presenti progressivamente nelle stelle più fredde. Di qui la conclusione generale che nella natura inorganica esistesse un "principio d'evoluzione" degli elementi: essi erano stati tutti generati da una "materia prima", alla quale potevano essere tutti ricondotti, in certe condizioni sperimentali (le altissime temperature delle stelle o quelle raggiunte nella scarica elettrica quando si faceva l'analisi spettroscopica). Lockyer pensava che gli elementi noti fino allora erano stati rivelati mediante metodi analitici che facevano ricorso a forme d'energia molto blande, la qualcosa impediva che fosse messa in evidenza la loro ulteriore composizione. Alle altissime temperature delle stelle avvenivano fenomeni di dissociazione della materia più radicali e profondi, in grado di mettere in evidenza che gli atomi degli elementi non solo non erano indivisibili e indistruttibili, ma si erano formati attraverso un percorso evolutivo a partire da una componente primordiale. Le posizioni di Lockyer riportavano alla ribalta scientifica la vecchia ipotesi di Prout, mai definitivamente abbandonata, di una "materia prima". Esse furono condivise da molti scienziati europei e principalmente da Crookes che nel 1879, a partire dalle sue ricerche sugli spettri dei gas rarefatti sottoposti a scariche elettriche, sostenne che il plasma costituiva un "quarto stato della materia", analogo alla materia stellare, nel quale gli atomi apparivano dissociati in unità più piccole, come il "protilo" o multipli di questo. Crookes riteneva inoltre che gli elementi fossero il risultato di un'evoluzione di tipo darwiniano della materia inorganica.

Le idee di questi scienziati divennero parte integrante del sistema filosofico di Herbert Spencer [1820-1903], cioè della filosofia evoluzionistica più diffusa nella seconda metà del secolo scorso. Infatti, queste posizioni furono accolte e diffuse da Spencer nella seconda edizione dei suoi *Principi di biologia* del 1898. Esse, infatti, sostenendo il carattere evolutivo della materia inorganica costituivano un'importante conferma delle idee del filosofo inglese sull'universalità del principio evolutivo e sulla concatenazione ininterrotta dei vari processi evolutivi all'interno della più generale evoluzione cosmica. Grazie ai lavori di Crookes e Lockyer, Spencer poteva ora affermare che [44] "in conformità dell'opinione ora ampiamente diffusa tra i chimici, che i cosiddetti elementi non siano elementi ma siano composti di materie semplici e probabilmente di una forma ultima di materia (per cui da Sir W. Crookes è stato suggerito il nome 'protilo'), è da concludere che la formazione degli elementi, in comune con la formazione di tutti quei composti di essi che la Natura presenta, ebbe luogo nel corso dell'Evoluzione Cosmica".

Inoltre, tanto Lockyer quanto Crookes, pensavano che la formazione degli elementi potesse essere concepita attraverso una successione continua di pesi atomici differenti, a partire dalla sostanza originaria: quelli raccolti nella tavola di Mendeleev erano solo alcuni della serie, trovati sperimentalmente. Niente, però, impediva di ritenere che altri elementi potessero essere ritrovati, poiché il protilo originario conteneva in potenza tutti i possibili pesi atomici. Dunque, mentre per Mendeleev il peso atomico era una caratteristica individuale e irriducibile d'ogni elemento, una misura delle sue specifiche proprietà e causa di queste, per Lockyer e Crookes, al contrario, esso rappresentava solo una misura delle condizioni di raffreddamento della materia che avevano prevalso al momento della nascita dei singoli elementi. Naturalmente Mendeleev non era per niente d'accordo con queste ipotesi e le contrastò duramente fino alla fine della sua vita, accusandole di introdurre in chimica una sorta di metafisica dell'universale (la "materia prima") dove ogni particolarità, individualità e molteplicità degli oggetti elementari costitutivi del mondo, materia della chimica, erano annullate. Per lo scienziato russo lo scopo della teoria chimica era, al contrario, quello di realizzare delle forme di coerenza fra universalità (il sistema periodico o le leggi generali della natura) e individualità (gli atomi distinti degli elementi distinti). La coerenza fra unità e molteplicità, nella quale egli vedeva la caratteristica principale della scienza

La legge della “conservazione delle masse” di Lavoisier

alla quale aveva apportato così significativi contributi, era testimoniata per lui dal suo sistema periodico. Su questo punto fondamentale noi siamo perfettamente d'accordo.

Negli anni a cavallo del XX secolo questi dibattiti ripresero nuovo vigore, anche grazie alle scoperte decisive che decretarono definitivamente la divisibilità dell'atomo, cioè la sua struttura complessa nella costituzione della quale entravano enti più semplici e identici fra loro. Anche se ogni elemento poteva essere caratterizzato da un atomo distinguibile da quelli degli altri elementi, questo era il risultato di particolari organizzazioni dei componenti primordiali degli atomi stessi. Agli inizi del XX secolo, vennero anche elaborati i primi modelli della struttura interna dell'atomo. Su questo torneremo tra poco.

Negli anni 1913-1914 H. G. J. Moseley [1887-1915] giunse alla conclusione che non solo le proprietà chimiche di un elemento erano determinate dal numero atomico, ma che questo era il vero numero d'ordine secondo il quale dovevano essere disposti gli elementi del sistema di Mendeleev. La ricorrente periodicità nelle proprietà degli elementi quindi, non dipendeva più dal peso atomico, come riteneva il chimico russo, ma dal numero di protoni contenuti nel nucleo. L'ipotesi di Mosely si rivelò subito molto feconda. Essa, infatti, pur confermando il carattere realistico della classificazione degli elementi di Mendeleev, n'accentuava il carattere discontinuo, già rilevato dal chimico russo, facendo coincidere la successione degli elementi addirittura con la successione dei numeri interi. Inoltre, quest'ipotesi era in grado di spiegare, e risolvere, alcune anomalie della classificazione mendeleeviana, in particolare le inversioni argo-potassio, cobalto-nichel e tellurio-iodio, nelle quali non vi era corrispondenza fra la successione delle proprietà chimiche e quella del peso atomico: prendendo come parametro ordinatore il numero atomico, tali inversioni erano eliminate. Infine, il criterio di classificazione di Mosely conduceva a conclusioni di gran rilievo, che eliminavano alla radice tutta una serie d'ipotesi sul numero e sulla molteplicità degli elementi chimici, e cioè che:

1. fra l'idrogeno e l'uranio esistevano solamente un numero limitato e definito d'elementi;
2. esisteva un limite inferiore della serie naturale degli elementi dato dall'idrogeno e che possedeva una carica nucleare uguale a 1;
3. era ormai chiaro che gli elementi ancora da scoprire erano quelli mancanti nella serie dei numeri interi da 1 a 92, cioè quelli con $Z=43, 61, 72, 75, 85$ e 87 . Questi elementi furono effettivamente scoperti e chiamati, rispettivamente, Tecnezio, Promezio, Afnio, Renio, Astatio e Francio.

Alla fine dell'Ottocento, Henry Becquerel e i coniugi Curie scoprirono che in natura si realizzava spontaneamente la trasmutazione d'alcuni elementi chimici (gli elementi radioattivi) con l'emissione di raggi alfa, beta o gamma e il decadimento ad altri elementi. Nel 1934 Irene Curie e Frederic Joliot riuscirono a produrre per la prima volta elementi radioattivi artificiali. Nel 1940 Edwin Mattison McMillan e Philip Hauge Abelson ottennero un elemento chimico inesistente in natura con numero atomico 93 e lo chiamarono Nettunio.

Riguardo al concetto di atomo sono ben note le vicende di inizio Novecento che hanno portato all'atomo quantistico. Tuttavia, non si può fare a meno di riprenderne in questo lavoro gli aspetti salienti per far venire fuori l'importante concetto di “struttura”.

La scoperta dell'elettrone nel 1897 da parte di J. J. Thomson [1856-1940] cambiò la prospettiva nello studio del legame chimico e introdusse il concetto di “struttura atomica”. Della sua influenza sul concetto di legame chimico non ci occuperemo qui. Ora analizzeremo la nascita del concetto di “struttura atomica” che, come vedremo, ha notevoli conseguenze, sia in campo scientifico sia in quello epistemologico. Ritornando a Thomson, egli trovò che i raggi catodici, prodotti da una scarica elettrica in un tubo contenente gas rarefatti, erano formati da particelle che trasportavano una carica elettrica negativa. Questo provava la natura corpuscolare dell'elettricità. Una volta determinata da Millikan la carica elettrica, determinando il rapporto tra la massa e la carica elettrica si ottenne per questa particella una massa di 1836 volte più piccola di quella dello ione idrogeno. In seguito Thomson dimostrò che le proprietà degli elettroni erano le stesse indipendentemente dal tipo di gas che aveva generato i raggi catodici. Da ciò ne dedusse che gli elettroni erano costituenti di tutti gli atomi e questo fu, su sua stessa ammissione, il primo passo verso la struttura atomica [45], “poiché gli elettroni possono essere prodotti da tutti gli elementi chimici, noi dobbiamo concludere che essi entrano nella costituzione di tutti gli atomi. Noi abbiamo quindi fatto il primo passo verso la comprensione della struttura dell'atomo”.

La presenza degli elettroni negli atomi portò a molte domande tra cui le tre principali erano: quanti elettroni erano presenti in ogni atomo, dove risiedeva la carica positiva e come spiegare la massa degli atomi. Queste problematiche costituirono gli ingredienti di un solo concetto: la struttura atomica. Praticamente insieme, Lord Kelvin [1824-1907] e J. J. Thomson, proposero la prima di queste possibili strutture. Il modello di Kelvin del 1902 prevedeva una nuvola di carica positiva, uniformemente distribuita, nella quale gli elettroni erano inseriti per ottenere una situazione di equilibrio e di neutralità. Nel 1903-1904 Thomson propose un modello atomico, detto “plum-pudding” (budino) modello nel quale l'elettrone veniva inglobato come “plums” (uva passa) in una matrice sferica di carica positiva. Inoltre Thomson pensava che la massa fosse dovuta principalmente agli elettroni e quindi negli atomi vi erano migliaia di queste particelle. Nel 1911 E. Rutherford [1871-1937] elaborò il modello planetario dell'atomo. L'elemento centrale di questo atomo era il nucleo, molto più piccolo dell'atomo, di carica positiva e che portava la quasi totalità della massa. Attorno

vi ruotavano gli elettroni, in numero non così elevato come per Thomson. Ogni tipo di atomo era caratterizzato dal suo numero di elettroni e quindi, per la neutralità, dalla sua carica nucleare. L'atomo di Rutherford era un atomo dove predominava il vuoto. Nel 1920 Rutherford diede a questo nucleo atomico il nome di "protone".

Negli atomi, la forza gravitazionale che tiene insieme il sole e i pianeti, era stata rimpiazzata da quella di Coulomb di attrazione tra cariche opposte, il nucleo e gli elettroni. Tuttavia, nello schema della elettrodinamica classica, un elettrone che si muovesse in queste condizioni dovrebbe continuamente perdere energia, emettendo radiazione elettromagnetica, e con un moto a spirale finire sul nucleo. Il modello di Rutherford quindi dava una spiegazione soddisfacente degli esperimenti di Hans Geiger e Ernst Marsden, ma non spiegava la stabilità del sistema atomico. Un ulteriore problema era quello di spiegare con questo modello perché negli spettri di emissione gli atomi emettevano energia solo a specifiche frequenze, mentre il modello di Rutherford prevedeva una variazione continua di frequenza.

Una possibile risposta a queste due questioni fu data da Niels Bohr [1885-1962], con il suo modello atomico del 1913. Ponendo al centro dell'attenzione la comprensione della stabilità della materia, che dal punto di vista della meccanica classica appariva come "un miracolo", avanzò una prima ipotesi che, contrariamente alla teoria della meccanica classica, gli elettroni potessero muoversi solo in certe selezionate orbite con energia costante o, equivalentemente, a certe distanze fissate dal nucleo (orbite circolari). Questa ipotesi portò ad un numero (poi detto numero quantico principale) intero e positivo che caratterizzasse (principalmente l'energia) queste orbite. Una seconda ipotesi stabiliva che tutti i processi radiativi in un atomo, come l'emissione o l'assorbimento di fotoni, fossero associati a transizioni, "salti", tra due orbite (stati stazionari). Questi salti spiegavano la variazione discontinua nell'assorbimento o emissione, ma aprivano subito un altro problema: era tale transizione istantanea? se no, dove era l'elettrone durante il salto? Questa concetto di transizione tra stati fu criticato da molti fisici. Per esempio Louis de Broglie [1892-1987] si poneva il problema che questi salti non potevano essere descritti nello spazio e per E. Schrödinger [1887-1961] l'idea dei salti quantistici era un nonsenso. D'altra parte le ipotesi di Bohr permisero di calcolare il raggio dell'atomo d'idrogeno, il suo potenziale di ionizzazione e di riprodurre correttamente la serie spettrale di Balmer per questo atomo. Fu Arnold Sommerfeld [1929-1985] che sostituì le orbite circolari con quelle ellittiche e introdusse un secondo numero quantico, poi detto azimutale, per direzionare l'asse principale dell'ellisse; per spiegare l'effetto del campo magnetico sulle linee spettrali venne presto introdotto un terzo numero quantico, quello magnetico. Questi tre numeri quantici potevano essere correlati alla grandezza, alla forma e all'orientazione spaziale delle orbite corrispondenti.

Nel caso dell'atomo d'idrogeno vi era un solo elettrone e questo occupava ovviamente l'orbita a più bassa energia; negli atomi più complessi quale era il numero massimo di elettroni che un'orbita poteva contenere? Questo problema fu ben presente nella mente di Bohr, ma trovò una soluzione solo nel 1926 con W. Pauli [1900-1958] e con l'introduzione di un quarto numero quantico, quello di spin, e l'esplicitazione del principio di esclusione che asseriva che non vi erano mai due elettroni con gli stessi quattro numeri quantici. Quindi in un orbita potevano trovare posto al massimo due elettroni con numero quantico di spin opposto.

Intanto la struttura dell'atomo si arricchiva di un altro protagonista: il neutrone. Nel 1932 James Chadwick trovò nel nucleo atomico una particella di massa quasi uguale a quella dei protoni, ma senza carica elettrica. Questa particella spiegava la discrepanza tra la massa dell'atomo e quella che si otteneva dalla somma dei soli protoni ed elettroni. Questa particella spiegava anche l'esistenza degli isotopi, che sono atomi di uno stesso elemento che esibiscono quasi le stesse proprietà chimiche, ma hanno massa diversa perché differiscono tra loro per il numero di neutroni. Gli isotopi furono scoperti da Frederick Soddy nella serie degli elementi radioattivi e poi da Francis Aston in molti altri elementi. Con la scoperta degli isotopi cadde uno dei principali presupposti di Dalton: per ogni elemento esiste un solo tipo di atomo. La scoperta di acque di diverso peso era stata rigettata da Dalton proprio in base a questo principio [46]: "Noi possiamo allora concludere che le particelle ultime di tutte le sostanze omogenee sono perfettamente identiche in peso, forma, ecc.". Ancora nel 1914 J. J. Thomson ripeteva quasi le stesse parole [47]: "tutte le particelle di una data sostanza hanno esattamente la stessa massa [...] tutti gli atomi di un dato elemento sono identici".

7. Conclusione

Arrivati alla fine di questo discorso dovrebbe essere chiaro il motivo per cui sosteniamo la necessità di cambiare il nome alla legge della conservazione della massa di Lavoisier. Se tale legge si applica alla massa come intesa dalla fisica, infatti, essa non è vera in generale. Se, invece, tale legge si applica, come voleva Lavoisier alle "masse chimiche", alla conservazione nelle reazioni chimiche delle masse differenziate qualitativamente, tipiche della chimica, allora è assolutamente vera. Inoltre, la sua applicabilità alla "massa fisica" (ovvero alla massa totale) ne viene di conseguenza. Come mostrato, questo cambiamento di nome alla legge di Lavoisier implica e sottende una visione della scienza di tipo diverso dalla imperante visione riduzionista.

La scoperta della radioattività e dell'elettrone, come abbiamo visto, ha rivoluzionato due dei concetti portanti della chimica: l'elemento e l'atomo, i due concetti a cui applicare la legge di conservazione della massa (o delle masse, secondo noi). Il Novecento ci dà di questi due concetti una visione diversa da quella di Lavoisier e di Dalton che, su tali concetti, avevano fondato la chimica moderna. Come è ben noto, l'atomo odierno non è né semplice né indistruttibile e l'ipotesi di Prout, in una certa ottica (quella riduzionista), si dimostra corretta perché i costituenti dell'atomo d'idrogeno

La legge della “conservazione delle masse” di Lavoisier

(il protone e l'elettrone) entrano effettivamente nella costruzione di tutti gli atomi pesanti. Neppure l'elemento chimico del Novecento è un'unità non trasformabile ulteriormente, poiché la radioattività trasforma un elemento chimico in un altro. Tuttavia, queste verità scientifiche non cambiano la chimica e non cambiano il mondo materiale descritto dall'ottica chimica. Per la chimica, ed il chimico, l'atomo e l'elemento chimico continuano ad avere anche oggi un significato quasi ottocentesco. Certo il chimico teorico sa, ed usa, la struttura interna dell'atomo, ma l'affermazione che un atomo di cloro è equivalente a 36 atomi d'idrogeno condensati è priva di significato chimico, come lo è pure la possibilità della trasmutazione degli elementi. In quest'ottica chimica, ancora una volta, viene prepotentemente fuori il concetto di sistema e la sua irriducibilità ai componenti..

Bibliografia

- [1] G. Villani, “La chimica: una scienza della complessità sistemica *ante litteram*”, in *Strutture di mondo. Il pensiero sistemico come specchio di una realtà complessa* (a cura di Lucia Urbani Ulivi), Il Mulino, Bologna 2010, pp. 71-90.
- [2] G. Villani, *La chiave del mondo. Dalla filosofia alla scienza: l'onnipotenza delle molecole*, CUEN, Napoli 2001.
- [3] G. Villani, *Complesso e organizzato. Sistemi strutturati in fisica, chimica, biologia ed oltre*, FrancoAngeli, Milano 2008.
- [4] C. De Freycinet, *Essais sur la philosophie des sciences*, Paris 1896, p. 168.
- [5] R. Carnap, “The methodological character of theoretical concepts”, in M. Jammer, *Storia del concetto di forza*, Feltrinelli, Milano 1971, p. 12.
- [6] T. Lucrezio Caro, *De rerum Natura*, libro I, verso 150, trad. di Balilla Pinchetti, Rizzoli, Milano 1953, p. 18.
- [7] T. Lucrezio Caro, *De rerum Natura*, libro I, versi 214-216, cit., p. 20.
- [8] G. Buridano, *Questiones super octo libros Physicorum*, libro VIII, Questione 12, Parigi 1502, tradotta in M. Clagett, *La scienza della meccanica nel Medioevo*, trad. it. di L. Sosio, Feltrinelli, Milano 1972, pp. 562-568.
- [9] G. Galilei, *Il Saggiatore*, Ed. Naz., VI, 347, ed. a cura di L. Sosio, Feltrinelli, Milano 1965, p. 261.
- [10] G. Galilei, *Dialogue on the great word systems*, a cura di G. de Satillana, University of Chicago Press, Chicago 1953, p. 252.
- [11] Keplero, *De causis planetarium*, in M. Jammer, *Storia del concetto di massa*, Feltrinelli, Milano 1974, p. 63.
- [12] I. Newton, *Principi matematici della filosofia naturale di Isaac Newton*, a cura di A. Pala, UTET, Torino 1965, p. 91.
- [13] I. Newton, *Principi ...*, cit., pp. 94-95.
- [14] F. Rosenberg, *Isaac Newton und seine physikalischen Principien*, in M. Jammer, *Storia ...*, cit., p. 72.
- [15] L. Bloch, *La philosophie de Newton*, in M. Jammer, *Storia ...*, p. 72.
- [16] I. Newton, in M. Jammer, *Storia ...*, p. 72.
- [17] W. Ostwald, *Vorlesungen über Naturphilosophie*, Leipzig, 2^a ed., 1902, p. 184.
- [18] E. Mach, *Die Prinzipien der Wärmelehre*, Leipzig, 2^a ed., 1900.
- [19] A. N. Whitehead, *An enquiry concerning the principles of natural knowledge*, Cambridge University Press, New York 1919, p. 18.
- [20] I. Bulliandus (Boulliau), *Philolai sive dissertationis de vero systemate mundi libri quatuor*, Amsterdam 1639.
- [21] W. Ostwald, *Vorlesungen über Naturphilosophie*, Veit, Leipzig, 3^a ed., 1905, p. 283.
- [22] G. Villani, *La chiave del mondo ...*, cit., Capitolo 1.
- [23] G. Villani, *La chiave del mondo ...*, cit., Conclusione.
- [24] S. Tugnoli Pattaro, *La teoria del flogisto. Alle origini della chimica moderna*, CLUEB, Bologna 1989, p. 37 e sua nota 34.
- [25] A. L. Lavoisier, in C. J. Gillispie, *Il criterio dell'oggettività. Un'interpretazione della storia del pensiero scientifico*, il Mulino, Bologna 1981, p. 225.
- [26] A. L. Lavoisier, in C. J. Gillispie, *Il criterio dell'oggettività ...*, cit. nota 4, p. 242.
- [27] A. L. Lavoisier, *Traité élémentaire de chimie*, Paris 1789, pp. 140-141.
- [28] J. J. Berzelius, in W. H. Brock, *The Fontana History of Chemistry*, Fontana Press, Glasgow 1992, p. 152.
- [29] G. Villani, *La chiave del mondo ...*, cit., Capitolo 11.
- [30] J. Dalton, in C. J. Gillispie, *Il criterio dell'oggettività ...*, cit. nota 4, p. 245.
- [31] J. Dalton, in C. J. Gillispie, *Il criterio dell'oggettività ...*, cit. nota 4, p. 250.
- [32] L. Meyer, in A. Di Meo, *Atomi e molecole fra due secoli (XIX e XX)*, Atti della III^a Scuola Estiva “Fondamenti Metodologici ed Epistemologici, Storia e Didattica della Chimica”, a cura di E. Niccoli, P. Riani e G. Villani, STAR, Pisa 2000, p. 116.
- [33] A. Di Meo, *Atomi e molecole ...*, cit. nota 18, p. 76
- [34] J. Dumas, in A. Di Meo, *Atomi e molecole ...*, cit. nota 18, p. 76-77. * “Nella citazione Dumas dice molecole, ma intende atomi. A lungo i francesi hanno chiamato ‘molecola’ quello che gli inglesi chiamavano ‘atomo’ “.
- [35] J. Dumas, in A. Di Meo, *Atomi e molecole ...*, cit. nota 18, pp. 79-80.
- [36] F. Dagognet, *Tavole e linguaggi della chimica*, Theoria, Roma 1987, pp. 89-117.
- [37] D. Mendeleev, *Principes de chimie*, tr. Achkinasi-Carrion, Tignol, II, p. 478.
- [38] D. Mendeleev, *Principes ...*, cit., p. 482.
- [39] D. Mendeleev, *Principes ...*, cit., p. 470.
- [40] D. Mendeleev, *Principes ...*, cit., p. 458-459.
- [41] D. Mendeleev, *Principes ...*, cit., p. 461.
- [42] D. Mendeleev, *Principes ...*, cit., p. 477-478.
- [43] G. Bachelard, *Le matérialisme rationnel*, Puf, Paris 1953, trad. it. *Il Materialismo razionale*, Dedalo, Bari 1975, nota 2, p. 111.
- [44] H. Spencer, in A. Di Meo, *Atomi e molecole ...*, cit. nota 18, p. 98.
- [45] J. J. Thomson, *The Atomic Theory*, Clarendon Press, Oxford 1914.
- [46] J. Dalton, *A new system of chemical philosophy*, in B. Pullman, *The Atom in the history of human thought*, Oxford University Press, New York Oxford 1998, p. 270, (traduzione mia).
- [47] J. J. Thomson, in B. Pullman, *The Atom ...*, cit., p. 270, (traduzione mia).

CHIMICA, FISICA E SUPERCONDUTTIVITÀ ELEMENTI PER UN'ANALISI EPISTEMICA DELLA SCIENZA DEI MATERIALI

Gianmarco Ieluzzi, Luigi Cerruti

Dipartimento di Chimica Generale e Chimica Organica
Università di Torino

La scienza dei materiali ha le sue origini prossime negli sviluppi della metallurgia del ferro negli ultimi decenni dell'Ottocento, quando si scoprì che molte proprietà del ferro dolce, della ghisa e dell'acciaio erano dovute al contenuto in carbonio di questi materiali. Le proprietà e la lavorazione dei metalli, dei polimeri, dei vetri, delle ceramiche sono state studiate in laboratori diversi e separati per molto tempo, poi le necessità tecnologiche di industrie innovative, quale quella elettronica, hanno posto le basi di nuovi raccordi fra le discipline e le specialità. I materiali superconduttori ad alta temperatura critica (T_c) hanno dato una spinta decisiva verso la formazione di una vasta area di ricerca che è stata battezzata 'scienza dei materiali'. Dal punto di vista istituzionale per quanto riguarda l'Italia si possono ricordare due iniziative di rilievo. La prima prese spunto dalla necessità di 'decongestionare' l'Università di Milano, così a partire dal 1992 nell'area dismessa di Pirelli Bicocca furono avviati nuovi corsi di laurea scientifici caratterizzati da una forte impronta interdisciplinare: Scienze Ambientali (1992), Scienza dei Materiali (1994), e Biotecnologie (1995).¹ Su iniziativa di un gruppo di fisici e chimici dell'Università degli Studi di Milano il Dipartimento di Scienza dei Materiali si costituì nel febbraio del 1997, entrando a far parte della nuova Università di Milano-Bicocca.² La seconda iniziativa fu del tutto coeva alla prima. All'inizio degli anni 1990 si erano formati vari consorzi interuniversitari che riguardavano la chimica e l'ingegneria dei materiali; questi enti nel 1996 confluirono nel Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Scienza e Tecnologia dei Materiali. La scienza dei materiali si presenta istituzionalmente 'matura' nel nostro Paese fin dalla metà degli anni 1990, e i cenni di cronaca che abbiamo riportato confermano una triplice radice disciplinare: chimica, fisica e ingegneria.

Qui di seguito concentreremo la nostra attenzione sulle prime due discipline, cercando di rintracciare il loro contributo alla svolta cruciale avvenuta fra il 1985 e il 1987, quando la scoperta della superconduttività di certe perovskiti portò al successivo ottenimento di perovskiti con T_c maggiori della temperatura di ebollizione dell'azoto liquido. Prima di esaminare i contributi degli autori della svolta, consapevoli e inconsapevoli, è però necessario analizzare a livello epistemologico e linguistico alcuni aspetti della scienza dei materiali. Indagheremo ciò che caratterizza un materiale, distinguendolo da una sostanza, contestualmente metteremo a confronto le procedure conoscitive sperimentali della chimica e della fisica e discuteremo le differenze linguistiche fra le due discipline nell'ambito della superconduttività.

Sostanze e sostanze pure

Una definizione operativa di *sostanza chimica* potrebbe essere questa: un corpo che possiede proprietà chimiche e fisiche ben definite, ad esempio: punto di fusione e densità (in certe condizioni), solubilità (in certi solventi). Sono tre proprietà macroscopiche, adatte a indicare immediatamente il livello ontologico di riferimento di |sostanza| (della parola 'sostanza'). Il livello macroscopico pare implicare a sua volta la possibilità di ostensione di un campione materiale della sostanza, e questo non è possibile in molti casi di interesse chimico, dai complessi attivati che si formano durante le reazioni, a certe sostanze disperse negli spazi interstellari, ai radicali intrappolati a basse temperature in matrici opportune. Vedremo nel caso delle ricerche 'seminali' sulla superconduttività che Bednorz e Müller in Svizzera e Chu e Wu negli Stati Uniti fecero i loro clamorosi annunci di innovazioni fondamentali senza nemmeno avere una sostanza, ma più riduttivamente una *fase* superconduttrice in un campione complesso. Quando è opportuno si deve tener conto di questi e di altri casi, non marginali, ma in generale la chimica di sintesi è pur sempre un'attività rivolta a produrre sostanze in quantità ponderabili (da 10^{-3} in laboratorio a 10^{11} g in un grande impianto). La storia delle scienze chimiche ha meglio qualificato la definizione di sostanza che abbiamo appena data introducendo e variando il concetto di *sostanza pura*. Sono utili in realtà due definizioni, una *macroscopica*, valida da un paio di secoli, e una *microscopica*, più recente e legata alle possibilità di indagine chimico-fisica delle sostanze. Una sostanza è pura a livello macroscopico quando permangono le stesse proprietà se sottoposta a ripetuti processi di purificazione (ad es. cristallizzazioni). Una sostanza è pura a livello microscopico se è costituita in ogni sua parte (di dimensioni adeguate) da insiemi identici di particelle microscopiche, molecole, atomi, ioni. In effetti si tratta di una 'identità' condizionata.

L'acquisizione del concetto stesso di sostanza ha segnato la nascita della chimica moderna nella seconda metà del settecento. All'inizio dell'Ottocento si è poi consolidata la nozione di *purezza*, un concetto che si è trasformato in concet-

1. URL: http://www.scienze.unimib.it/?main_page=homepage

2. URL: <http://www.unimib.it/go/Home/Italiano/Ricerca/Aree-tematiche-di-ricerca/Scienze-chimiche>

to-limite, spostato verso livelli sempre più sofisticati in funzione dello sviluppo delle tecniche analitiche e delle conoscenze chimico-fisiche. Facciamo solo due esempi. Prima della separazione degli isomeri ottici fatta nel 1844 da Louis Pasteur non si sarebbe potuto parlare di *levo*-tartrato di ammonio e potassio *puro*. Fino al 1932 l'acqua fu ritenuta pura se distillata in modo adeguato, anche se si sapeva che avrebbe contenuto comunque qualche ione estraneo. Ma dopo la scoperta dell'isotopo pesante dell'idrogeno anche dall'acqua più 'pura' fu separato un altro corpo, l'acqua pesante D₂O, in cui le residue molecole H₂O apparivano ormai come 'impurezza'. Dobbiamo accettare come criteri storicamente condizionati sia l'invarianza macroscopica di una sostanza chimica - rispetto ai processi di purificazione, sia la sua omogeneità microscopica - rispetto all'indagine chimico-fisica.

Finora abbiamo usato il concetto di *composizione* solo implicitamente perché nel campo della superconduttività gioca un ruolo decisamente non-classico, e quindi merita un breve approfondimento. Il problema di una composizione costante come indice univoco dell'individualità (ed esistenza) di una determinata sostanza chimica fu ampiamente dibattuto all'inizio dell'Ottocento con un buon numero di ricerche condotte in modo esemplare dai chimici francesi Berthollet e Proust. Si può dire con una certa tranquillità che l'affermazione di quelle 'proporzioni definite e costanti' così care a Proust non fu dovuta tanto alla sua abilità sperimentale, quanto piuttosto alla necessità epistemica di avere un riferimento rigido nella 'scienza delle trasformazioni'. Questo punto di riferimento divenne 'incrollabile' quando con la successiva introduzione degli equivalenti o dei pesi atomici si cominciò ad esprimere la composizione dei composti mediante numeri interi - di irresistibile fascino pitagorico. Fu solo nei primi decenni del Novecento che i chimici cominciarono ad essere interessati ai composti non stechiometrici. Il chimico russo Nikolai Semenovich Kurnakov (1860-1941) negli anni immediatamente precedenti la prima guerra mondiale aveva dimostrato in numerosi studi sugli equilibri di fase in sistemi allo stato solido che - ad esempio - i massimi dei punti di fusione non sempre corrispondevano a fasi le cui composizioni potevano essere espresse con le usuali formule con numeri interi. I lavori di Kurnakov, pur apprezzati, non riuscirono a mettere in evidenza le potenzialità di ricerca insite nei composti non stechiometrici, da lui stesso definiti 'berthollidi' nel 1914.³ Molti dei dati di Kurnakov si riferivano ai composti intermetallici, già avvolti di per sé in un alone di incertezza, e così la comunità scientifica non colse la generalità delle conclusioni raggiunte dal chimico russo. Probabilmente il lavoro che aprì la strada a nuove ricerche fu quello dei chimico-fisici tedeschi Schenck e Dingmann che dimostrarono che l'ossido FeO non è *mai* stechiometrico. Il composto FeO_{1,000} è fuori dal campo di esistenza di una fase non stechiometrica.⁴ Le ricerche di Rudolf Schenck si svolgevano nel campo economicamente fondamentale della metallurgia del ferro ed ebbero ampia risonanza. Da allora la non-stechiometria non è più un'anomalia ma una proprietà specifica di molte classi di composti. Per quanto riguarda la superconduttività la non stechiometricità delle sostanze studiate divenne rilevante - ed anzi essenziale - con il progredire delle ricerche sulle perovskiti.⁵ Il variare delle proprietà legate alla superconduzione in funzione del contenuto in ossigeno può essere drammatico, ed è legato ad una particolare configurazione cristallina che vede alternarsi strati paralleli con strutture molto diverse. Per ciascuno di questi strati si parla di cristalli bidimensionali 'infiniti', e in un certo senso la definizione che abbiamo dato poco sopra di purezza microscopica (qui, meglio, di uniformità) si sdoppia dovendo valere indipendentemente per ciascuna delle due serie di strati.

Chimica vs. fisica

Nelle conclusioni di questo articolo daremo ragione dell'opportunità di distinguere il contributo dato da ciascuna disciplina alle ricerche sulla superconduttività, in questa sezione ci diamo gli strumenti per giungere almeno ad una stima della partecipazione della chimica allo sviluppo delle conoscenze che hanno un impatto diretto sul tema che qui ci interessa. Il primo strumento di indagine permetterà l'analisi epistemica e il confronto epistemologico delle *procedure conoscitive*, intese come l'insieme delle attività cognitive e pratiche che sono messe in gioco per giungere alla conoscenza scientifica mediante un esperimento od una osservazione. Il secondo strumento si dimostrerà più facilmente applicabile, e consisterà essenzialmente nell'*analisi lessicale* degli articoli di chimica e di fisica sulla superconduttività.

Le procedure conoscitive

Prima di entrare nel merito delle procedure conoscitive della chimica e della fisica introduciamo un'utile distinzione fra 'epistemico' e 'epistemologico'. Attribuiamo l'aggettivo 'epistemico' alle *mosse interne alle procedure conoscitive*, quali la scelta fra teorie alternative o complementari, le manipolazioni di laboratorio (ad es. una separazione), l'assunzione di una classificazione, ecc. L'aggettivo 'epistemologico' è riservato alla *valutazione delle procedure conoscitive* nel loro complesso e alla luce dei risultati ottenuti mediante quelle stesse procedure. *In nuce*: la ricerca di

3. J. S. Anderson, "Current Problems in Nonstoichiometry", in: R. Ward (Ed.) *Nonstoichiometric Compounds*, Washington D.C.: ACS, 1963, pp. 1-22.

4. R. Schenck, Th. Dingmann, "Gleichgewichtsuntersuchungen über die Reduktions-, Oxydations- und Kohlungsvorgänge beim Eisen III", *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, **166**, pp. 113-154 (1927).

5. Yu. D. Tretyakov, E. A. Goodilin, "Chemical principles of preparation of metal-oxide superconductors," *Russian Chemical Reviews*, **69** (1), pp. 1-34 (2000).

laboratorio è costituita da un insieme di atti epistemici, il confronto fra discipline è un atto epistemologico. Questa distinzione linguistica diventa più chiara se si prende in considerazione la Tabella 1. Le tre colonne si riferiscono a tre discipline che erano già riconoscibili come parti distinte dell'impresa scientifica verso la fine del Settecento. Delle procedure conoscitive disciplinari sono distinte e messe schematicamente in evidenza le *relazioni epistemiche* che legano l'esecuzione dell'esperimento o dell'osservazione con gli esiti dell'esperimento o dell'osservazione. È nel momento che confrontiamo le tre procedure disciplinari che cominciamo l'analisi epistemologica.

Tabella 1- Relazioni epistemiche fondamentali in chimica, fisica e astronomia



Le procedure conoscitive di tutte e tre le discipline si avviano a livello macroscopico – e non potrebbe essere altrimenti dato che gli operatori sono esseri umani. L'esito delle procedure è però straordinariamente diverso nel caso della chimica rispetto alla fisica e all'astronomia, in quanto i laboratori chimici producono *conoscenza e sostanze*, mentre i laboratori fisici e gli osservatori astronomici producono *esclusivamente conoscenza*. Differenze altrettanto importanti si riscontrano nel tratto intermedio della procedura, che, per esemplificare, nei tre casi potrebbe essere una sintesi, la misura della velocità di caduta di un grave, l'osservazione del transito di una cometa. Fisica e astronomia hanno assunto una posizione di preminenza tra la fine del Seicento e la metà del Settecento non solo per l'applicazione di potenti formalismi matematici, ma perché la meccanica di Newton spiegava quasi in ogni dettaglio il *movimento di corpi macroscopici*, terrestri e celesti. Tutte le fenomenologie che riguardavano eventi non visibili (elettricità, magnetismo, temperatura e trasmissione del calore) dovettero aspettare un secolo per trovare fondamenti appropriati in fisica.⁶ Le prime osservazioni astronomiche consapevoli di eventi microscopici vennero dopo la scoperta della spettroscopia atomica (1859) da parte di un fisico (Kirchhoff) e di un chimico (Bunsen). Lo sviluppo apparentemente lento e ritardato della chimica rispetto alla fisica è in una certa parte un abbaglio,⁷ dovuto allo splendore dei successi della fisica-matematica settecentesca, ma non si possono sottovalutare le difficoltà di una disciplina che deve sempre ragionare *post factum*. L'evento primordiale della reazione si manifesta in vari modi – calore, precipitati, ecc. – ma i protagonisti atomico-molecolari rimangono occulti, invisibili. Qui si può ricordare che fu il chimico inglese Joseph Black a proporre il concetto di equilibrio termico e a scoprire l'esistenza di una misteriosa proprietà dei corpi – il calore specifico.⁸

A nostro parere l'analisi epistemologica della Tabella 1 differenzia nettamente ciò che è indubitabilmente chimica da ciò che è fisica, tuttavia è evidente che si tratta di una analisi troppo astratta e ristretta per poter essere applicata alla valutazione del contributo della chimica alle ricerche sulla superconduttività. In fin dei conti la misura del punto di fusione di una sostanza organica è una procedura fisica, e molti chimici usano magistralmente spettroscopie di tutti i tipi (gli eventi microscopici tipici della seconda e della terza colonna di Tabella 1). È quindi opportuno mettere a punto una diversa strumentazione, meno selettiva e in grado di rendere giustizia del fatto che – da molti punti di vista – i chimici fanno anche della buona fisica.

Dialetti scientifici e analisi lessicale

A shprakh iz a dialekt mit an armey un flot
Max Weinreich, 1945

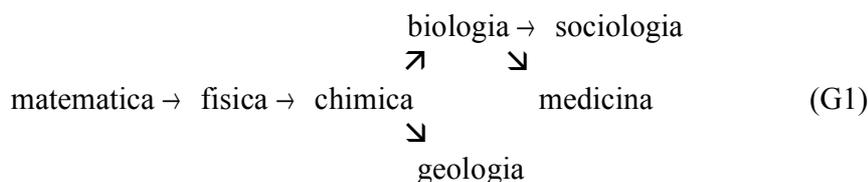
L'analisi linguistica si presta molto bene per gli scopi di generalità e applicabilità che ci siamo prefissati. In studi precedenti si sono sondate le differenze notevoli che presentano le lingue naturali usate nella scienza, anche quando trattano temi rigidi come una definizione metrologica, e si è appurato che la definizione di mole presenta notevoli diffe-

6. I fenomeni gravitazionali locali sono descritti alla perfezione, ma nonostante l'ottimismo dei fisici teorici nessuna teoria è in grado di spiegare l'intera fenomenologia macroscopica della gravitazione (tipicamente: la velocità di rotazione delle galassie).

7. Alla fine del Settecento la chimica analitica inorganica otteneva già ottimi risultati.

8. Perché 100 g di piombo per aumentare di un grado la loro temperatura assorbono molto meno calore di 100 g di acqua?

renze semantiche nelle otto lingue trattate (quattro romanze, e quattro germaniche).⁹ Nello stesso contributo era ripreso il problema dei dialetti in uso nelle varie discipline scientifiche¹⁰ e si metteva in evidenza che il contenuto semantico di termini fondamentali come |massa| variava in modo persino stravagante.¹¹ In effetti la distinzione fra lingua e dialetto è una delle più discusse e labili dell'intera linguistica, ma noi evitiamo di inoltrarci in distinzioni troppo sottili e orientiamo l'analisi a partire dalla citazione di Max Weinreich (1894-1969) che abbiamo messo in epigrafe di questa sezione. L'epigrafe è una traslitterazione dal yiddish, e la traduzione suona così: "Una lingua è un dialetto con un esercito e una flotta".¹² L'accezione usuale dell'aforisma è che è accettata come 'lingua' il dialetto reso ufficiale da uno stato sovrano, che lo utilizza nelle leggi e negli atti ufficiali. L'esercito e la marina sanzionerebbero l'esistenza dello stato sovrano. Noi diamo all'esercito e alla marina della citazione un ruolo per nulla simbolico. Nella storia, in occidente come in oriente, esercito e marina hanno *imposto* la lingua parlata dal conquistatore, con una attiva funzione di repressione e controllo. Nella scienza occidentale, a partire da Galilei e Cartesio, si è assistito all'imposizione della matematica nella variante fisico-matematica come linguaggio della scienza. In questo caso 'esercito e marina' sono state le accademie e le università, nonché una coorte di filosofi (e scienziati) che hanno articolato la gerarchia disciplinare che conosciamo così bene da ritenere 'naturale':



Il grafo precedente ha molte varianti dopo la chimica, ma ciò che appare storicamente inflessibile è il preteso dominio della matematica sulla fisica e della fisica sulla chimica.¹³ La storia della scienza ha dimostrato la fertilità dell'uso di strumenti matematici in ogni disciplina, e tuttavia le teorie del legame chimico e della struttura molecolare sono nate e si sono sviluppate senza alcun supporto sia da parte della matematica (eccetto alcuni concetti di topologia elementari e impliciti), sia da parte della fisica (fino alla metà degli anni 1920). Se si mescolano scelte filosofiche e questioni di potere ne viene fuori una potente ideologia, tuttora prevalente: quanto più si usa la matematica, tanto più si è scienziati. In ogni caso non esiste una 'lingua della scienza', date le evidenti difficoltà semantiche, per cui moltissimi termini tecnici di una disciplina risultano incomprensibili ai ricercatori che operano in altri campi. Qualsiasi discorso comunica qualcosa solo a chi è in grado di inserirlo in un contesto linguistico e operativo che gli sia noto e consolidato. Infatti non solo esistono i grandi dialetti scientifici, ma questi si spezzettano in una infinità di gerghi specialistici, fino a giungere allo *slang* caratteristico di ogni laboratorio.

Torniamo ora all'obiettivo immediato della nostra ricerca, e cioè mettere a punto uno strumento linguistico che ci permetta di valutare quale sia l'apporto della chimica allo sviluppo attuale della superconduttività. Una grande opportunità è data dall'accesso al testo elettronico degli articoli pubblicati sulle più importanti riviste scientifiche, abbiamo quindi seguito questo percorso: (a) individuare un insieme di parole chiave in grado di caratterizzare un discorso come 'discorso chimico'; (b) scegliere due serie di articoli che ragionevolmente si potessero dire 'di chimica' o 'di fisica'; (c) conteggiare le occorrenze delle parole chiave in ciascun articolo delle due serie. I risultati dell'indagine sono raccolti in Tabella 2 e in Tabella 3. Il *corpus* studiato è minimale, di 10 articoli per disciplina.

Bisogna subito dire che la lingua con cui sono scritti gli articoli esaminati è un 'inglese scientifico medio', una lingua franca che si è andata formando negli ultimi decenni sulla pubblicistica e nei congressi internazionali. Sul punto (a): quattordici delle sedici parole elencate nelle Tabelle sono state scelte a tavolino; |doped| e |doping| sono parole 'tematiche' che sono state aggiunte dopo la lettura dei primi articoli. Sul punto (b): la rivista chimica è il *Journal of Solid State Chemistry*, e i 10 articoli selezionati hanno la parola |superconductivity| in almeno una delle parti più significative dell'articolo (titolo, riassunto, parole chiave); la rivista di fisica è *Physica C: Superconductivity*, e i 10 articoli sono gli ultimi pubblicati.¹⁴ Le Tabelle sono un po' ingombranti, ma la loro analisi porta a risultati di qualche interesse.

9. L. Cerruti, "Osservazioni sulla quantità di sostanza e sulla mole. III. Semantica delle lingue naturali", *Chimica nella Scuola*, **25**, pp. 3-10 (2003).

10. L. Cerruti, "U l'è cin de cose ciàie u mundu. Osservazioni sui dialetti scientifici", *Epsilon* (Paravia), n. 8, 7-14 (1990).

11. Nella fisica dello stato solido si utilizza il termine |massa efficace|, che in realtà corrisponde ad un tensore, ed è quindi un ente matematico – tanto è vero che può assumere valori negativi. Noi chimici utilizziamo una fondamentale 'legge dell'azione di massa' che nulla ha a che fare con la massa dei reagenti.

12. La citazione è famosissima e si trova ripetuta in rete più di 4000 volte.

13. Ai tentativi di dominio si aggiunge spesso un malcelato disprezzo cognitivo e culturale verso la disciplina 'inferiore': a Torino i colleghi del Corso di laurea in fisica stanno valutando la possibilità di togliere dal curriculum il corso di chimica.

14. Alla data del 31 maggio 2010.

Già la prima riga è sorprendente. Agli autori di questo articolo sembrava che |substance| dovesse essere una parola fondamentale per il discorso chimico; essa invece non ha alcuna funzione nel *corpus* analizzato. Dato il tema della superconduttività altre due parole che si ritenevano rilevanti erano |stoichiometry| e |nonstoichiometry|, ma anch'esse sono risultate insignificanti. Ha però 17 occorrenze l'aggettivo |stoichiometric|, che troviamo in 7 articoli su 10; la differenza fra i nomi che indicano la proprietà in quanto tale e l'aggettivo, che è attribuito a un 'qualcosa' che ha quella proprietà, ha un significato operativo preciso: la stechiometricità non è studiata in quanto tale, ma le sue variazioni sono utilizzate in modo strumentale per ottenere nuovi superconduttori. Passando invece sul versante delle parole più usate, e quindi più indicative del discorso chimico vediamo che nel campione di 10 articoli abbiamo individuato 646 occorrenze dei 15 termini prescelti; assumiamo come rilevanti le parole che ricoprono almeno il 10% delle occorrenze totali. Queste parole sono: |compound|, |composition|, |material|, |structure|. Fra queste spicca ancora |structure| come termine irrinunciabile, essendo l'unico presente in 10 articoli su 10.

Tabella 2
Occorrenze di parole chiave della chimica
Journal of Solid State Chemistry

	Articoli										Occorrenze	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Totali	In articoli
substance	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1/10
reaction	1	0	11	0	1	0	2	2	3	0	20	6/10
compound	11	26	0	3	5	3	0	7	8	1	64	8/10
composition	32	6	14	4	9	0	9	7	0	0	81	7/10
concentration	0	1	7	8	1	0	3	7	0	0	27	6/10
stoichiometry	0	0	0	0	2	5	1	1	0	0	9	4/10
nonstoichiometry	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	3	3/10
stoichiometric	1	1	5	0	1	0	5	2	2	0	17	7/10
material	0	0	2	31	9	3	6	2	8	7	68	8/10
decomposition	3	0	6	0	0	0	5	2	0	0	16	4/10
formula	1	4	3	1	0	0	2	2	0	6	19	7/10
doped	0	0	14	1	10	1	8	3	6	0	42	7/10
doping	0	13	12	5	14	0	7	2	5	0	58	7/10
structure	27	5	7	17	37	31	39	15	11	18	207	10/10
preparation	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3	2/10
synthesis	2	0	10	0	1	3	3	7	2	0	28	7/10
Totali	80	56	92	70	91	46	90	61	44	33	663	

Passiamo ora alla lingua in uso in fisica. Non solo la rivista di cui abbiamo analizzato 10 articoli è un giornale di fisica, ma è proprio specializzato sulla superconduttività, dovremmo perciò trovarci sul bordo estremo della letteratura fisica.

Innanzitutto constatiamo un crollo delle occorrenze totali che si riducono ad appena più di un terzo di quelle presenti sulla rivista chimica. I termini |stoichiometry| e |nonstoichiometry|, già poco usati in chimica, risultano addirittura assenti in fisica, mentre i termini più usati sono |structure| e |composition|. La parola |material| è presente in 9 articoli su 10, seguita da |structure| (7 su 10); abbiamo visto che quest'ultimo termine è di importanza fondamentale in chimica, possiamo quindi dire che il concetto di struttura costituisce il ponte linguistico e cognitivo che collega le due discipline quando trattano la superconduttività.

Tabella 3
Occorrenze di parole chiave della chimica
Physica C: Superconductivity

	Articoli										Occorrenze	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Totale	In articoli
substance	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	1/10
reaction	0	2	0	0	0	0	0	0	9	0	4	2/10
compound	1	0	0	0	1	0	0	19	3	0	24	4/10
composition	2	0	1	0	7	0	0	19	11	0	40	5/10
concentration	0	0	18	0	2	0	0	5	4	0	29	4/10
stoichiometry	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0/10
nonstoichiometry	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0/10
stoichiometric	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1/10
material	4	1	4	3	3	1	0	9	3	5	33	9/10
decomposition	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	9	1/10
formula *	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1/10
doped	3	0	1	0	7	0	0	21	0	0	32	4/10
doping	0	1	0	0	9	0	0	9	0	0	19	3/10
structure	7	0	0	4	9	0	2	2	13	6	43	7/10
preparation	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	3	3/10
synthesis	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	1/10
Totale	18	5	26	7	38	1	2	88	46	11	242	

* La parola |formula| è utilizzata in senso matematico in 4 articoli con 9 occorrenze

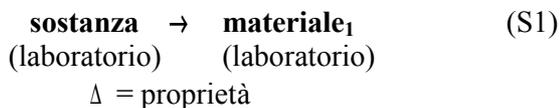
Un'ultima osservazione riguarda le occorrenze complessive dei termini 'chimici' nei singoli articoli di chimica e di fisica. Nei 10 articoli del *Journal of Solid State Chemistry* le oscillazioni rispetto alla media di 64 parole sono abbastanza ridotte, con un minimo di 33 e un massimo di 92. Nei 10 articoli di *Physica C: Superconductivity* le oscillazioni rispetto alla media di 24 sono fortissime, con due articoli che hanno soltanto una o due occorrenze, ed un articolo che ne ha ben 87, più di tre volte la media. Negli articoli indicati con i numeri 5, 8 e 9 vi è una buona iniezione di linguaggio chimico, così siamo andati a vedere le istituzioni di appartenenza dei ricercatori. L'articolo n. 5 è un contributo di tre istituzioni cinesi (Institute of Special Ceramics and Powder Metallurgy, General Research Institute for Nonferrous Metals, Department of Chemistry and Chemical Engineering); l'articolo n. 8 è giunto da due centri di Nuova Dehli (School of Physical Sciences, Department of Chemistry); l'articolo n. 9 è stato inviato da un laboratorio di Tokyo (Superconductivity Research Laboratory). È evidente che la presenza del linguaggio chimico è legata alla collaborazione diretta di chimici, esplicita per gli articoli nn. 5 e 8, implicita per l'articolo dei ricercatori giapponesi. Tutto sommato si constata che anche in una rivista ultra-specializzata come *Physica C: Superconductivity* le infiltrazioni del linguaggio chimico sono notevoli.

Concludiamo questa sezione rilevando che pur avendo avuto a che fare con molti numeri le indicazioni che ne abbiamo tratto devono essere ritenute indicative e stimolanti, ma non probanti. Per un'analisi quantitativa il *corpus* degli articoli sarebbe dovuto essere di un ordine di grandezza maggiore, e allora si sarebbero potute studiare le eventuali correlazioni statistiche fra i lemmi che abbiamo scelto.

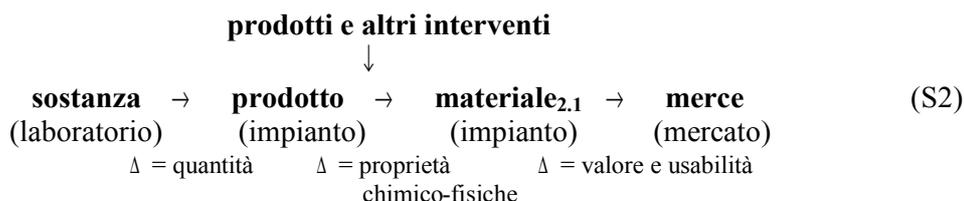
Dalle sostanze ai materiali

Abbiamo già sottolineato l'assenza del termine |substance| dal dizionario dei chimici che si interessano di superconduttività e scrivono nell'inglese medio della letteratura internazionale. Si può pensare che i chimici abbiano

trovato un discreto sostituto in *material*, un termine generale che può indicare sia elementi sia composti, ma sarebbe comunque un uso improprio, date le notevolissime differenze – non solo linguistiche – fra una sostanza e un materiale. In questa sezione vogliamo mettere in evidenza la necessaria distinzione fra una sostanza ed un materiale, in particolare tenendo conto che in molti casi la composizione dei campioni è la medesima. Consideriamo due casi tipici: un metallo come il rame, e un polimero come il polipropilene, e facciamo riferimento al seguente schema:



Lo schema sottolinea due aspetti del ‘passaggio’ da sostanza a materiale. Il primo aspetto è di precisare il luogo dove avviene il passaggio; in S1 si rimane in laboratorio; il secondo aspetto è che del materiale si valutano nuove proprietà, non richieste alla sostanza di per sé. In generale si tratta di una vasta categoria di proprietà meccaniche, dal modulo di torsione al carico di rottura. Nel caso di un materiale polimerico ci si può chiedere quale sia la permeabilità al vapore acqueo di un film sottile o la sua resistenza al taglio. È evidente che il campione del materiale da esaminare deve avere dimensioni, forma e consistenza adatte per le prove a cui deve essere sottoposto – una barretta, un film ecc. Ed è anche evidente che proprio in questa fase di trasformazione del campione, da *campione di una sostanza* a *campione di un materiale* si possono incontrare gravi difficoltà. La prima difficoltà, ineludibile, è di avere a disposizione abbastanza sostanza da poterla trasformare nel campione di dimensioni minime per le prove meccaniche, elettriche, ottiche, ecc.¹⁵ Ma anche quando si ha a disposizione una buona quantità di sostanza la preparazione di *oggetti* adatti alle prove può essere molto difficile, ed è questo un caso frequente nelle ricerche sulla superconduttività. Supponiamo ora di aver superato gli scogli insiti in S1, e consideriamo lo schema S2:



Lo schema S2 descrive i passaggi principali che connettono una sostanza sintetizzata in laboratorio con un materiale giunto sul mercato come merce. La differenza fra ‘sostanza’ e ‘prodotto’¹⁶ è qui posta come semplicemente quantitativa: così non è da diversi punti di vista, ma anche limitandoci alla quantità vediamo l’enorme distanza operativa fra il sintetizzare in laboratorio 100 g di sostanza (*una tantum*) e il produrne in un impianto 100 tonnellate (*pro die*).¹⁷ Il secondo passaggio è quello cruciale. Nella generalità dei casi e prima di diventare un materiale adatto per la fabbricazione di oggetti/parti d’uso il singolo prodotto viene ‘mescolato’ con altri prodotti, e questa ‘mescolanza’ fornisce al prodotto nuove caratteristiche che lo rendono un materiale da vendere o da avviare ad altre produzioni. Per rendere più concreto il termine ‘mescolanza’ (un po’ fantasioso) ci si può riferire alla preparazione di una lega leggera a partire dall’alluminio (sono ‘aggiunti’ a seconda dei casi magnesio, rame, zinco, silicio, ecc.) o alla produzione di una plastica a partire da un polimero (sono ‘aggiunti’ antiossidanti, addensanti, pigmenti, ecc.). Infine il materiale diventa merce quando assume un *valore di scambio* oltre che un *valore d’uso*. Dato che gran parte dei materiali prodotti dall’industria non giungono ai consumatori finali concludiamo a questo punto l’analisi, rinviando il lettore alle innumerevoli modificazioni che un materiale può subire prima di essere immesso sul mercato.¹⁸

Negli schemi S1 e S2 al termine ‘materiale’ abbiamo attribuito indici diversi che ora possiamo chiarire. In S1 materiale₁ è ancora tematizzato in un contesto di ricerca, e si studia il modo stesso di trasformare la sostanza in un oggetto fisicamente adatto alle misure. In S2 materiale_{2,1} è molto più lontano dalla sostanza di partenza, non solo perché possiede proprietà diverse, ma perché molte nuove proprietà derivano dalla perdita della virginale purezza della sostanza iniziale. Dato che non si può pensare che si debba lavorare all’interno di un impianto industriale per ottenere

15. Molte ricerche sui nanomateriali portano a campioni che non permettono nessuna misura macroscopica, per cui parlare di ‘materiali’ sembra essere un ‘pio desiderio’ più che un dato di fatto.

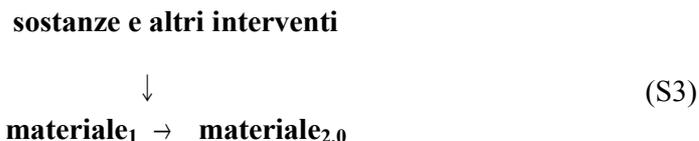
16. In modo convenzionale intendiamo per ‘prodotto’ ciò che si ottiene con una sintesi industriale.

17. Sottolineiamo che sono in gioco sei ordini di grandezza. Potrebbero essere anche di più.

18. Se il polietilene è confezionato in rotoli di fogli sottili e viene venduto in un supermercato (valore di scambio), il consumatore l’acquista perché lo utilizzerà per conservare meglio i cibi (valore d’uso). Se il polietilene è in *pellets* (sacchi da 25 kg, ordine minimo 10 tonnellate) il suo valore d’uso per il consumatore del supermercato è nullo, pur mantenendo il valore di scambio.

Elementi per un'analisi epistemica della scienza dei materiali

per la prima volta un materiale₂, la ricerca della scienza dei materiali non si limita allo schema S1, ma opera anche secondo lo schema S3:



Il confronto fra materiale_{2,0} e materiale_{2,1} mette però in luce una diversità che non è né chimica né fisica o meccanica, ma economica e sociale. Materiale_{2,0} è *usabile*, ma è ancora un oggetto di laboratorio e non potrà mai assumere un valore di scambio e diventare merce. È soltanto materiale_{2,1} ad avere questa potenzialità. E la potenzialità si svilupperà in senso positivo solo secondo S2, e cioè in seguito alla presenza di uno specifico insieme di condizioni socio-economiche e tecnologiche – il mercato. Finalità essenziale della scienza dei materiali è giungere a materiale_{2,0}, riservando ad altri attori sulla scena sociale di intraprendere il percorso S2.

È in relazione all'ottenimento delle proprietà finali dei materiali che da più parti si è distinto fra scienza dei materiali ed ingegneria dei materiali.¹⁹ Quando le proprietà diventano 'finali', assumono un nuovo nome: prestazioni.

Proprietà e prestazioni

Negli schemi S2 e S3 sono menzionati dei generici 'altri interventi' perché l'aggiunta di sostanze non copre affatto tutti i casi in cui un materiale₁ diventa un materiale_{2,0} e spesso si accompagna con altri tipi di trattamento. Molti materiali, compresi i superconduttori, hanno proprietà diverse a seconda dei trattamenti termici a cui sono stati sottoposti. In certi materiali si hanno variazioni importanti nelle proprietà anche attraverso processi puramente meccanici come la trafilatura; un altro trattamento in cui non intervengono sostanze è l'irraggiamento con microonde, ecc. Su un piano generale il rapporto fra proprietà e prestazioni si colloca in un contesto di ricerca i cui aspetti principali sono messi in relazione nella Figura 1.

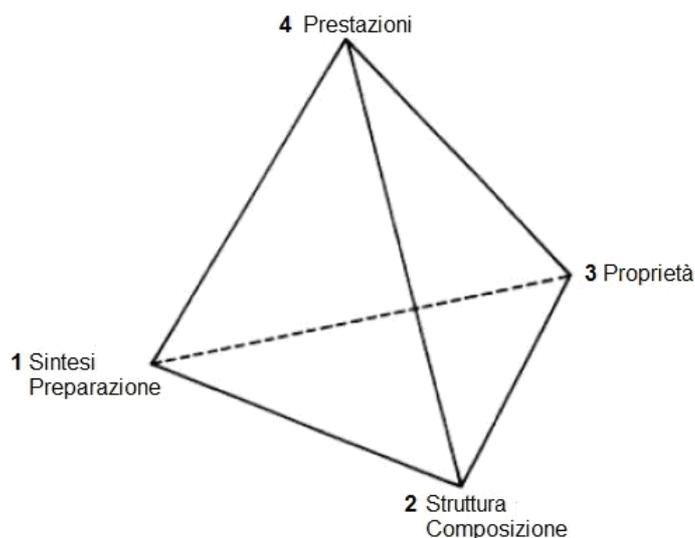


Figura 1

Relazioni fra i temi di ricerca della scienza dei materiali.²⁰

I quattro vertici del tetraedro di Figura 1 indicano i temi di ricerca assegnati a ricercatori che per comodità possiamo immaginare operino in luoghi diversi (ma questo per la nostra indagine è irrilevante). Ciò che distingue nettamente il vertice **1** dagli altri tre è la natura delle operazioni ad esso collegate. Sintesi e preparazione *producono* i campioni di materiali₁ e materiali_{2,0} che saranno successivamente sottoposti agli esperimenti che ne chiariranno struttura e composizione (**2**), e ne studieranno le proprietà (**3**). Ad arrivare alla verifica delle prestazioni (**4**) possono aspirare soltanto i campioni di materiali_{2,0}, in quanto *usabili in contesti diversi* dai laboratori chimici, fisici e chimico-fisici. D'altra parte i sei spigoli del tetraedro di Figura 1 indicano percorsi reali di informazioni e di campioni. Per l'efficienza del sistema di ricerca i flussi di informazione debbono essere bidirezionali, mentre l'invio dei campioni è unidirezionale: inizialmente da **1** a **2**, **3** e **4**; dopo la verifica delle prestazioni da **4** a **2** e **3**. È importante seguire il per-

¹⁹. Si veda ad es.: W.D. Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, New York: Wiley, 2007, p. 3.

²⁰. National Academy of Science, *Materials Science and Engineering for the 1990s: Maintaining Competitiveness in the Age of Materials*, 1989, p. 29.

corso dei campioni perché ciò che il sistema di ricerca di Figura 1 deve produrre è un qualcosa di concreto e utilizzabile, e non semplici informazioni. Da questo punto di vista i laboratori relativi ai vertici 2 e 3, per quanto avanzati possano essere, sono strutture di servizio; essi ricevono i campioni ma non ne producono di nuovi. I luoghi relativi al vertice 4 possono essere attrezzati nei modi più diversi, in funzione delle prestazioni che devono essere valutate; anche essi non producono campioni, ma quasi sempre li alterano e così chiamano in causa i laboratori dei vertici 2 e 3, affinché indaghino le cause chimiche, fisiche e meccaniche delle alterazioni.

La Figura 1 fu proposta nel 1989 da un pletorico Comitato di scienziati e tecnologi organizzato dalla statunitense National Academy of Science. Al di là delle possibili interpretazioni il merito principale di questa immagine è che rende immediatamente percepibile il fatto che tutte le fasi della ricerca sono connesse fra di loro. Che questo non sia l'unico modo di vedere quelle relazioni diventa chiaro quando si incontrano dichiarazioni 'logiche' come la seguente: "Oltre alla struttura e alle proprietà due altre importanti componenti sono coinvolte nella scienza e nell'ingegneria dei materiali – cioè la preparazione (*processing*) e la prestazione. Riguardo alle relazioni fra queste quattro componenti, la struttura di un materiale dipende da come è preparato; Inoltre la prestazione di un materiale sarà una funzione delle sue proprietà. Così l'interconnessione (*interrelationship*) fra preparazione, struttura, proprietà, e prestazione è [la seguente]"²¹:

preparazione → struttura → proprietà → prestazione S4

Il testo che abbiamo appena citato è giunto alla settima edizione, e l'autore è uno dei più noti didatti nel campo della scienza dei materiali.²² La linearità e l'irreversibilità implicita dello schema S4 ci dice parecchie cose sull'occultamento della complessità che è tipico di molta didattica.

Il ventaglio di prestazioni che possono essere richieste ad un materiale è molto ampio, in quanto i ruoli funzionali dei materiali sono molti, così che si hanno materiali strutturali, elettronici, magnetici, ottici, superconduttori e biomateriali.²³ Non ci addentriamo in questo ginepraio, che – per altro – è dominio quasi esclusivo del terzo incomodo: l'ingegnere. Il più delle volte è l'ingegnere che ha a che fare con il mondo della produzione e dell'economia, e non il chimico o il fisico. Di qui un 'imperialismo' degli ingegneri, che, accademicamente parlando, non è dissimile da quello dei fisici.

Superconduttività: lo stato dell'arte a metà degli anni 1980

Il campo disciplinare della superconduttività, a metà degli anni Ottanta del Millenovecento, era stato da circa settant'anni indagato con impegno e dedizione da molti fisici di vaglia. Con una classificazione ex-post, possiamo riferirci ad esso come LTS (Low-Temperature Superconductivity) per differenziarlo dall'altro settore che emergerà con forza all'attenzione del mondo, non solo della scienza, e che è stato battezzato HTS (High-Temperature Superconductivity). Come è noto, fin da quando il fisico olandese Heike Kamerlingh Onnes lo scoprì nel 1911²⁴, il fenomeno della superconduttività ha avuto un posto importante per i fisici, sia sperimentali che teorici. Probabilmente il suo essersi rivelato recalcitrante ad ogni teoria definitoria che lo rendesse soggetto al binomio spiegazione-predizione, tanto caro a certo mondo degli scienziati, lo rendeva affascinante e contemporaneamente stimolante per nuove indagini. Gli anni successivi alla scoperta del 1911 furono anni di ricerca di base condotti in diversi laboratori, caratterizzati anche da alcuni tentativi di applicazione, i quali tuttavia ebbero scarso successo. Alla fine degli anni Trenta la ricerca in questo settore conobbe un notevole battuta d'arresto, causata da motivi differenti a seconda delle varie nazioni in cui la ricerca veniva supportata: i gruppi britannici si dedicarono a un altro fenomeno ritenuto più importante, la superfluidità; la scuola olandese risentì del contraccolpo dovuto alla morte del fondatore Onnes; le purghe staliniane decimarono i gruppi sovietici. Dopo la fine della Seconda Guerra Mondiale la fisica delle basse temperature conobbe un rinnovato impulso grazie ad un innovativo apparato per liquefare l'elio, messo a punto nel 1952 da S. C. Collins (1898-1984) del Dipartimento di ingegneria meccanica del MIT.²⁵ Il numero delle pubblicazioni nel settore della criogenia aumentò infatti di circa il 10-15% all'anno durante gli anni Cinquanta e Sessanta.²⁶ I progressi tecnologici nella produzione dell'elio liquido consentivano il raggiungimento di una temperatura di 0.3 K e dunque offrivano un'accresciuta possibilità di studi sperimentali. Bernd Matthias, coadiuvato da John Hulm e Ted Geballe (questi due ricercatori passati

21. Rif.19, pp. 3-4; nel testo originale lo schema S4 è presentato in una illustrazione.

22. La traduzione italiana è giunta alla seconda edizione.

23. Rif. 20, p. XXI.

24. Sono stati pubblicati diversi articoli sul tema della superconduttività da parte dello scienziato danese, tra cui ricordiamo: H. Kamerlingh Onnes, "Further Experiments with liquid helium. H. On the electrical resistance of pure metals etc. VII The potential difference necessary for the electric current through mercury below 4.19 K ", *Comm. Physical Lab. Leiden*, **133b**, 29 (1913); "Further experiments with liquid helium. H. On the electrical resistance of pure metals etc. VIII. The sudden disappearance of the ordinary resistance of tin, and the super-conductive state of lead", *Comm. Physical Lab. Leiden*, **133d**, 51 (1913).

25. S.C. Collins, "Helium Liquefier", *Science*, **116**, pp. 289-294 (1952).

26. H. Nowotny, U. Felt, *After the Breakthrough. The Emergence of High-temperature Superconductivity as a Research Field*, Cambridge: Cambridge University Press (1997).

poi a lavorare rispettivamente presso la Westinghouse e la Stanford University), condusse una mappatura sistematica degli elementi e delle leghe che esibivano un qualche comportamento superconduttivo, unitamente a caratterizzazioni magnetiche, ottiche e termiche. Vennero così individuati composti intermetallici che esibivano la temperatura critica più alta mai osservata, pari a 23 K. Tali composti presentano formula A_3B , dove A sta per il niobio e B per stagno, silicio o alluminio.

Negli anni Cinquanta, ancora, prese piede l'uso di dividere i materiali superconduttori in due tipologie, i superconduttori di Tipo I e di Tipo II. I materiali di Tipo I sono quelli che espellono completamente il flusso del campo magnetico poiché presentano una perfetta conduzione elettrica. I materiali del secondo tipo invece, non essendo completamente diamagnetici, consentono al flusso del campo magnetico di penetrare nel materiale. I materiali di Tipo I sono i meno interessanti per possibili applicazioni poiché un debole campo magnetico sopprime la superconduzione. Già negli anni trenta i lavori teorici di Ginzburg a Landau unitamente a quelli dei fratelli Fritz e Heinz London avevano evidenziato queste differenze. Ma il contributo teorico più significativo fu dato nel 1957 dai fisici Bardeen, Cooper e Schrieffer che proposero una teoria conosciuta come teoria BCS.²⁷ Tale teoria, che prende il nome dalle iniziali dei tre fisici, spiegava tra l'altro l'accoppiamento degli elettroni mediata dai fononi e divenne sorprendentemente popolare grazie all'interesse che riscosse presso i media. La teoria BCS spiegava il perché dell'esistenza dei due tipi di materiali superconduttori, ma non prediceva per nulla quale tipologia di materiale sarebbe ricaduto in un tipo piuttosto che nell'altro.

C'è da segnalare ancora un fatto di notevole interesse in questo breve ed essenziale resoconto sullo stato dell'arte, e cioè la scoperta dell'effetto Josephson, ad opera di un giovane studente di Cambridge, Brian Josephson (nato nel 1940), che nel 1962 pose le basi teoriche²⁸ per la realizzazione della giunzione Josephson e per ulteriori decisivi sviluppi nella microelettronica, in particolare per i dispositivi SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). Gli anni seguenti furono dediti al perfezionamento tecnologico in particolare negli anni Settanta si arrivò alla produzione di magneti superconduttori usati negli acceleratori di particelle. Poi, agli inizi degli anni Ottanta, i magneti superconduttori vennero impiegati per la MRI, la risonanza magnetica nucleare per immagini, largamente impiegata nella diagnostica medica.

Il contributo dei francesi

Tra i molti composti che presentavano in un certo grado comportamento superconduttivo c'erano anche alcuni tipi di ossidi. E da questi vogliamo partire per tracciare la storia che portò alla cosiddetta 'rivoluzione svizzera'. Uno studente di W. H. Zachariasen²⁹, presso l'Università della California a San Diego, osservò nel 1973 che il composto LiTi_2O_4 transiva alla fase superconduttiva alla temperatura critica (T_c) di 13,7 K, mentre la temperatura critica più elevata registrata per questa classe di composti era stata di 6-7 K (in particolare per $\text{Rb}_{0,2}\text{WO}_3$). Il passaggio successivo fu fatto presso il laboratorio della Dupont presso Wilmington ove il gruppo di ricerca di A. W. Sleight studiava la famiglia di ossidi di formula $\text{BaP}_{(1-x)}\text{Bi}_x\text{O}_3$, con x variabile tra 0 ed 1, e cioè tutti quegli ossidi che potevano essere fatti variando con continuità la composizione chimica tra i due composti 'estremanti' BaPbO_3 e BaBiO_3 (composti con T_c di 12 K, ossia, come detto prima, di circa una decina di gradi Kelvin inferiore al massimo valore registrato tra tutti i composti superconduttori allora conosciuti). Certamente questi dati non rivestivano carattere di eccezionalità né suscitarono un interesse particolare presso i fisici teorici; dobbiamo tuttavia segnalare come in questa fase iniziano a entrare in scena i chimici e la loro peculiare opera di produzione di sostanze.

A questo punto dobbiamo imboccare un'altra strada, il motivo sarà chiaro poco a poco, e prestare la nostra attenzione ai composti a base di ossigeno, che sono molti e molto studiati. Una particolare classe di essi, le perovskiti, sono composti con formula ABX_3 e traggono il loro nome dal conte Lev Aleksevich von Perovski, collega del mineralista Gustave Rose che li descrisse nel 1830 e che diede loro il nome di perovskiti in onore del collega. Sono composti molto studiati come si diceva prima, e un gruppo dell'Università di Caen alla fine degli anni Settanta tentava di impiegarli come sensori per la pressione di ossigeno, basandosi su un'idea semplice: come ogni cristallo reale, possiede differenti tipi di difetti, tra cui i siti caratterizzati da mancanza di atomi di ossigeno. Queste vacanze generano ovviamente una deformazione del reticolo cristallino, sicché, volendoli indagare per le proprietà piezoelettriche, si trova un cambiamento nelle proprietà elettriche. Tra i fisici componenti il gruppo di ricerca c'erano C. Michel e B. Raveau i quali iniziarono a studiare l'ossido di tungsteno e sodio (Na_xWO_3), che poi accantonarono per la distanza troppo elevata tra gli atomi di tungsteno. Con quale tipo di composti sostituirlo? Nel 1978 nei laboratori Hagenmuller di Bordeaux era stato sintetizzato l'ossido LaCuO_3 , che però necessitava della formidabile pressione di 65 kilobars. Poiché questo dettaglio rendeva difficile, nei laboratori di Caen, il ricorso a tale ossido, Raveau e Michel pensarono di sostituire par-

27. J. Bardeen, L. N. Cooper, e J. R. Schrieffer, "Microscopic Theory of Superconductivity", *Phys. Rev.* **106**, pp. 162 - 164 (1957).

28. Si veda all'URL: http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1973/josephson-lecture.html.

29. W. H. Zachariasen, D. C. Johnston; "High temperature superconductivity in Li-Ti-O ternary system", *Mater. Res. Bull.* **8**:777-84 (1972).

zialmente gli atomi di rame (elemento che ha differenti valenze) e pubblicarono nel 1984 sul *Bulletin de chimie minérale* la notizia della sintesi del composto $\text{La}_3\text{Ba}_3\text{Cu}_6\text{O}_{14}$, composto ricco di vacanze di ossigeno e dunque adatto ai loro scopi. Come è ovvio misurarono anche le caratteristiche elettriche del composto, in particolare la resistività, ma soltanto fino a 90 K e non a temperature inferiori poiché potevano usare solamente l'azoto liquido (che come è noto permette di raggiungere la temperatura di 77 K) e poiché il raffreddamento avveniva mediante contatto.

La svolta

Come abbiamo già accennato, i risultati di Sleight non destarono particolare interesse dal punto di vista sperimentale e applicativo. Le implicazioni teoriche di quei lavori, con sguardo retrospettivo, si può affermare che elementi interessanti tali per cui se si fossero seguite avrebbero condotto a interessanti previsioni su ossidi con alta T_c . La T_c dei composti a base di bario, piombo e bismuto era infatti tre-cinque volte quella prevista dalla formula McMillan, considerata la bassa densità elettronica in gioco. Inoltre, la composizione chimica del composto a più alta T_c tra quelli della stessa famiglia, e cioè formula $\text{BaP}_{(1-x)}\text{Bi}_x\text{O}_3$ con $x=0.3$, risulta simile a quella di isolanti formati con metalli di transizione. E in aggiunta, tale composto ha una struttura perovskitica.

Ancora un altro aspetto è da tenere da conto: un teorico del CNRS di Grenoble, Benoy K. Chakravarty, studiava i sistemi con forte interazione elettrone-fotone e aveva mostrato che alla T_c un materiale superconduttore transisce dallo stato superconduttivo a uno stato non di normale stato conduttore ma ad uno stato *bipolaronico*. Scriveva egli stesso: "Possiamo considerare entità localizzate come coppie di Cooper localizzate (una coppia di elettroni su siti atomici vicini, uno con spin *up* e l'altro con spin *down*); essi sono stabili fin tanto che la mutua interazione fra di loro, dovuta alla deformazione che essi stessi inducono, eccede la repulsione coulombiana [...] Questi bipolaroni sono paia BCS costituiti da un elettrone localizzato e da un elettrone libero".³⁰ Il primo tentativo da parte di Chakravarty di pubblicazione dei propri studi risale al 1979, ma la densità dei calcoli e uno stile non immediato e in molti tratti astruso fecero sì che solo al quarto tentativo il *referee* acconsentì alla pubblicazione.³¹

Su questo sfondo si muove Karl Alex Müller, uno dei *fellows* dei laboratori IBM a Zurigo-Ruschlikon, e dunque con libertà di ricerca. Müller era giunto quasi al pensionamento, dopo una carriera come fisico dedito ai materiali intermetallici superconduttori. Il ruolo di *fellow* gli consentiva di ritornare pienamente alla ricerca e avere libertà di movimento e scelse di dedicarsi agli ossidi superconduttori, partendo tuttavia da un approccio differente rispetto a quello usato da Matthias: più che una ricerca sistematica mirò a un progetto di ricerca partendo dai lavori più significativi dei teorici. Per questa scelta incontrò sulla sua strada i lavori di Chakravarty e indirizzò il suo interesse verso composti in cui la presenza di bipolaroni localizzati implica la presenza di cariche negative localizzate. Ma a Müller mancavano le competenze per sintetizzare gli ossidi. Nel laboratorio IBM di Zurigo lavorava un giovane chimico tedesco, Johannes Georg Bednorz che aveva lavorato inizialmente con Gerd Roher e Heinrich Binnig, i due inventori del microscopio a forza atomica, *fellows* nello stesso laboratorio e (successivamente) premi Nobel. Ma a trentasette anni Bednorz non aveva certo la libertà di movimento e di decisione di Müller, sicché iniziò a lavorare nel laboratorio di Müller con incarichi amministrativi e poté dedicarsi al lavoro sperimentale nell'orario extra-lavorativo. Partendo dai lavori del 1973, iniziarono a preparare perovskiti; soltanto due anni dopo l'inizio di collaborazione arrivò sotto i loro occhi l'articolo dei francesi Michel e Raveau. Bednorz decise di sintetizzare gli ossidi misti perovskitici di Bario, Lantanio e Rame, oggetto degli studi dei francesi, usando il metodo della co-precipitazione a partire da una soluzione acquosa di nitrati di Bario, Lantanio e Rame. Seguivano l'aggiunta di acido ossalico con conseguente formazione di ossalati, la loro precipitazione e, dopo averli raccolti, il riscaldamento ad alte temperature condotto in atmosfera riducente. Fu così che dopo il Natale del 1985, alla ripresa dell'attività, i due ricercatori svizzeri poterono registrare la caratteristica curva di resistività tanto attesa: in funzione della temperatura, la curva registrava un lieve abbassamento ai 30 K e andava completamente a zero alla temperatura di 10 K. Era il 27 gennaio 1986. Realizzarono che il composto ottenuto presentava sette differenti fasi, corrispondenti eventualmente a sette differenti composti. Questa circostanza, con la conseguente evidenza che il composto in questione differiva da quello dei francesi, implicava una nuova sintesi e nuove misure di resistività. Ci vollero tre mesi e infine fu deciso di inviare un resoconto alla *Zeitschrift für Physik*, dove giunse il 17 aprile. W. Buckel, il direttore della rivista, era a capo di un gruppo di ricerca nel campo della superconduttività in Germania, intuì immediatamente la novità del lavoro e decise di essere egli stesso il *referee*. L'articolo vide la luce nel giugno 1986 con il prudente titolo *Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System*.³²

30. B. K. Chakravarty, "Possibility of insulator to superconductor phase transition" *J. Physique Lett.* 40, pp. L99-L100 (1979). Questa lettera di nemmeno due pagine fu pubblicata il 1° marzo 1979.

31. B. K. Chakravarty, "Bipolarons and superconductivity", *J. Physique*, 42, pp. 1351-1356 (1981). Il primo manoscritto di Chakravarty fu ricevuto il 23 agosto 1979 e fu finalmente accettato il 21 maggio 1981.

32. J. G. Bednorz, K. A. Müller, *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, "Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System", 64, n. 2, pp. 189-193 (1986).

Euforia

Non tutti gli scienziati lessero l'articolo di Bednorz e Müller con gli stessi occhi. Non pochi furono gli scettici, in quanto – come vedremo più oltre – il contributo dei fisici svizzeri poteva sembrare più ricco di promesse che di fatti. Douglas Finemore, un fisico della Iowa State University ammise che lui e il suo gruppo avevano letto l'articolo, ma dichiarò candidamente: "Tenemmo una riunione e decidemmo che non era nulla di ché (*there was nothing to it*)".³³ Tuttavia molti dei ricercatori che operavano nel campo della superconduttività presero sul serio i risultati di Bednorz e Müller e nei mesi seguirono vi furono nuovi annunci su materiali che presentavano T_c sempre più alte, e, contestualmente, si riaccese l'interesse per le applicazioni tecnologiche. Ching-Wu Chu, un fisico nato a Taiwan e più conosciuto con il nome americano di Paul Chu, era un allievo di Matthias e ricercatore presso la University of Houston. Chu annunciò pochi mesi dopo la T_c di 40 K per la stessa famiglia di composti, ma con differente composizione chimica. Tra la fine del 1986 e l'inizio del 1987 Chu trovò evidenze sperimentali di superconduttività per T_c superiori ai 77 K nel composto $Y_1Ba_2Cu_3O$, ottenuto per sostituzione del lantanio con ittrio. Il suo gruppo e quello di M.-K. Wu dell'University of Arkansas misurarono per gli stessi composti una T_c pari a 93 K.³⁴ Come sottolinearono più volte nel corso dell'articolo i loro campioni presentavano una sicura superconduttività a temperature superiori a quella del punto di ebollizione dell'azoto liquido. L'annuncio del superamento di questa cruciale soglia tecnologica scatenò un pandemonio nella comunità scientifica, e specialmente in quegli ampi settori dei fisici e dei chimici dello stato solido che già lavoravano sulla superconduttività o che si sentivano in grado di partecipare alla corsa verso il nuovo Eldorado.

Nel marzo 1987, quasi a dare una rappresentazione corale dell'euforia che ispirava gli scienziati dello stato solido la American Physical Society decise all'ultimo minuto di dedicare una sessione speciale del suo Congresso annuale alla superconduttività. Per apprezzare la tempestività dell'iniziativa si deve tener conto che l'articolo di Chu e Wu fu pubblicato sulle *Physical Review Letters* il 2 marzo 1987, e la sessione si tenne il 18 marzo. L'evento fu certamente insolito. La sessione era stata convocata per le 19.30 nell'ampia sala da ballo del Hotel Hilton di New York, ma già intorno alle 17.30 i ricercatori si affollavano davanti alle porte della sala, che si aprirono alle 18.45. La folla irruppe senza tanti complimenti, tra spintoni e gomitate, tuttavia anche dopo aver invaso i corridoi di sicurezza molti dovettero rimanere fuori, e seguire lo spettacolo dai monitor della televisione a circuito chiuso. Vi furono in tutto 51 comunicazioni, in generale di cinque minuti, con l'eccezione dei dieci minuti concessi alle comunicazioni di Müller, presente all'evento, e di Chu. Applausi scroscianti seguivano ad ogni annuncio di scoperte più o meno probabili, e la sessione terminò ufficialmente alle tre un quarto del mattino successivo. Le stime dei partecipanti variano fra i 2000 e i 3000.

Nell'articolo di *Time* che raccontava in tono stupefatto ed ironico la 'sessione' al Hilton si parla esplicitamente di una "orgia di speculazioni sulle potenziali applicazioni".³⁵ Qui è opportuno un richiamo alla nostra Figura 1 perché ci permette di fare il punto della situazione. Quando si parla di applicazioni dovrebbero essere garantite – o quasi – due condizioni. La prima condizione è che si abbia a che fare effettivamente con un materiale, ossia che si sia nella situazione indicata nello schema S1, con le misure già eseguite per definire le nuove proprietà che 'trasformano' i campioni di una sostanza nei campioni di un materiale. Solo dopo che si ha tra le mani un materiale si può tentare di procurarsi informazioni sulle *prestazioni* di Figura 1, prestazioni la cui conoscenza è indispensabile per poter articolare un progetto applicativo. Da questo punto di vista il giornalista di *Time* aveva ragione di parlare di *orgia*, e cioè di uno stato collettivo di eccitazione e confusione. D'altra parte nella sala da ballo del Hilton qualcuno era rimasto sobrio, così John Hulm, Direttore del settore ricerche della Westinghouse dichiarò: "Ci vorrà una straordinaria opera di ingegneria per risolvere il problema della fragilità" di questi materiali. Altri scienziati si dimostrarono molto più ottimisti, al punto da far dubitare che fosse un ottimismo non tanto inteso ad orientare la ricerca, quanto piuttosto utile a far salire le quotazioni in borsa delle azioni della propria azienda.

Erano trascorsi appena due mesi dalla tumultuosa sessione di New York che giungeva alla stampa una dichiarazione ad un tempo autorevole e fantastica. Il fisico indiano Praveen Chaudhari era il dirigente dell'IBM responsabile delle ricerche condotte da Bednorz e Müller nel laboratorio di Zurigo, e aveva presentato in una conferenza stampa un risultato eccellente: "se due settimane or sono mi avessero detto che avremmo avuto superconduttori ad alta temperatura che possono condurre correnti intense, avrei detto che stavano sognando. Ora, se qualcuno mi dicesse che il mese prossimo avremo degli dispositivi (*devices*) utili, fatti di questo materiale, non lo definirei un sognatore. E' a questa velocità che questo campo sta avanzando". Causa dell'entusiasmo del dirigente dell'IBM era un oggetto descritto come "un cristallo della lunghezza di un quarto del diametro di un capello umano, ma di solo un centesimo di capello di spessore".³⁶ Questo oggetto, invisibile ad occhio nudo, aveva condotto una corrente di oltre 100.000 A. Anche in questo

33. "Science: Superconductors!", *Time*, 11 maggio 1987; letto all'URL: <http://www.time.com/time/printout/0,8816,964303,00.html>

34. M. K. Wu, J. R. Ashburn, and C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu, Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure, *Physical Review Letters* 58, 908–910 (1987).

35. Rif. 33.

36. *Time*, 25 maggio 1987. L'espressione *one-hundredth the thickness of a human hair* appartiene al gergo della comunicazione scientifica, e sta ad indicare che si tratta dell'ordine di grandezza del nanometro, ovvero di un millesimo di millimetro.

caso abbiamo la misura di una proprietà fondamentale, anzi della proprietà che definisce il materiale, ma la situazione conoscitiva è ancora al vertice **3** della Figura 1, e non è nemmeno iniziato quel movimento di campioni dai luoghi 'di base' verso quello in cui si valutano le prestazioni (il vertice **4**).

Dopo l'incontro di New York la ricerca nei laboratori di tutto il mondo continuò al massimo ritmo possibile, e non mancarono risultati importanti. Nel dicembre 1987 i ricercatori giapponesi guidati da H. Maeda trovarono T_c di 110 K per gli ossidi BiCaSrCuO e nel gennaio 1988 Z. Z. Shen e A. Hermann, utilizzando ossidi con calcio e tallio, registrarono T_c di 120-125 K. Le nuove scoperte, le grandi possibili implicazioni tecnologiche e il risalto che i *media* diedero a tali scoperte portarono a una vera e propria gara tra nazioni per investire nel settore e arrivare ad ottenere importantissime applicazioni più velocemente delle altre. In particolare, la gara tra Giappone e Stati Uniti fu serrata e in tale contesto fu pronunciato il 28 luglio 1987 dall'allora Presidente Ronald Reagan il famoso discorso conosciuto come *Eleven-points Superconductivity Initiative* per finanziare il campo applicativo e tecnologico dei materiali superconduttori, e contrastare i successi delle industrie giapponesi (Mitsubishi, Toshiba, Nippon Telegraph) e tedesche (Siemens, Dornier, Interatom). Ma non erano in gioco soltanto questioni economiche, e infatti al quarto punto della 'iniziativa' di Reagan si leggeva: "Il Dipartimento della Difesa sta sviluppando un programma a diversi livelli per assicurare il più presto possibile l'uso delle tecnologie della superconduttività nei sistemi militari. Il Dipartimento della Difesa spenderà 150 milioni di dollari in tre anni".³⁷ È certo che finanziamenti di questo tipo davano una spinta poderosa per sollevare la ricerca dalla 'base' di Figura 1 verso il vertice **4** delle prestazioni in condizioni realistiche (in questo caso di guerra!).

Tre contributi a confronto

Possiamo ora mettere a confronto i contributi 'seminali' dei tre gruppi di ricercatori che abbiamo preso in considerazione analizzando in particolare la struttura dei riferimenti bibliografici presenti negli articoli, riferimenti che sono essenziali per gli autori e per i lettori in quanto precisano di volta in volta le conoscenze che sono (o meglio sarebbero) necessarie per una corretta comprensione del testo. Iniziamo ovviamente dal contributo di Michel, Er-Rakho, e Raveau. La loro nota, pubblicata sul *Materials Research Bulletin*, non raggiungeva le cinque pagine di testo, incluse due figure e la bibliografia; il testo fu battuto a macchina dai ricercatori francesi e riprodotto fotograficamente negli Stati Uniti dalla Pergamon Press, che allora deteneva la testata. La rivista è esplicitamente dedicata alla ricerca sui materiali, ma a quali materiali puntavano i tre scienziati? La risposta si ha immediatamente dalle prime tre righe dell'articolo, dove essi si riferiscono all'interesse per la perovskiti con difetto di ossigeno per le "potenziali applicazioni in catalisi ed elettrocatalisi o come sensori". Le tre citazioni che completano la frase e rinviano ai diversi campi applicativi riguardano articoli e testi di interesse strettamente chimico. Seguono immediatamente quattro autocitazioni che riguardano la chimica dello stato solido e la chimica inorganica. La parte sperimentale riporta i risultati delle analisi chimiche e strutturali (quest'ultime eseguite con spettri di polvere e di diffrazione elettronica), e delle misure elettriche e magnetiche. Le due figure di cui abbiamo parlato consistono in diagrammi che riportano le misure di resistività fra -100 e $+300$ °C, e di potere termoelettrico, di cui sono richiamati nel testo i valori a temperatura ambiente e a 500 K. Il risultato importante, del comportamento 'metallico' delle perovskiti, è interpretato alla luce di una teoria del fisico inglese Nevill F. Mott (1905-1996), senza nessun riferimento diretto alla superconduttività. L'esito della nostra lettura è univoco: si tratta di un lavoro di chimica dello stato solido.

L'articolo che valse il premio Nobel per la fisica a Bednorz e Müller fu pubblicato su una rivista 'tedesca', ormai inesorabilmente scritta in inglese. Nello specifico si trattava della parte B della *Zeitschrift für Physik*, dedicata alla *Condensed Matter*. Le prime due righe del testo sono una citazione tratta da un rapporto sullo stato dell'arte – con relative applicazioni – redatto da un gruppo di ricercatori americani dopo un incontro tenuto in Colorado nel novembre del 1983. È interessante rileggere la citazione di Bednorz e Müller:

"At the extreme forefront of research in superconductivity is the empirical search for new materials".³⁸

Il testo originale è piuttosto diverso:

"At the extreme forefront of research in superconductivity is the empirical search for new superconductors, which is part of the more general search for new materials with novel physical properties via the systematic synthesis of new classes of materials".³⁹

Non si tratta soltanto di una 'abbreviazione', perché i ricercatori americani avevano indicato una via privilegiata per fare avanzare il fronte della ricerca sulla superconduttività: la "sintesi sistematica di nuove classi di materiali". Sembrerebbe che Bednorz e Müller abbiano intuito già allora che la loro scoperta avrebbe chiuso, almeno per diverso tempo, la strada

37. Citato da: C. H. Lai, A. Kidwai (a cura di), *Ideals and realities: selected essays of Abdus Salam*, Singapore: World Scientific Publishing Co., 1989, p. 165.

38. Rif. 32.

39. M. Tinkham, M. R. Beasley, D. C. Larbaestier, A. F. Clark and D. K. Finnemore, "Research Opportunities in Superconductivity", *Report on the Workshop on Problems in Superconductivity*, 22-23 August 1983, Copper Mountain, Colorado, November 1983, p. 12.

che era già stata ben battuta da Bernd Matthias (vedi sopra).⁴⁰ Nel complesso però l'articolo non presenta altre sorprese, ed anzi ha una struttura classica, se non addirittura scolastica, divisa in sezioni e sottosezioni. La prima sezione (*Introduction*) fa il punto della situazione conoscitiva e richiama 16 dei 23 riferimenti bibliografici presenti nel testo; sono comprese tre autocitazioni, di cui l'ultima ad un loro articolo *in preparation*.⁴¹ L'ultima citazione della sezione si riferisce ad un lavoro di Michel e Raveau del 1984, interessante per gli autori svizzeri in quanto metteva in evidenza la compresenza di "stati elettronici itineranti fra Cu^{3+} (senza effetto Jahn-Teller) e Cu^{2+} (con effetto Jahn-Teller)". La seconda sezione (*Experimental*) inizia con una sottosezione intitolata "Preparazione del campione e caratterizzazione", e con una prima citazione in un certo senso ironica, perché riprende ancora il contributo di Michel e Raveau, ma non come ispiratori della ricerca vincente di Bednorz e Müller, bensì come proponenti del "metodo di coprecipitazione da soluzioni acquose", seguito per la preparazione dei campioni di perovskiti. Le successive sottosezioni della parte sperimentale riguardano la "Analisi con i raggi X" e le "Misure di conduttività". Data la natura della ricerca le misure di conduttività sono certamente cruciali, ed è in questo contesto che troviamo nella strategia sperimentale di Bednorz e Müller una mossa tipicamente 'chimica', il cambiamento di concentrazione: "lo stato di valenza mista è importante per l'accoppiamento elettrone-fonone. Quindi fu variata la concentrazione degli elettroni mediante il rapporto Ba/La". Nella terza sezione (*Discussion*) gli autori riferiscono in particolare le prove reperite in letteratura sul rapporto fra superconduttività e natura policristallina dei campioni. Qui, per due volte sono richiamati i ricercatori francesi, la prima per confermare la struttura a strati dei granuli che costituiscono il campione, la seconda, con la comparsa nel testo del nome di Michel, in questi termini: "Il modo con cui i campioni sono stati preparati sembra essere di importanza cruciale". La quarta e ultima sezione (*Conclusion*) è estremamente breve e termina con un'esplicita *affermazione di incompletezza*, da colmare con future ricerche: "È in corso la caratterizzazione della nuova fase, apparentemente (*apparently*) superconduttrice. L'identificazione di quella fase può permettere la crescita di cristalli singoli per studiare l'effetto Meissner e per ottenere i dati di calore specifico che provino la presenza di una superconduttività massiva (*bulk*) ad alta T_c ". Da questa nostra lettura risulta evidente la cura con cui Bednorz e Müller sottolineano gli aspetti strutturali e preparativi dei loro campioni. Una parte relevantissima della fisica della superconduttività, quella dell'effetto Meissner e della misura dei calori specifici a bassissime temperature, non entra ancora in scena, rinviata al momento in cui i ricercatori svizzeri saranno in grado di preparare un campione adatto alle nuove misure. Se ripensiamo alla nostra precedente analisi della 'trasformazione' di una sostanza in un materiale, vediamo che nell'aprile 1986 Bednorz e Müller erano ancora alle prese con le pratiche di laboratorio che precedentemente avevamo descritto nello schema S1, che – per comodità – riportiamo nuovamente:

$$\begin{array}{ccc} \text{sostanza} & \rightarrow & \text{materiale}_1 & (S1) \\ (\text{laboratorio}) & & (\text{laboratorio}) & \\ \Delta = \text{proprietà} & & & \end{array}$$

In realtà gli scienziati svizzeri non avevano nemmeno un campione della *sostanza* dello schema S1, in quanto i segnali che annunciavano il superamento della soglia di superconduttività provenivano solo da una *fase* delle tre individuate a livello strutturale. La sostanza di interesse era ben presente nei loro campioni, ed infatti ne avevano avvertito la presenza attraverso una lunga serie di misure, ma erano ancora necessarie due operazioni distinte: isolare la fase superconduttrice e individuare altre proprietà per essere certi di avere un nuovo materiale₁, il germe iniziale di un formidabile *new material*.

Il terzo contributo che esaminiamo è la *letter* in cui Chu e Wu (e molti altri) annunciano l'ottenimento di un *compound system* con una T_c fra gli 80 e i 93 K.⁴² Anche retoricamente l'articolo si presenta come un grido di vittoria. È molto breve, non superando le due pagine e mezza, ed inizia con un periodo che – forse senza volerlo – ricorda da vicino l'esordio dell'articolo di Bednorz e Müller:

"The search for high-temperature superconductivity and novel superconducting mechanisms is one of the most challenging tasks of condensed-matter physicists and material scientists".

È netto il contrasto con l'atteggiamento 'pratico' dei ricercatori svizzeri che vedevano sul "fronte estremo della ricerca sulla superconduttività" la "ricerca empirica di nuovi materiali". Qui invece si punta nientemeno che alla scoperta di "nuovi meccanismi" di superconduzione. A questa premessa segue l'annuncio che il guanto di sfida di superare la soglia del punto di ebollizione dell'azoto è stato raccolto:

40. Sulla citazione iniziale dell'articolo di Bednorz e Müller e sul contesto economico del rapporto da loro citato e stilato dagli scienziati americani vi è un gustoso commento in rete, all'URL: <http://www.w2agz.com/SuperWiki.htm>. Allo stesso indirizzo è reperibile una splendida raccolta di articoli fondamentali riguardanti la superconduttività e le sue applicazioni.

41. Questa citazione appare singolare, perché non è indicata la rivista a cui i due autori vorrebbero inviare l'articolo. Vedremo anche successivamente in questo contributo di Bednorz e Müller e nell'articolo di Chu e Wu altre citazioni sorprendenti.

42. Rif. 34.

"To obtain a superconducting state reaching beyond the technological and psychological temperature barrier of 77 K, the liquid-nitrogen boiling point, will be one of the greatest triumphs of scientific endeavor of this kind. According to our studies,¹ we would like to point out the possible attainment of a superconducting state with an onset temperature higher than 100 K, at ambient pressure".

Raramente si legge in un articolo scientifico che gli autori abbiano conseguito "uno dei massimi trionfi dell'impresa scientifica", superando una barriera non solo tecnologica ma pure 'psicologica'. *Psychological* è un aggettivo singolare quando è riferito ad un dato di fatto fisico, una temperatura limite al di sopra della quale si può usare un certo gas liquefatto piuttosto che un altro. Però lo stesso aggettivo diventa più comprensibile quando si legge la didascalia della Figura 1 del loro articolo: "Dipendenza dalla temperatura della resistenza determinata in un semplice Dewar con azoto liquido". È stata quindi la pratica di laboratorio, così radicalmente modificata, a colpire psicologicamente Chu e i suoi collaboratori. Abbiamo lasciato nella trascrizione della citazione il riferimento bibliografico originale che rinvia alla richiesta di Chu di un brevetto, richiesta spedita il 12 gennaio 1987, quasi un mese prima dell'arrivo dell'articolo alla redazione delle *Physical Review Letters* (6 febbraio). Secondo uno stile classico, che già era stato seguito dagli scienziati tedeschi dell'Ottocento, Chu aveva pensato prima al denaro e poi alla gloria.

Dal punto di vista formale la nota di Chu e Wu non presenta nulla di interessante in quanto non presenta suddivisioni tematiche, ed ha effettivamente l'andamento di una *letter*. Per i contenuti che più ci interessano è notevole il fatto che gli autori non hanno nemmeno a che fare. La prima citazione dell'articolo di Chu è una autocitazione e così pure la terza, ma già la quinta è riferita all'articolo di Bednorz e Müller, presentato con la data di pubblicazione – settembre 1986 – e con il commento che negli ultimi 75 anni ben poco si era riusciti a fare per innalzare la T_c , ma che in seguito al contributo dei ricercatori svizzeri "la situazione era cambiata drasticamente". Le successive dieci citazioni completano i riferimenti bibliografici dell'articolo, e sono estremamente interessanti perché offrono uno spaccato delle consuetudini della frangia più avanzata della comunità scientifica, quella in cui non si aspetta di avere l'articolo pubblicato a stampa prima di far conoscere ai colleghi (a certi colleghi) i propri risultati. Delle dieci citazioni quattro si riferiscono ad articoli *to be published*. Tre di questi riferimenti sono di altri gruppi di ricerca, uno giapponese, uno cinese, e uno svizzero – quello di Bednorz e Müller. Le ultime due indicazioni bibliografiche chiudono in bellezza questa 'bibliografia', in quanto rimandano rispettivamente a dati degli autori *non* pubblicati e ad un articolo del giornale ufficiale del Partito Comunista Cinese, il *Renmin Ribao* del 17 gennaio 1987. Questo è certamente uno dei riferimenti bibliografici più straordinari nella storia della scienza.

Epilogo in penombra

L'impressione generale che abbiamo tratto, sia dalla lettura del campione di articoli contemporanei, sia dal breve *excursus* storico, è che in gran parte della letteratura chimica e fisica in cui si parla di 'materiali superconduttori' gli autori si trovano in una situazione conoscitiva che non va oltre quella descritta in S1, là dove si sondano le proprietà di sostanze che *potrebbero* portare ad un materiale, o – nel migliore dei casi – si misurano già le proprietà di un campione 'nudo' di materiale₁, non ancora nemmeno usabile in altri contesti come avviene per un materiale_{2,0}. E dal punto di vista delle difficoltà di giungere ad un materiale_{2,1}, il materiale che può essere messo sul mercato o comunque utilizzato come merce, i discorsi seguiti alla riunione nella sala ballo del Hilton di New York sono semplicemente esilaranti. Dato che gli scienziati che si lanciavano in divagazioni oniriche non erano ubriachi, è evidente che si trattava di pura propaganda.

All'inizio di questa nostra nota abbiamo segnalato l'opportunità di distinguere il contributo dato dalla fisica e dalla chimica alle ricerche sulla superconduttività, dando a questa distinzione il senso di una *valutazione epistemica* – riferita cioè alle scelte interne alle procedure di ricerca. In realtà la distinzione porta con sé la possibilità di un *giudizio epistemologico* – esterno alle procedure di ricerca – un giudizio sul valore complessivo delle conoscenze disciplinari. Senza essere completamente arbitrario il giudizio epistemologico è quasi sempre separato dalla valutazione epistemica, ed è fortissimamente condizionato dalle gerarchie accademiche. Per essere chiari, se la fisica (come disciplina accademica) si presenta nei Consigli di facoltà, e altrove, come la scienza culturalmente e socialmente più prestigiosa, allora il giudizio epistemologico sul contributo della fisica e della chimica alla superconduttività non può che essere squilibrato a favore dei detentori del livello gerarchico superiore. Alla formazione del giudizio epistemologico concorrono molte componenti, dalla tradizione storica al suo consolidamento/cambiamento attraverso la riflessione filosofica e la ricerca storica, mentre il prestigio sociale della disciplina risente direttamente dell'impatto della divulgazione e dell'accesso privilegiato ai *media*. A sua volta il *prestigio sociale* orienta tutte le forme di *sostegno economico* da parte di enti di ogni sorta, pubblici e privati. Il grafo G1 che presenta crudamente la gerarchia disciplinare tradizionale non è il risultato innocente di un processo spontaneo, ma l'esito di una severa selezione culturale condotta con costanza e rigore dai matematici e dai fisici, spesso in veste di filosofi della scienza.

Nelle sezioni dedicate all'analisi linguistica della letteratura contemporanea abbiamo dimostrato che vi è molta chimica

43. Ad essere pignoli si potrebbe ricordare che i recipienti contenenti l'azoto liquido, enfatizzati dagli autori come *simple liquid-nitrogen Dewar*, devono il loro nome al chimico inglese James Dewar (1842–1923).

Elementi per un'analisi epistemica della scienza dei materiali

nelle pubblicazioni che trattano la superconduttività, anche in articoli che sono definiti 'di fisica'. Abbiamo considerato in qualche dettaglio epistemico i tre articoli di interesse storico, articoli che una volta messi nella successione temporale e conoscitiva mostrano che all'origine di tutto vi fu un contributo di chimica dello stato solido. L'articolo di Raveau e Michel fu letto con occhi 'misti' dal fisico Müller e dal chimico Bednorz, e la fatale fase superconduttrice fu ottenuta solo con attente pratiche di sintesi e di decomposizione controllata. Nella *letter* di Chu e Wu alla preparazione dei campioni sono dedicate soltanto quattro righe e mezza e una indicazione bibliografica, senza alcun riferimento alle pratiche di laboratorio.⁴³ La successione dei tre articoli può essere letta come un racconto metaforico del rapporto storico fra chimica e fisica, con il contributo della prima alla seconda messo costantemente in ombra dalla supremazia culturale della comunità dei fisici su quella dei chimici. Sottolineiamo che la presenza di questa ombra non incide per nulla sull'autonomia disciplinare della chimica, saldamente ancorata alla differenza radicale delle relazioni epistemiche delle procedure conoscitive in chimica e fisica (Tabella 1). La penombra in cui viene a trovarsi la chimica ha conseguenze rilevanti da altri punti di vista, compresi quelli dei finanziamenti alla ricerca e del reclutamento. Ma questo è un altro discorso.

LA CHIMICA E L'AGRICOLTURA

Marco Taddia

Dipartimento di Chimica "Giacomo Ciamician", Università di Bologna
marco.taddia@unibo.it

Il secolo scorso è stato caratterizzato da un'esplosione demografica senza precedenti nella storia umana. La popolazione del pianeta, che nel 1900 era costituita da 1 miliardo e 650 milioni di persone, nel 1999 era salita a quasi 6 miliardi, per l'esattezza 5.978 milioni, con l'Asia a condurre la corsa (da 947 milioni di abitanti a 3.634). Davanti a queste cifre ci si chiede come sia stato possibile sfamare tutte queste bocche in più e abbattere il tasso mortalità, pur con le tante drammatiche eccezioni che tutti conosciamo. Ebbene, senza trascurare gli eccezionali progressi della medicina e il miglioramento delle condizioni di vita, sarebbe difficile negare, anche per i nemici della chimica, che il merito principale vada all'agricoltura moderna intensiva la quale, grazie soprattutto alle conquiste della chimica, ha aumentato la produzione a ritmi vertiginosi e che, se ben distribuita, potrebbe assicurare il necessario sostentamento anche a chi soffre la fame. Purtroppo tale drammatica condizione riguarda tuttora più di un sesto dell'umanità. Nel 2009, secondo gli esperti FAO, la previsione era di 1,02 miliardi di persone ma, secondo gli stessi esperti, ciò sarebbe stato conseguenza della crisi economica che precludeva il rifornimento di cibo e non della carenza a livello mondiale [1]. Oggi, specialmente nei Paesi più sviluppati, c'è una diffusa domanda di agricoltura "organica" o "biologica", imputando a quella che si avvale di concimi sintetici nefaste conseguenze sulla salute umana e sull'ecosistema. Di certo, l'abuso di fertilizzanti e soprattutto il ricorso incontrollato e immotivato ad antiparassitari ed erbicidi è da condannare ma, accanto a questo, non bisogna dimenticare, come ha scritto Hoffmann (Nobel, 1981) che già nell'Ottocento, grazie alla chimica, il rendimento di un ettaro di buon terreno americano seminato a mais crebbe di un fattore sei [2]. Ma il decollo vertiginoso della produzione agricola mondiale che consentì di nutrire l'umanità, permettendo a metà di noi essere al mondo, si ebbe a seguito della sintesi industriale dell'ammoniaca. Le tappe fondamentali di questa impresa, sono state recentemente rievocate da Scaglione, ex collaboratore di Fauser (l'inventore italiano), in un interessante Convegno che si è svolto durante le celebrazioni del Centenario SCI [3], insieme con una panoramica sulla situazione attuale della produzione [4]. La ricerca e lo sviluppo della tecnologia necessaria impegnò per oltre un decennio la scienza e l'ingegneria tedesca. Riassumendo, si ricorda che le prime esperienze di Haber risalgono al 1903, gli studi termodinamici di Nernst al 1905, il primo brevetto di Haber al 1908, la produzione con tecnologia Haber-Bosch in un impianto pilota al 1910, l'inizio della produzione su scala industriale al 1913. Insieme agli enormi benefici di un'invenzione che *Nature* ha definito la più importante del '900, occorre ricordare che essa ha contribuito parecchio ad aumentare l'inquinamento del pianeta e, soprattutto, che essa fu voluta a tutti i costi dai tedeschi con obiettivi militari per arrivare, tramite l'ammoniaca, all'azoto nitrico richiesto dagli esplosivi. Non fu un caso, infatti, se la I Guerra Mondiale scoppiò poco dopo. Anche in occasione della sintesi dell'ammoniaca si rivelarono i due volti della chimica e il suo prestarsi, a seconda dell'utilizzatore, per azioni benefiche o malvagie. Tornando all'agricoltura, si può rilevare che l'enorme impatto della chimica sui progressi della medesima è parso, con il trascorrere del tempo, un risultato quasi scontato. La fuga dalle campagne ha fatto il resto, facendo quasi dimenticare come si producono i cibi che si trovano sugli scaffali dei supermercati. Questo lavoro intende recuperare e riproporre, specie ai più giovani, il patrimonio conoscitivo di tipo chimico che ha consentito lo sviluppo dell'agricoltura a fronte dell'incremento demografico e, in definitiva, la nostra stessa sopravvivenza.

Il dualismo tra scienza e pratica

Il contributo della chimica allo sviluppo dell'agricoltura si esprime, oggi come in passato, attraverso la cosiddetta *Chimica Agraria*. Come ha scritto Italo Giglioli circa un secolo fa nell'introduzione al Trattato di cui si parlerà anche più avanti [5], la Chimica Agraria "non è tanto facile a definire, inquantochè, essendo esclusivamente agraria, non è scienza esclusivamente chimica". Oggi diremmo che è materia interdisciplinare. Giglioli faceva notare che molti erano scettici in merito all'utilità delle spiegazioni che poteva dare la chimica agraria. Secondo costoro, la *pratica* era sviata dalla *scienza* e dicevano che la scienza non avrebbe mai potuto far crescere due fili d'erba laddove ne cresceva uno solo. Moltissimi agricoltori italiani, diceva Giglioli, consideravano la Chimica Agraria una *nuovissima ed oziosa novità; la quale ha bisogno di essere predicata con buone dimostrazioni del perché si predichi e, soprattutto, vuol essere praticata*. Ciò spiega, tra l'altro, perché diversi manuali di quel periodo contengono soprattutto indicazioni pratiche a carattere agronomico, anche molto dettagliate, piuttosto che argomenti di tipo chimico. Il dualismo fra pratica e scienza lamentato da Giglioli emergeva, con "dolorosa meraviglia", anche nelle *Lezioni di Chimica Agraria* di Malaguti [6], pubblicate cinquant'anni prima. Malaguti scriveva che "L'Agricoltore, ... non teme ancora di circondarsi, come di corazza, de' più sragionati sofismi, per provare che l'agricoltura può e deve fare senza la Chimica", giudicando incomprensibile che i futuri amministratori di terreni non venissero educati, almeno in piccola parte alla Chimica pratica. Il dualismo trova qualche spiegazione in interessanti documenti minori, come ad esempio alcune memorie di

Gherardo Freschi pubblicate dall'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti pubblicate nella seconda metà dell'800 [7,8] o l'Almanacco di Antonio Selmi [9] il quale scriveva che “La scienza vestitasi di bisso e di porpora disdegna di occuparsi delle cose che avvengono comunemente e...finisce col separarsi dal popolo”. D'altronde, si sa che Filippo Re (1763-1817), celebre professore di Agronomia a Bologna, autore di opere che ebbero larga diffusione fino al 1850 circa, rifiutava il contributo della chimica e quello della microscopia al sapere agronomico. Le cose cominciarono cambiare con le scoperte di Liebig, ma ci volle molto tempo a convincere gli agricoltori. Tornando a Giglioli, scriveva pure che questi pregiudizi nuocevano agli interessi collettivi e, pertanto, non si poteva “sorridere tacendo” di fronte ai tanti che ritenevano la *pratica* sviata dalla *scienza*. Invece, secondo lui, non vi poteva essere dualismo fra scienza e pratica perché erano gradi differenti della medesima cosa. Scriveva Giglioli che “lo scienziato e il pratico sono compagni nello studio della Natura, ed uniti nello scopo di conoscerne le forze, e dominarle” e aggiungeva che il primo tende più al conoscere e il secondo a dominare. Osservava anche acutamente che non vi è scienza, per quanto pura, che non derivi da qualche pratica antica e che, presto o tardi, non suggerisca nuove applicazioni, mentre non vi è pratica che non sottintenda scienza od esperienza. Scorrendo la storia della chimica agraria, le osservazioni di Giglioli trovano frequentemente riscontro.

Alcuni temi

Concentrando l'attenzione sul secolo XIX si può dire che l'agricoltore si poneva alcuni quesiti pratici d'interesse chimico, che vale la pena riprodurre nei termini che il citato Freschi utilizzava nella memoria “Di che guadagni vada l'agricoltura debitrice alla chimica agricola e all'esperienza scientifica” presentata il 26 novembre 1877 e pubblicata l'anno seguente [7]:

Quale è il valore o l'utilità di una rotazione qualsiasi?

Quale lo stato di esaurimento del suolo dopo questo o quel raccolto?

Quali materie fa d'uopo restituire alla terra, per mantenere il suo grado di fertilità?

Quale è l'influenza reale del clima sulla produzione?

Diceva Freschi che “nel principio di questo secolo (cioè dell'800) siffatti quesiti non trovavano che vaghe risposte. Gli scienziati, da parte loro, s'interrogavano su alcune questioni di carattere fondamentale. Ci si chiedeva, ad esempio, se gli animali e le piante potessero assimilare direttamente l'azoto atmosferico per produrre i composti organici che formano la loro struttura, ne determinano la crescita e li mantengono in vita. Per quanto riguarda gli animali si giunse presto ad escludere tale possibilità e, tra gli altri, gli esperimenti del fisiologo francese François Magendie (1783-1855) ebbero un ruolo importante in tal senso. Per quanto riguarda le piante, invece, i dubbi e le discussioni si protrassero a lungo. Un altro punto da chiarire erano gli scambi gassosi fra le piante e l'atmosfera. A questi si sommavano gli interrogativi sul ciclo del carbonio, l'individuazione degli elementi necessari alla nutrizione delle piante e, infine, il ruolo della luce e del calore. Si vedrà ora chi s'impegnò su questi problemi e, più in generale, su tutto ciò che, in agricoltura, interessava il mondo scientifico e quello contadino. La bibliografia su questi argomenti è molto estesa e qui si tenterà una sintesi a scopo principalmente didattico. Benché citare tutte le fonti valide sia di fatto impossibile, ne verrà presentata una discreta selezione. Se è lecita una sottolineatura, va fatta per l'ottima “Storia delle Scienze Agrarie” di Antonio Saltini [10], opera forse insuperata per ricchezza di contenuti, valore culturale e iconografico.

Come premessa di questa breve rassegna occorre ricordare che la chimica vegetale e in particolare la classificazione dei componenti delle piante, impegnò lungamente i chimici a partire da colui che è ritenuto il fondatore della chimica moderna, ossia A.L. Lavoisier (1743-1794). Dopo aver tentato di applicare alla nomenclatura degli acidi e degli alcali vegetali i principi stabiliti per quelli minerali, Lavoisier, nel suo *Traité*, ammetteva che si era ben lungi dall'essere in grado *dal poter fare una classificazione metodica di queste sostanze* [11]. Per un'eccellente disamina del problema della classificazione vegetale fino ai primi decenni del secolo XIX, si veda l'eccellente lavoro della Klein [12]. Per uno sguardo d'assieme, non aneddótico ma ragionato e documentato, sullo sviluppo della chimica agraria, della fisiologia vegetale, della fitochimica e della zoochimica fino ai primi del '900, rimane un sicuro punto di riferimento la Storia della Chimica di Victor Meyer tradotta da Giua e Giua Lollini [13].

Protagonisti

Home

La chimica del suolo nacque, secondo alcuni, ad opera del naturalista scozzese Francis Home (1719-1813). E' colui al quale viene attribuita la prima analisi chimica dei terreni, di carattere soprattutto separativo, cui aggiunse indagini chimiche per far luce sui meccanismi della nutrizione vegetale [10]. I suoi *Principles of Agriculture and Vegetation* (1757) ottennero la medaglia d'oro della *Society of Improvers in the Knowledge of Agriculture in Scotland*, ancor prima di vedere le stampe. La Società di Edimburgo fu, per la cronaca, la prima a nascere in Europa nel 1723. Home non fu in grado di dare un nome alle sostanze che trovò nel terreno perché la chimica muoveva ancora i primi passi, ma di certo trovò calcare, azoto organico, olii, grassi e resine. Nonostante i limiti dell'operazione fu in grado di individuare qualche responsabile della fertilità dei terreni. Il suo libro fu tradotto prima in francese, poi in italiano nel 1763.

Saussure

Il naturalista svizzero Nicolas-Théodore de Saussure (1767-1845) si occupò inizialmente di fisica dell'atmosfera poi passò alla fisiologia vegetale studiando la germinazione e l'assimilazione e, infine, la fermentazione. Fu aiutato dall'abilità conquistata nell'analisi dei gas. La sua celebre opera *Recherches chimiques sur la végétation* (1804) è divisa in sei capitoli. Nel primo si esamina l'influenza dell'ossigeno sulla germinazione; nel secondo quella del gas acido carbonico (diossido di carbonio) sulla vegetazione; nel terzo quella dell'ossigeno sulle piante sviluppate e nel quarto quella del medesimo su *qualche principio immediato nei vegetali*. Vale la pena soffermarsi brevemente sul secondo che, probabilmente, porta a compimento una delle maggiori conquiste della storia della scienza. Nel *Riassunto* con cui conclude il capitolo, De Saussure afferma infatti che *la presenza o piuttosto l'elaborazione del gas acido carbonico è indispensabile alla vegetazione delle piante verdi al sole: esse muoiono quando si sottragga loro, a questa esposizione, il gas acido che esse formano col gas ossigeno che le circonda*. Nel terzo capitolo, invece, l'analisi degli scambi gassosi fra l'atmosfera e l'ambiente nell'oscurità, porterà De Saussure a stabilire che sono di segno opposto rispetto a quelli che verificano alla luce [10].

Davy

Il chimico inglese Humphry Davy (1778-1829) è così celebre che non è necessario riportarne qui, nemmeno per sommi capi, la biografia. Non per nulla, nell'incisione di Fig. 1 lo si vede accostato a Lavoisier, Berzelius e Liebig. I suoi interessi di studio e di ricerca furono vasti. Quello per l'agricoltura si espresse principalmente con una serie di conferenze tenute la prima volta nel 1803, successivamente ampliate, arricchite di intuizioni originali e proposte anche alla Società di Agricoltura di Dublino nel 1811. Più tardi, nel 1813, le pubblicò in due volumi. Divennero presto famose all'estero e furono tradotte anche in italiano. Nel 1815, l'editore Piatti di Firenze le pubblicò con il titolo *Elementi di Chimica Agraria*. Davy analizzò la composizione, le caratteristiche e le modalità di separazione delle sostanze che formano i tessuti vegetali. Davy si avvale degli straordinari progressi che la chimica aveva compiuto alla fine del '700. Definì la gamma delle sostanze costitutive come prodotti della combinazione di C,H,O, ai quali aggiungeva, per particolari classi di composti, anche l'azoto. Individuava anche la presenza di ossidi metallici e sali. Riusciva a definire i rapporti quantitativi dei tre costituenti principali in alcuni composti di origine vegetale come l'amido. Affrontava anche lo studio dei processi con i quali le piante producono i loro costituenti e continuava ad occuparsi degli scambi gassosi con l'atmosfera, sulla scia di De Saussure [10].



Figura 1

Boussingault

Meno noto di Davy, Jean Baptiste Joseph Boussingault (Parigi, 1802-1887) merita qualche notizia biografica in più. Fu inizialmente uno studente mediocre che però manifestò presto notevole interesse per le scienze. Ammesso all'École Polytechnique nel 1815 ne uscì poco dopo per passare all'École des Mines di Saint-Etienne. Qui si distinse per la chimica e già al secondo anno divenne preparatore e fu dispensato dal sostenere alcuni esami. Pubblicò il suo primo articolo a 18 anni per interessamento di Gay-Lussac. Terminata la scuola s'impiegò nelle miniere del Basso Reno poi, più tardi, si trasferì in Colombia per conto di una società mineraria. Rientrato in patria nel 1829 insegnò chimica a Digione e dal 1839 al 1845 sostituì Dumas alla Sorbona. Passò poi al Conservatoire des Arts et Métiers, dove ottenne la Cattedra d'Agricoltura e divenne collega di Anselme Payen. Ma dovette trascorrere un po' di tempo perché Boussingault potesse interamente dedicarsi alle ricerche che lo resero famoso e che gli assicurarono il titolo di "padre dell'agronomia" [10]. Esse si possono dividere in tre gruppi: nutrizione e alimenti umani; valore alimentare delle risorse destinate agli animali; prime valutazioni quantitative del ciclo dell'azoto nei vegetali e negli animali [14]. Per quanto riguarda il ciclo dell'azoto, Boussingault stabilì con una serie di esperimenti effettuati tra il 1851 e il 1854 che l'azoto gassoso dell'atmosfera non viene assimilato direttamente dalle piante. Aveva coltivato graminacee (grano, avena) e le-

guminose (piselli, trifoglio) sottraendo loro progressivamente i mezzi che lui riteneva necessari per la captazione dell'azoto, fino a quello che riteneva la privazione totale. Ciononostante, vide che fornendo al trifoglio e ai piselli soltanto acqua e aria, su un suolo totalmente privo di concime organico, queste piante avevano assorbito oltre a carbonio, idrogeno ed ossigeno anche una quantità di azoto apprezzabile all'analisi. In sostanza, con tutte le sue precauzioni, Boussingault non era riuscito ad inibire completamente lo sviluppo dei batteri del genere *Rhizobium* che oggi sappiamo essere i responsabili dell'assorbimento dell'azoto in forma ammoniacale e dei quali allora era ignota l'esistenza. Le piante, infatti, utilizzano l'azoto inorganico in forma di nitrato o di ione ammonio. L'approvvigionamento è legato all'attività di organismi azoto fissatori e di organismi capaci di demolire sostanze azotate complesse. Tra i fissatori simbiotici, capaci di vita libera, hanno rilevanza i batteri del genere *Azotobacter* (aerobi), *Clostridium* (anaerobi) e altri. La fissazione simbiotica è invece caratteristica di associazioni tra microrganismi e piante superiori. In questo secondo caso, nei luoghi d'infezione si formano delle protuberanze, denominate noduli, che si trovano prevalentemente nelle radici. Il meccanismo della fissazione simbiotica non è sempre chiaro; fra i più studiati c'è quello della simbiosi fra le radici delle leguminose e varie specie del *Rhizobium*.

Malaguti

Anche Faustino Malaguti un chimico italiano che fu esule in Francia nell'età del Risorgimento è da inserire fra coloro che contribuirono maggiormente allo sviluppo e all'insegnamento della chimica agraria. E' opportuno soffermarsi un po' più a lungo su questa figura e la sua opera perché è più nota in Francia che in Italia.

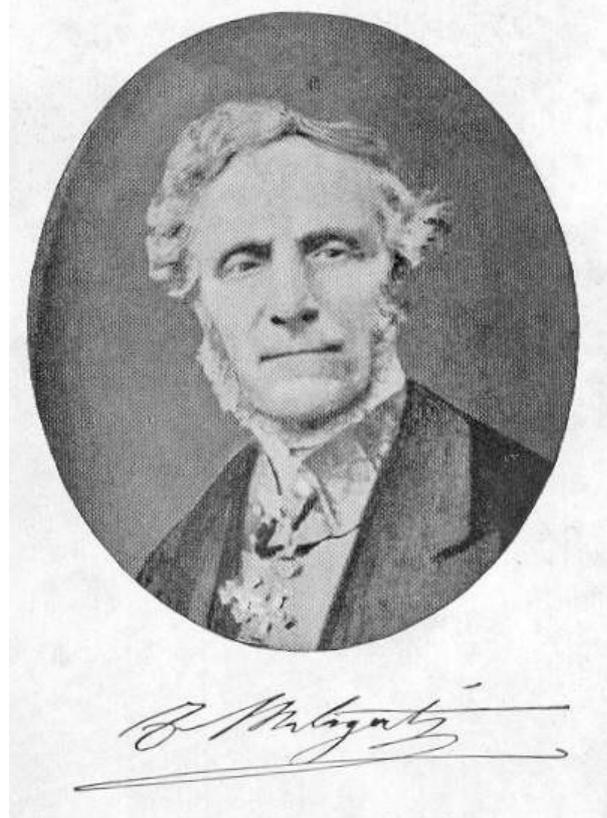


Figura 2

Di Malaguti (Fig. 2), professore di Chimica Agraria, gli Autori di una storia della Facoltà di Scienze dell'Università di Rennes hanno scritto recentemente: "La prima pubblicazione, nel 1848, delle lezioni di chimica agraria di Malaguti ottiene un successo spettacolare al punto che i giornali regionali si fanno premura di diffondere le sue idee" [15]. Ironia della sorte, l'esule italiano ormai scriveva i suoi libri in francese e in Italia si doveva ricorrere ai traduttori. La biografia di Malaguti, la sua opera scientifica e il contributo alla chimica agraria sono stati ampiamente trattati altrove [16]. Qui si ricorda che Faustino Malaguti nacque il 15 febbraio 1802 a Pragatto, piccola frazione del comune di Crespellano in provincia di Bologna, dove esiste tuttora la sua casa con lapide commemorativa (Fig. 3), da Giuseppe Valerio, farmacista e Anna Medici. La famiglia si trasferì a Bologna sette anni dopo. In città il padre gestiva una farmacia, e il figlio fu affidato ai Barnabiti. Frequentò l'Università e conseguì a sedici anni il diploma di farmacista. Con questo poté coadiuvare il padre nell'esercizio della professione. Intanto divenne assistente farmacista nella Clinica Medica dell'Università diretta da Tommasini. Dal Governo Pontificio ebbe l'incarico di Delegato di Sanità alla Dogana, con il compito di esaminare i medicinali e le droghe. Questo incarico governativo non gli chiuse gli occhi sulla realtà scientifica e politica dello Stato della Chiesa. Si ha notizia del suo primo arresto avvenuto il 12 ottobre 1827, con l'accusa di

sovversione. L'accusa si rivelò infondata e fu presto liberato. Si può pensare tuttavia che questo episodio contribuì ad accrescere il suo malcontento e così non c'è da stupirsi se lo si ritrova implicato nella rivoluzione che interessò Bologna e le città limitrofe nel febbraio del 1831. Quando fu firmata la resa, Malaguti s'imbarcò per la Francia su una piccola nave con altri profughi. Purtroppo il capitano li tradì e così furono fatti prigionieri da una corvetta austriaca comandata da Bandiera. Condotti a Venezia, i nostri restarono in carcere quattro mesi prima su una imbarcazione, poi nel carcere di S. Severo, prima di essere trasferiti a Civitavecchia, dove attesero le deliberazioni di papa Gregorio XVI. Alcuni furono liberati e altri (Malaguti, tra questi) definitivamente esiliati. Giunto a Parigi fu aiutato da altri fuoriusciti, si sposò, venne introdotto nella comunità dei chimici e riprese a studiare. Nel 1839 si laureò in Scienze alla Sorbona. Nel 1840 prese la naturalizzazione francese e due anni dopo vinse il concorso per la cattedra di chimica a Rennes. Di quella Università fu poi a lungo Rettore. Non tornò più in Italia. Dopo il 1859 furono svolte pratiche per richiamarlo su una cattedra universitaria italiana ma Malaguti non accettò. Morì a Rennes il 26 aprile 1878. Poco prima aveva espresso il desiderio di non essere pubblicamente commemorato.

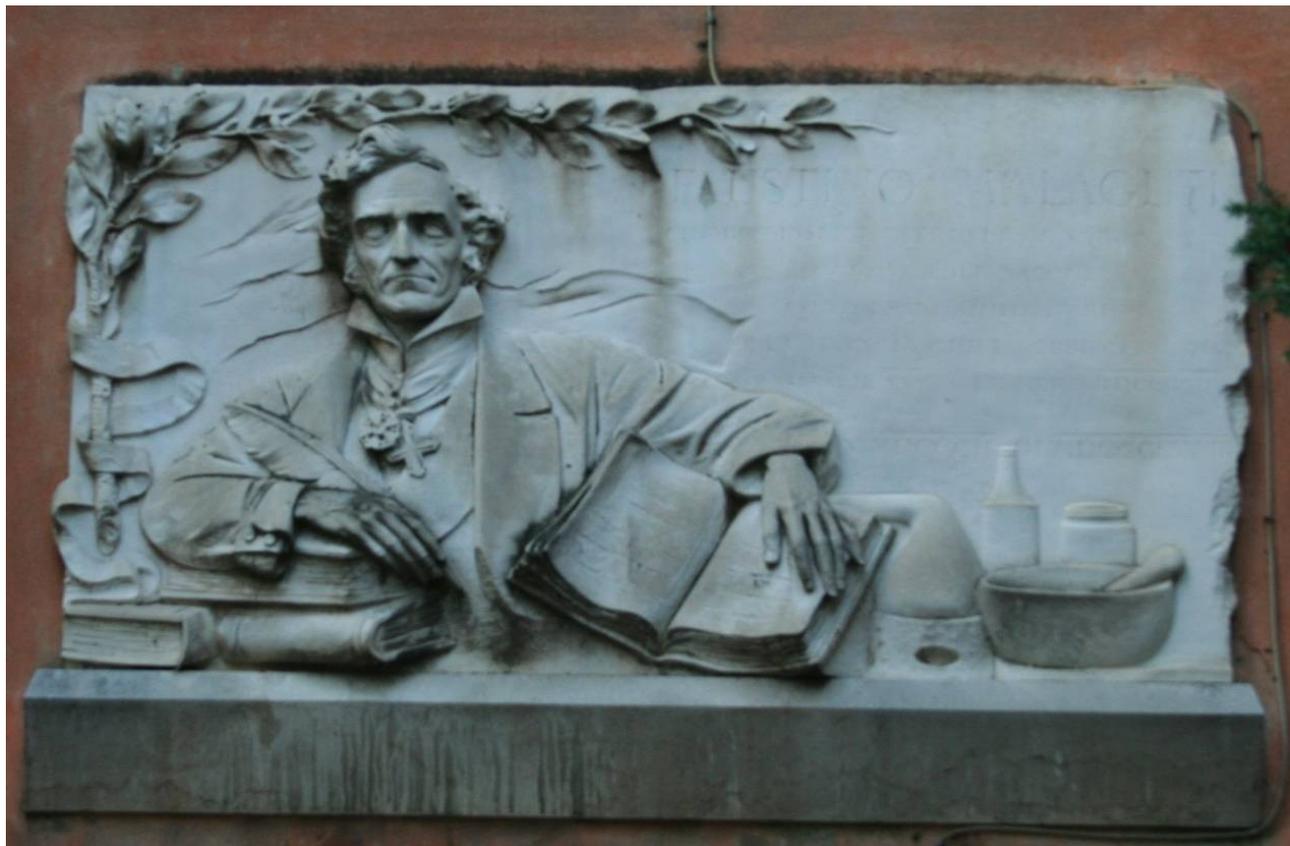


Figura 3

La formazione di Malaguti come chimico è strettamente legata alla Scuola Francese e così la sua carriera scientifica. All'arrivo in Francia, il primo chimico che aiutò Malaguti fu Pelouze. Malaguti non dimenticò l'aiuto ricevuto e nel 1863 gli dedicò le sue *Lezioni elementari di chimica*. Tramite Pelouze, fu ammesso nel laboratorio di Gay-Lussac e, intanto, frequentò l'*École Polytechnique*. Si fece apprezzare anche da Brongniart, direttore della Manifattura Nazionale delle porcellane di Sèvres e strinse amicizia con Thénard, Dumas e Biot, ossia alcuni fra i più celebri chimici del tempo. Terminato il corso all'*Ecole*, lasciò il laboratorio di Gay-Lussac per assumere la prestigiosa funzione di chimico addetto alla Manifattura di Sèvres. Alternava al lavoro e alle ricerche a Sèvres gli studi, cosicché poté laurearsi. Intanto le sue pubblicazioni scientifiche lo imponevano all'attenzione dei chimici francesi. Fu spinto a partecipare al concorso per la cattedra di chimica nella Facoltà di Scienze dell'Università di Rennes e la vinse nel 1842. La Facoltà era stata istituita nel settembre 1840 e incaricato della realizzazione era stato il chimico Thénard, vice presidente del Consiglio Reale per la Pubblica Istruzione. L'inaugurazione avvenne il 10 novembre 1840. I corsi cominciarono l'anno dopo. Malaguti venne subito inserito nel corpo docente.

Malaguti è autore di 66 note scientifiche, pubblicate in francese su importanti riviste quali, ad esempio, gli *Annales de Chimie et de Physique* e i *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*. La prima (1833) ha per titolo: "Note sur un procédé très-économique pour la préparation du Protoxide de Cuivre; l'ultima (1866) "Note sur un composé naturel d'oxyde de zinc, d'oxyde d'ammonium et d'eau". Alcuni lavori erano frutto di collaborazione. Baudrimont, Sarzeau, Durocher, Dumas e Leblanc figurano come coautori. I lavori di Malaguti spaziano un po' in tutti i campi della chimica di base (generale, inorganica, organica, fisica), si estendono alla chimica mineralogica, geologica e tossicologica, incluse varie applicazioni. Di notevole valore, per la chimica agraria, fu quello di tipo analitico, pubblicato con Durocher nel 1858, sulla distribuzione degli elementi nelle piante, con il titolo *Recherches sur la répartition des éléments inorganiques dans les principales familles du règne végétal* [17]. A partire dal lavoro svolto in precedenza da Théodore de Saussure, Boussingault, Daubeny e considerando, ad esempio, che in certi gruppi come Graminacee ed Equisetaceae si trovava più silice, i due A. si chiedevano se fra le diverse famiglie c'erano relazioni particolari, come nella struttura degli organi. Per tal motivo si erano proposti, operando con metodo e seguendo condizioni ben determinate, di scoprire alcuni dei rapporti naturali fra i principali gruppi del regno vegetale. Ancora più importanti, non per l'agricoltura ma per la chimica in generale, sono i due lavori dedicati all'azione reciproca dei sali solubili e insolubili e al problema delle affinità. Tali lavori, sulla scia di quelli di Berthollet, contribuirono a introdurre il concetto di equilibrio chimico. Un cenno particolare merita il rapporto fra Malaguti e i chimici Laurent e Gerhardt. Le teorie innovative di Laurent e Gerhardt erano osteggiate dalla maggioranza dei chimici e per questo i due si trovavano isolati.

Malaguti, benché non avesse l'indole del riformatore, non fece mancar loro la sua solidarietà pur rimanendo essenzialmente un chimico pratico, attento all'applicazione delle conoscenze più che all'interpretazione teorica dei fenomeni. Ciononostante condusse alcune ricerche di carattere pionieristico, come quelle sull'azione chimica della luce, ricordate anche da Ostwald. Malaguti fu il primo a insegnare chimica agraria in una Università francese di provincia. Il grande Dumas disse che di lui che era uno dei migliori professori d'Università. Frutto del suo impegno sono alcuni manuali didattici: *Leçons de Chimie Agricole* (1848), *Leçons élémentaires de Chimie* (1853), *Chimie appliquée à l'Agriculture* (1862) (Fig. 4), *Petit cours de Chimie Agricole* (1863). Le sue lezioni di chimica agraria e i manuali che scrisse s'imposero ben oltre i confini della Bretagna e della stessa Francia. Con la sua abilità di divulgatore, Malaguti,

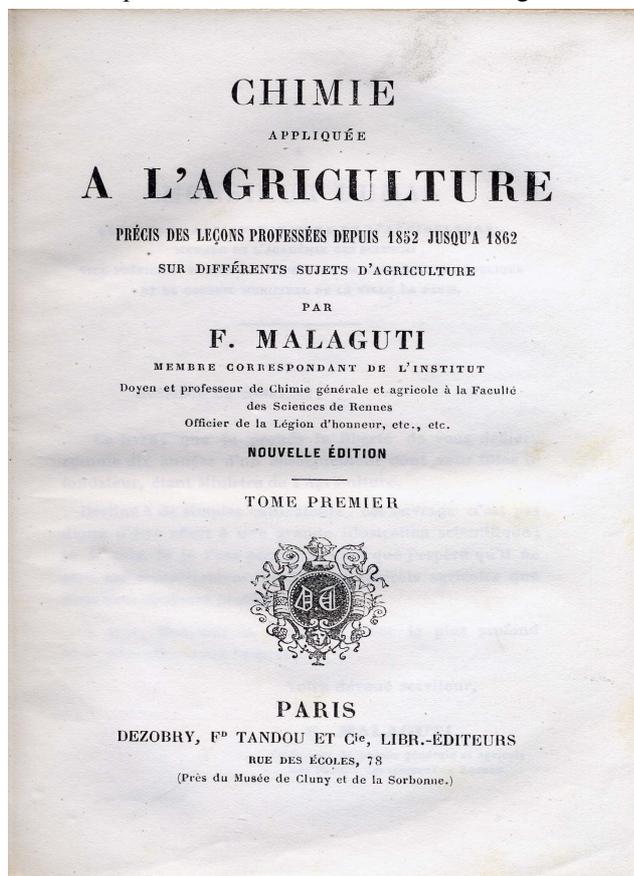


Figura 4

s'impegnò per diffondere i rudimenti della cultura chimica pratica. L'applicazione della chimica all'agricoltura per migliorarne i risultati, oltre alla diffusione di norme igieniche tra i contadini per difenderli dalle malattie (come la malaria) era per lui un assillo. Nella prima delle sue *Nuove Lezioni di Chimica Agraria* (Piacenza, 1857) [6], parlando di concimi, foraggi e valutazione dei raccolti da terreni diversi si domandava sconcolato: *Che cosa può fare, a fronte di elementi così variabili, chi ignora i dati della chimica?* Perciò, nelle sue *Lezioni*, Malaguti si sforzava di parlare a questo tipo di pubblico in modo semplice e istruiva sui concimi, coltura del frumento, preparazione della semente, malattie del grano, raccolta e processi di conservazione. Proseguiva con l'orzo, l'avena, la segale, il grano saraceno per passare infine all'allevamento del bestiame, ai latticini, ai foraggi, all'irrigazione, ecc... Più che di Chimica Agraria modernamente intesa, le sue lezioni erano un misto di agronomia, zootecnia e industrie agrarie, intervallate da numerose tabelle con dati di composizione chimica. Doveva esserci il bisogno di questo tipo d'insegnamento anche in Italia visto che, come ricorda l'Editore, riferendosi alle precedenti edizioni, "lo spaccio fu stragrande" e si compiaceva del "favore che anche qui in Italia trovò il libro presso ogni Agronomo assennato". L'elenco dei libri di Malaguti comprende anche le *Notions préliminaires de chimie* (Parigi 1866), cui seguiranno la *Chimie Organique* e le *Notions de Chimie, les sels et les métaux* per la scuola secondaria, oltre un *Petit cours* per la primaria. Coautore delle opere fu il famoso entomologo H.J. Fabre.

Alcuni libri di Malaguti, scritti in francese, furono tradotti in italiano da Antonio Selmi. A parte le citate *Nuove Lezioni*, si ricordano le *Lezioni di chimica applicata all'agricoltura*, date tra il 1852 e il 1862, pubblicate dall'Unione Tipografico-Editrice di Torino, in tre volumi, nel 1865. Secondo Dumas, i libri di Malaguti "ottennevano dovunque il successo più serio, per la loro chiarezza e precisione e per la solidità delle dottrine". L'Italia non faceva eccezione. Il Cav. Antonio Selmi (fratello di Francesco), fu il traduttore di Malaguti. Selmi insegnò, tra l'altro, oltre l'agronomia, la chimica agronomica e applicata all'industria rurale presso l'Istituto Tecnico Provinciale di Mantova. Si può ricordare che tra il 1863 e il 1876 pubblicò, oltre le sue lezioni, numerose monografie di carattere divulgativo su argomenti di carattere pratico, non disdegnando un approccio quasi popolare nel citato *Almanacco di Chimica Agricola* [9] e l'aggiornamento dei maestri nelle *Conferenze Scientifico-Popolari* (1874) per cura del Comizio Agrario e della Deputazione Provinciale.

Liebig

Quasi coetaneo di Malaguti, essendo nato a Darmstadt nel maggio 1803, Justus von Liebig viene considerato il fondatore della moderna chimica agraria e il padre dell'industria dei fertilizzanti chimici. Si laureò ad Erlangen poi si trasferì in Francia, dove fu ammesso nel laboratorio di Gay-Lussac ed ivi continuò le sue ricerche. Tornato in Germania, divenne professore di chimica all'Università di Giessen, dove fondò una scuola in cui era coltivata soprattutto la chimica organica e che guadagnò tanto prestigio al punto che vi affluirono allievi da tutta l'Europa.

Fu un autore assai prolifico. Fondò gli *Annalen der Chemie*, che in seguito porteranno il suo nome e nel 1840 pubblicò *Die Organische Chemie in ihre Anwendung auf Agricultur und Physiologie*, un'opera che fu molto apprezzata e che rivelò il suo interesse per la chimica agraria. Le sue famose *Lettere sulla Chimica* furono tradotte in varie lingue, italia-

no compreso, ed ebbero un ruolo di prim'ordine nella divulgazione della disciplina, facendone apprezzare l'utilità e i benefici anche presso le classi meno colte. Liebig lasciò Giessen nel 1852 per diventare professore di chimica a Monaco e presiedere l'Accademia delle Scienze. Morì a Monaco nell'aprile del 1874.

Il suo contributo alla chimica agraria si sviluppò in tre direzioni. Innanzitutto, fu lui a negare che la fonte principale di carbonio per le piante fosse l'*humus*, ossia il prodotto della degradazione delle sostanze organiche. La sua interpretazione era basata sui calcoli e sulla valutazione di ricerche altrui relative all'assorbimento del diossido di carbonio e al rilascio di ossigeno da parte delle piante. La seconda direzione riguardava il ruolo dell'azoto nella nutrizione delle piante. Furono studi importanti che però, in parte, giunsero a conclusioni sbagliate in quanto Liebig pensava che le piante assimilassero direttamente l'azoto atmosferico o le tracce di ammoniaca disciolte nell'acqua piovana. La terza direzione delle sue ricerche e, forse, quella in cui ottenne i risultati di maggior valore fu quella sul ruolo dei composti inorganici. Basandosi sui risultati d'analisi delle ceneri vegetali egli insisteva sul fatto che i composti inorganici avessero un ruolo essenziale e aveva ragione [18].

Johnston

James Finlay Weir Johnston (Paisley, 1798 – Durham, 1855), da distinguere da H.L. Johnston, fu allievo del grande Berzelius. Nel 1833 diventò professore di chimica e mineralogia all'Università di Durham e undici anni dopo, fino al 1849, fu conferenziere e chimico dell'Associazione di Chimica Agraria Scozzese. È ricordato come scopritore di un isomero del cianogeno, il paracianogeno, di cui diede notizia sul periodico scientifico di Edinburgo (1829) ed è noto anche come autore di una interessante ricerca sulle resine naturali (1839-1840). A lui si debbono numerose preparazioni inorganiche e le prime osservazioni dell'isomorfismo. Per la chimica agraria sono importanti alcuni suoi libri, alcuni dei quali più volte riediti: *Elements of Agricultural Chemistry and Geology* (1842), *The Chemistry of Common Life* (1855) e *Catechism of Agricultural Chemistry and Geology* (1844). Quest'ultima opera, a spiccato carattere divulgativo, fu tradotta in varie lingue, italiano compreso, da Giovenale Vegezzi-Ruscalla e pubblicata a Torino nel 1847 [19]. Come ricorda l'Editore nella sua presentazione, quella nella lingua originale aveva avuto 14 edizioni in 18 mesi e venduto più di 70.000 copie. Il *Catechismo di Geologia e Chimica Agraria* consiste di domande brevi, seguite dalle relative risposte, in forma diretta e concisa. Il *Catechismo* era destinato, come scriveva Johnston, ai "maestri di scuola delle province" che dovevano far "ben comprendere le dottrine alla classe di scolari più innanzi nello studio". Vengono indicate anche alcune semplici dimostrazioni pratiche e, a questo proposito, lo zelante traduttore italiano aggiunge l'indirizzo al quale ci si poteva procurare gli apparati per realizzarli. Benché queste dimostrazioni includessero qualche esperimento chimico (es. inerzia dell'azoto, combustione del fosforo ecc...) l'A. ricorda al maestro che *egli insegna l'agricoltura non la chimica e che deve a questo subordinare ogni insegnamento di mera chimica*. Anche gli *Elements* furono tradotti da Vegezzi-Ruscalla sulla quarta edizione inglese, con lo scopo di approfondire ed ampliare i contenuti del *Catechismo*. Giovenale Vegezzi-Ruscalla (1799-1855) fu il primo segretario dell'Associazione Agraria di Torino (*Associazione Agraria Subalpina*) fondata il 31 maggio 1842. Era suocero di Costantino Nigra e intimo amico di Cavour. A proposito di quest'ultimo, vale la pena ricordare, a testimonianza del suo impegno a favore dell'agricoltura e della modernizzazione del Piemonte, che fu proprio lui a presentare l'opera di Johnston, appena pubblicata in Gran Bretagna, all'Associazione Agraria Subalpina, con l'intento di promuoverne la traduzione. È noto infatti che Cavour riteneva Johnston il più illustre chimico agrario europeo. L'auspicio di Cavour non fu deluso e per la traduzione del libro in italiano fu offerto dal Conte Avogadro di Casanova un premio in denaro e così l'impresa andò a buon fine.

Per concludere su Cavour, è noto che conosceva bene non solo i libri di Johnston ma anche quelli del citato Boussingault, di Henry Stephens (*La Ferme*, 1844, 4 voll.) e di Liebig [20].

Per quanto riguarda la chimica agraria negli Stati Uniti d'America, il primo contributo scientifico di un certo rilievo è ritenuto quello di Benjamin Silliman, professore di chimica presso lo Yale College dal 1802 al 1853, relativo alla canna da zucchero [21]. Per i successivi sviluppi, esiste un eccellente resoconto di Charles A. Browne, del Dipartimento dell'Agricoltura U.S.A., al quale si rimanda [22]. Naturalmente, l'influenza di Liebig si fece sentire anche Oltreoceano. Le sue idee furono diffuse negli USA da Eben N. Horsford che nel 1846 pubblicò "*Chemical Essays Relating to Agriculture*". La costituzione dell'*Association of Official Agricultural Chemists* nel 1880 rafforzò considerevolmente la chimica agraria in USA.

In Italia

In epoca rinascimentale, fra coloro che riprendendo le idee dello scrittore latino Lucio Giunio Columella (Gades, 4 – 70) pensavano di restituire al terreno coltivato le sostanze che le piante assimilavano con la crescita, troviamo un nome italiano che diverrà famoso. Si tratta di Agostino Gallo (Brescia, 1499 – 1570), autore de "*Le dieci giornate della vera agricoltura e piaceri della villa*" (1564), considerato il primo agronomo dell'Europa moderna. Egli raccomandava l'uso di letami e ceneri a seconda del tipo di terreno, oltre a correttivi come la calce. In altri trattati dell'epoca veniva consigliata la fuliggine, lo sterco di pipistrello, il salnitro dei muri, rifiuti sia liquidi che solidi di varie lavorazioni, ceneri di alghe e ossa macinate e calcinate [23].

Fra la seconda metà dell'Ottocento e l'inizio del Novecento, la chimica agraria del nostro Paese annoverò tra i cultori

più illustri Fausto Sestini (Campi Bisenzio, 1839 – Lucca 1904) e il citato Italo Giglioli (Genova, 1852 – Pisa, 1920). Il secondo tenne la commemorazione del primo presso la Società Chimica di Roma e da quel discorso [24] emerge, tra l'altro, il ruolo della Toscana come centro culturale in grado di “rivaleggiare con qualsiasi parte d'Europa nei molteplici studi sulle applicazioni della Chimica all'agricoltura ed alle industrie che coll'agricoltura sono connesse”. A riprova di ciò, Giglioli ricordava i nomi di Fabbroni, Carradori, Gazzeri, Casanti, Taddei, Bechi e Sestini. Nato ed educato in Toscana, Sestini vi trascorse quasi tutta la vita attiva, tranne alcuni periodi in cui fu a Forlì, Udine e Roma. A Forlì insegnò all'Istituto Tecnico per nove anni a partire dal 1862, poi passò a Udine, dove fu anche Preside, infine a Roma. A Udine diresse anche la Stazione Agraria che, con quella di Modena, fu la prima a sorgere il 30 giugno 1870. Quando si trasferì a Roma, sempre come insegnante d'Istituto Tecnico, fondò e diresse la locale Stazione Agraria e diventò ispettore ministeriale per l'istruzione tecnica. Nel 1876 tornò in Toscana perché vinse la Cattedra di Chimica Agraria all'Università di Pisa, mantenendola fino al termine dei suoi giorni. Fu autore di numerose memorie scientifiche e di manuali per l'insegnamento della Chimica Agraria e dell'Analisi Chimica Agraria. All'inizio s'interessò di Fisiologia Vegetale e, in particolare, di assorbimento delle sostanze minerali. Tra l'altro, trovò il berillio nelle ceneri di alcune piante. Fece esperimenti sulle fermentazioni e ricerche di chimica enologica. Si occupò dello studio e dell'analisi del terreno agrario e delle condizioni che influiscono sulla fertilità. Fece ricerche chimiche su speciali colture agrarie (ulivo, canapa, paglia per cappelli, foraggi, barbabietole da zucchero, gelso ecc...). Studiò la composizione di alcuni concimi organici e minerali usati in Italia (concio ferrarese e strame di valle). La sua attività e quello degli Allievi è documentato nei fascicoli del periodico *Ricerche e Studi compiuti nel Laboratorio di Chimica Agraria dell'Università di Pisa*. Quando Menozzi lo commemorò a Milano [25], sede della *Società Chimica* cui Sestini aveva aderito, fece notare che i suoi lavori erano stati piuttosto discussi e forse non apprezzati in quanto si trattava più che altro di raccolte di dati analitici. Menozzi però faceva notare che erano dati quanto mai necessari per dare fondamento scientifico all'agricoltura.

A proposito del sopracitato periodico che informava sulle ricerche compiute nel Laboratorio di Chimica Agraria dell'Università di Pisa, va ricordato che quello pisano, pur importante, non era l'unica istituzione del genere in Italia e che anche altre pubblicavano periodicamente un resoconto della loro attività. A Bologna, ad esempio, il Laboratorio Chimico Agrario pubblicava fin dal 1871 i *Ragguagli sui Lavori Eseguiti* [26]. Le pubblicazioni cessarono nel 1902, mentre l'attività di analisi si protrasse ancora per circa ottant'anni. Per valutare l'incidenza dei Laboratori sullo sviluppo agricolo del secolo XIX si possono sfogliare le pagine di alcuni *Ragguagli*. Nel fascicolo del 1877, ad esempio, si trovano analisi complete o parziali di sanse di semi oleosi (15), concimi minerali (5) e guani (3). Accanto a queste, compaiono 18 analisi di acque, 4 di ciste etrusche, 6 di zolfi, 4 di vini. Completano l'elenco: 4 gradi acidimetrici di aceti, 1 grado clorometrico di cloruro di calce, l'analisi meccanica di 6 terreni e 5 esami microscopici di semi serici. Il Laboratorio non trascurava la lotta alle frodi alimentari e la ricerca collegata. Come ricordano il Direttore Adolfo Casali e l'Agronomo Marconi nella presentazione del citato fascicolo, aveva ottenuto in Francia l'ambita citazione di Wurtz a proposito di due metodi messo a punto per scoprire rispettivamente la presenza di fucsina ed ematossilina nei vini. Questi composti venivano aggiunti per colorarli artificialmente e i metodi furono pubblicati nei *Ragguagli* del 1873. Per inciso, Adolfo Casali alternava questa attività con un'intensa attività pubblicistica che includeva manuali per gli Istituti Tecnici e trovò il tempo di compilare un utile Dizionario di Chimica Antica.

Venendo invece a Giglioli, si ricorda che fu professore di Chimica Agraria nella R. Scuola Superiore d'Agricoltura di Napoli (Portici) nel 1876, poi a Pisa e anche Direttore della Stazione Sperimentale Agraria di Roma. Giglioli si occupò di coltura del frumento, del riso, della frutta, del castagno e degli alberi della canfora. Si interessò dell'azione dell'ossigeno sullo sviluppo delle radici e di quella di alcuni sali minerali sullo sviluppo dei vegetali. Tra il 1884 e il 1902 scrisse un imponente trattato di Chimica Agraria campestre e silvana (quasi 900 pagine) [5]. Esso affronta i seguenti argomenti: composizione elementare delle piante; l'acqua nelle piante; il “dosamento” dell'acqua; l'acqua nei semi; l'entrata dell'acqua nelle piante; l'innalzamento e distribuzione dell'acqua nelle piante; il calore e la pianta; la luce e la pianta. Non mancano numerosi riferimenti storici.

Viste le figure di maggior spicco in ambito accademico, va ricordato che in Italia, come altrove, si parlava di chimica agraria anche fuori dell'Università. Un fenomeno interessante fu quello delle cosiddette “Cattedre Ambulanti di Agricoltura” [27]. Fra il 1842 e il 1844 il ferrarese Gaetano Recchi si adoperò per la creazione di una Cattedra Agraria non in sede universitaria ma *nei campi e per i campi*. L'insegnamento doveva svolgersi in un podere modello, non nel chiuso delle aule. Furono avviate in proposito varie iniziative, in luoghi diversi, ma non ebbero una gran fortuna. Invece, nel 1886, la Scuola ambulante che esisteva a Rovigo fu trasformata in Cattedra e affidata dapprima a Piergentino Doni e poi a Tito Poggi, con un preciso regolamento operativo. Doveva favorire la diffusione delle migliori piante e sementi, dei concimi chimici più efficaci e delle migliori razze di bestiame. Doveva indicare i mezzi per combattere i nemici dell'agricoltura e diffondere le migliori macchine agricole e le migliori pubblicazioni. L'idea ebbe seguito. Alla fine del secolo XIX, queste cattedre erano una trentina e ad esse si affiancarono i Consorzi e Comizi Agrari che operavano in stretta collaborazione. Dirigente della Cattedra Ambulante di Ferrara fu il Prof. Adriano Aducco, scrittore prolifico e autore di una *Chimica Agraria* [28] che fu pubblicata nella celebre collana dei manuali

Hoepli. Aducco fu un pioniere dell'industria saccarifera italiana e, per sua iniziativa, sorse lo Zuccherificio Agricolo Ferrarese.

La *Chimica Agraria* di Aducco espande gli spazi della chimica vera e propria. E' strutturata in cinque capitoli, più un'appendice. Dopo alcuni cenni di fisiologia vegetale ed animale, s'incontra un lungo capitolo dedicato alle principali sostanze che s'incontrano nei vegetali e negli animali, poi quello sul terreno agrario, quello sulla fertilizzazione (quasi 280 pagine) e, infine, quello dedicato all'acqua nell'irrigazione.

Un salto culturale nella conoscenza della chimica delle piante si verificò nei primi decenni del '900. Giacomo Ciamician e Ciro Ravenna furono fra protagonisti più importanti di questo progresso. Ravenna, meno noto di Ciamician, era stato suo allievo a Bologna. Di Ciamician (Trieste, 1857- Bologna, 1922) si è celebrato recentemente il 150° della nascita con un convegno storico-scientifico che ne ha messo in luce i molteplici interessi culturali e di ricerca. Ciamician si occupò inizialmente di spettroscopia, poi del pirrolo e suoi composti, di chimica delle sostanze naturali, di chimica delle piante e, infine, dell'azione sulla luce sulle reazioni chimiche. Per quanto riguarda la chimica delle piante, si rimanda agli Atti del citato convegno contenente una pregevole relazione sull'argomento [29]. Si ricorda che oltre alle numerose note scientifiche, anche per questo argomento Ciamician lasciò una breve monografia a carattere divulgativo [30], derivata da una conferenza tenuta a Parma nel 1907 in occasione di una riunione della SIPS (Società Italiana per il Progresso delle Scienze). Il lavoro è diviso in quattro parti: la prima tratta delle relazioni che esistono fra la chimica organica di laboratorio e quella che si compie con mezzi naturali nelle piante; la seconda delle differenze fra le due, specialmente per i quanto riguarda i mezzi di sintesi; la terza illustra l'interpretazione del comportamento chimico delle sostanze presenti nelle piante e la quarta, infine, affronta il tema della cosiddetta "energia vitale". Ma il punto centrale e più interessante della riflessione di Ciamician è la constatazione che le piante, a differenza del chimico che ha poco tempo e tante aspirazioni, "tranquillamente, serenamente al sole, un vero idillio chimico, fanno la chimica organica". Il suo sforzo è di comprenderne il funzionamento e come si formino i principali costituenti delle piante stesse (idrati di carbonio, grassi e proteine) e le sostanze cosiddette "accessorie" (glucosidi, terpeni, alcaloidi, canfore, tannini, resine ecc.), puntando l'attenzione in primo luogo sull'assimilazione delle piante verdi e i reagenti "naturali": luce, clorofilla ed enzimi.

La maggior parte delle ricerche di Ciamician sulle piante furono condotte in collaborazione con Ciro Ravenna (Ferrara, 1878 – Auschwitz, 1944), il quale continuò ad occuparsene per tutta la vita, anche dopo la scomparsa del maestro. Il rapporto fra i due durò per una decina d'anni e terminò un anno prima della morte di Ciamician, quando Ravenna andò a Portici per poi trasferirsi definitivamente alla Scuola Superiore di Agraria di Pisa. Nel 1923 fu chiamato alla Cattedra di Chimica Agraria. Dall'anno seguente e fino al 1935, diresse la suddetta Scuola e, quando essa fu trasformata in Facoltà, ne divenne Preside. Fu allontanato dall'insegnamento nel 1938 a seguito delle leggi razziali. Arrestato nel novembre 1943, fu deportato a Fossoli nel febbraio 1944 e pochi giorni dopo venne trasferito ad Auschwitz dove venne assassinato dai nazisti.

I contributi scientifici di Ravenna sul "contegno delle sostanze organiche nelle piante", firmati insieme a Ciamician, si riferiscono per la maggior parte a una serie di studi sistematici ed esperimenti condotti somministrando svariati tipi di sostanze a semi di fagioli, mais, tabacco ecc.... Veniva osservata la germinazione e lo sviluppo, confrontandoli con quelli di semi non trattati, e poi venivano analizzate le piante per verificare se le sostanze somministrate ai semi erano state trattenute o modificate. In pratica, secondo l'idea di Ciamician, si voleva esplorare la possibilità di utilizzare le piante come fabbriche di strutture molecolari. Anche di recente, alcuni risultati di Ciamician e Ravenna sono stati valutati interessanti. Si ricorda, fra gli altri, la conversione della saligenina, inoculata in piante di mais alimentate con glucosio, nel glucoside salicina.

Ravenna fu autore anche di apprezzati testi didattici. Va ricordata specialmente la *Chimica Vegetale* (1925), forse l'opera più impegnativa (quasi 700 pagine) [31], che si affianca alla *Chimica Agraria* (1936), al *Manuale di Analisi Chimica Agraria e Bromatologica* (1915) e alla *Chimica Pedologica: il terreno agrario ed i fertilizzanti* (1935). La *Chimica Vegetale* dedica, nella prima parte, più di duecento pagine alle nozioni fondamentali di chimica organica, per affrontare (nella seconda) la funzione clorofilliana, la produzione di sostanze organiche azotate, la respirazione, la germinazione e la maturazione. Nella terza, che occupa poco meno della metà dell'opera, si parla a fondo di sostanze organiche dei vegetali, cominciando dagli zuccheri per finire con gli enzimi. E' un'opera ampia, approfondita e curata nei dettagli che non trascura richiami importanti alle altre branche della chimica e alla fisica, spettroscopia inclusa.

I fertilizzanti

Nel IV capitolo della *Chimica Agraria* di Aducco [28] viene ampiamente sviluppato il tema della fertilizzazione del terreno e l'evoluzione della concimazione. Un tempo si utilizzavano come concimi alcuni prodotti del podere stesso (stallatico, altri escrementi di animali e materie vegetali) o di poderi vicini. Si passò poi ai concimi prodotti nelle città (stallatico cavallino, escrementi umani e derivati, spazzatura, polvere d'ossa e derivati, carni di scarto, cascami industriali, ceneri ecc...). A questi si affiancarono in seguito i concimi complementari azotati-fosfatici di origine naturale. Tra questi: guano, guano di pipistrelli e rondini, guano di pesce e residui dell'estratto di carne. Tra gli azotati si ricorda il nitrato sodico, il nitrato di calcio, il solfato ammonico e la calciocianamide. A proposito della calciocianamide,

si ricorda che il processo di sintesi risale al 1895 e fu opera di Frank, Caro e Rothe, i quali volevano preparare un altro composto, il cianuro di calcio. La sintesi della calciocianamide da carburo di calcio e azoto, in forno elettrico ad alta temperatura, fu d'importanza storica. Quando Aducco scriveva, l'Italia ne produceva già circa 10.000 tonnellate l'anno (produzione mondiale 80-85.000), specialmente a Piano d'Orte e Terni. A proposito del solfato ammonico, invece, si ricorda che derivava dalla neutralizzazione delle acque ammoniacali, un sottoprodotto della distillazione del carbon fossile per la produzione del gas illuminante. Per quanto riguarda i concimi complementari fosfatici si utilizzavano: le ceneri d'ossa, il guano fosfatato e disgregato, i fosfati minerali, alcune scorie. La storia dei fertilizzanti minerali di origine naturale è sinteticamente, ma efficacemente, riportata anche da Giua [32]. A partire dagli esperimenti di Liebig, l'A. descrive i concimi potassici, azotati e fosfatici, ne indica le fonti e i procedimenti di purificazione. In prima linea, come concime potassico, c'era il cloruro. Il più importante giacimento europeo era a Stassfurt, in Germania. Fonti di fosforo erano le fosforiti e le apatiti provenienti da Tunisia, Algeria, Florida, Carolina del Sud. Per facilitare l'assimilazione del fosforo occorreva trasformare questi minerali in perfosfati e qui inizia un'altra storia legata allo sviluppo della chimica industriale, che vide fra i primi protagonisti l'inglese Lawes.

John Bennet Lawes (1814-1900) (Fig. 5), era un piccolo proprietario terriero che era stato educato a Oxford ed era stato allievo di Daubeny. Ancor prima di lasciare Oxford nel 1832 si era cimentato nella coltivazione delle piante medicinali. Successivamente condusse una serie di esperimenti intorno all'influenza di varie sostanze sulla crescita delle piante che lo portarono al brevetto del 1842 per la produzione del superfosfato. Cominciò a produrlo nel 1843, cessò circa trent'anni più tardi, ma continuò ad interessarsi di chimica tecnica. Nel 1870 le sue fabbriche sfornavano circa 40.000 tonnellate di prodotto. A dire il vero, Lawes aveva sfruttato l'esperienza dell'irlandese James Murray (1788-1871) che fin dal 1817 aveva iniziato gli esperimenti per produrre il superfosfato. Anch'egli ottenne il brevetto nel 1842, per un procedimento che prevedeva il trattamento di minerali fosfatici con acido solforico. Purtroppo per lui, non ebbe la stessa fortuna commerciale di Lawes [20]. L'industria dei fertilizzanti azotati richiederebbe, in ragione della sua importanza, un'approfondita discussione a parte. Il suo tumultuoso decollo, a partire dalla sintesi industriale dell'ammoniaca, ebbe conseguenze enormi per l'agricoltura. Di ciò si è parlato all'inizio di questo lavoro perciò si rimanda il lettore ai lavori già citati.

I fitofarmaci

La lotta agli organismi viventi che danneggiano le piante e le colture agricole è di lunga data e vede tuttora la chimica in prima linea. Anticrittogamici, insetticidi ed erbicidi di sintesi sono il frutto della ricerca e dell'industria chimica. Per un'introduzione all'argomento e alle problematiche collegate si veda [16]. Va detto

che oggi si preferisce parlare di fitosanitari o fitofarmaci, termine generale che indica i prodotti naturali e di sintesi che vengono utilizzati per combattere le malattie infettive, le fisiopatie, i parassiti e fitofagi animali e le piante infestanti. Dopo le prime conquiste in questo campo, la chimica si è orientata verso la ricerca di farmaci specifici, dotati di elevata tossicità per i batteri ma innocui per l'uomo. Va ricordato tuttavia che, proprio a causa dell'abuso e dell'uso improprio dei fitofarmaci, la chimica si è trovata spesso al centro di polemiche e contestazioni che hanno fortemente contribuito a deformarne l'immagine. Oggi il settore è severamente regolato da norme nazionali e comunitarie che dovrebbero prevenire i danni del passato. La storia dei fitofarmaci è lunga, complessa, ma davvero interessante. Qui si vuole ricordare, a titolo di esempio, la lotta alle spore delle crittogame che sono causa del "carbone" nei semi dei cereali. I metodi chimici per la concia dei semi erano quattro: quello della calce, della calce con cloruro o solfato sodico, del solfato di rame e dell'acido solforico diluito. In Italia, le prime prove per *soffatare* le sementi con vetriolo azzurro furono fatte in Toscana nel 1835, mentre il metodo più antico per combattere chimicamente il "carbone" era la calcinatura, che risaliva addirittura a Malpighi e Ginanni. Interessante anche la lotta chimica alla peronospora delle piante, causata da funghi parassiti che sottraggono risorse trofiche alla pianta ospite, con esito spesso letale. La peronospora della vite (manna nera) fu segnalata per la prima volta nel Nord America nel 1834. Più tardi giunse in Europa e sul finire dell'800 dimezzò la produzione vinicola. Dall'uso del verderame si è passati ad altri composti di rame, usati da soli o in miscela con altri prodotti. Come esempi, si possono citare l'ossicloruro di rame o l'idrossido,



Figura 5

ottenuti con processi innovativi che li rendono disponibili sotto forma di micro-particelle in grado di coprire meglio le superfici trattate.

Le industrie agrarie

Trattare qui, seppure per sommi capi, l'evoluzione delle industrie di trasformazione dei prodotti agricoli in rapporto allo sviluppo delle conoscenze chimiche, richiederebbe uno spazio eccessivo.

L'industria saccarifera, quella enologica, la lattiero-casearia, l'elaiotecnica e quella conserviera sono debitrice alla chimica di diversi, significativi, progressi. Si rimanda perciò ad opere già citate [10, 16, 32] per i necessari approfondimenti. Potrebbe essere interessante, per i chimici industriali, esaminare i collegamenti delle industrie agrarie con l'industria chimica e soffermarsi sui sistemi integrati che vennero sviluppati da alcuni imprenditori-scienziati nei primi decenni del secolo XIX. Con particolare riferimento all'industria dello zucchero di barbabietola, si rimanda a un precedente lavoro sul francese Anselme Payen [33].

L'attualità

Per sapere di che cosa si occupa oggi la chimica agraria e come si è trasformata rispetto al passato, è utile scorrere il programma di un tipico corso d'insegnamento impartito in una Facoltà di Agraria di notevole rinomanza [34]. Si vedrà che oltre alle basi chimiche del sistema suolo-pianta, contiene la spiegazione a livello molecolare dei meccanismi che regolano l'attività delle superfici del suolo e la funzionalità degli agroecosistemi e dei processi che sostengono le conversioni energetiche nei sistemi biologici. In altri termini, una descrizione assai più completa, anche rispetto ad alcuni decenni fa, dell'organizzazione e funzionalità della pianta. Il suolo è visto come sistema polifasico. I costituenti inorganici, organici e i composti umici vengono studiati diffusamente dal punto di vista chimico. Le proprietà e funzioni agronomiche della sostanza organica si affiancano allo scambio cationico e all'adsorbimento anionico. Si affrontano bene le questioni legate al pH. Parte del programma riguarda anche i costituenti organici ed inorganici degli esseri viventi, nonché la struttura delle cellule viventi. Non vengono trascurati gli aspetti energetici delle reazioni chimiche e biochimiche. Si parla ampiamente degli enzimi, nonché degli inibitori e attivatori delle reazioni enzimatiche. Argomenti importanti come: fotosintesi clorofilliana, fotorespirazione, respirazione e glicolisi, ciclo di Krebs, sistema ossidativo e citocromico, fosforilazione ossidativa e via metabolica dei pentoso fosfati, ricevono un'attenzione adeguata. Ovviamente non manca il metabolismo dell'azoto e la nutrizione minerale delle piante. Spazio anche agli ormoni e regolatori di crescita, per finire con la composizione e il metabolismo dei composti secondari nelle piante.

Per quanto riguarda la ricerca scientifica, oltre alla genesi dei suoli, di cui si occupa la Pedologia, i temi d'interesse riguardano ancora i processi chimici e biochimici nel sistema suolo-pianta, oltre alle interazioni che si sviluppano con l'atmosfera, compresi i processi di accumulo, mobilitazione e assorbimento di specie chimiche utili o dannose. Sono attive diverse ricerche sull'arsenico, i metalli pesanti e la degradazione dei fitofarmaci. Un consistente impegno è riservato al tema della fertilità dei suoli e allo studio dei suoli forestali. Il ciclo del carbonio e della sostanza organica è oggetto di attenzione sia per le tematiche collegate alla fissazione del diossido di carbonio che per l'emissione del gas serra. Si esamina l'impatto dei cambiamenti climatici sui suoli alpini e montani. Di notevole importanza, per la tutela della sicurezza alimentare, sono le ricerche biochimiche sulle micotossine che si sviluppano nei cereali. In campo vegetale ed entomologico ci si occupa anche di sintesi, isolamento e caratterizzazione di composti ormono-simili biologicamente attivi, regolatori di crescita.

Per quanto riguarda la ricerca scientifica, si può quindi dire che la chimica agraria e le discipline collegate offrono parecchie opportunità ai giovani, anche se le difficoltà, specie in Italia, non mancano. Negli USA, invece, è in corso un rilancio in grande stile. Sotto il promettente titolo "*New Era for Agricultural Science*" il noto periodico dell'American Chemical Society "*Chemical & Engineering News*" ha dato notizia, il 26 Ottobre 2009 [35], della conferenza stampa di Tom Vilsack, Segretario del Dipartimento all'Agricoltura con la quale si annunciava l'istituzione del *National Institute of Food & Agriculture* (NIFA). E' un organismo che ha il compito di rilanciare la ricerca federale (e non solo) in campo agro-alimentare. Ciò avverrà individuando i settori e assegnando finanziamenti per programmi di ricerca "extramurali", cioè svolti all'esterno dell'Ente, ma sempre sotto la sua egida. Alcune priorità sono state già individuate. L'elenco comprende in primo luogo la sconfitta della fame nel mondo, mantenendo la competitività dell'agricoltura statunitense tramite lo sviluppo di colture più resistenti; il miglioramento della nutrizione e la contemporanea lotta all'obesità infantile; il miglioramento radicale della sicurezza alimentare; il ricavo di energia da fonti domestiche e rinnovabili; l'identificazione di aree agricole adatte allo smaltimento del diossido di carbonio per i prossimi 10 anni. Il primo Direttore del NIFA, Roger N. Beachy, scienziato di fama mondiale, si è detto ottimista soprattutto per quanto riguarda l'utilizzazione delle piante come luogo di sintesi di prodotti nuovi, visto che sono più di 400.000 i composti chimici che esse sono capaci di fabbricare attraverso vie geneticamente diverse. Secondo lo scienziato è importante capire come lavorano le piante, capire le differenze, come nascono e come si possono sfruttare. Erano, in parte, i sogni del vecchio Ciamician, ma qui i finanziamenti, i mezzi e le conoscenze sono ben altra cosa rispetto a quell'epoca lontana. Per l'anno fiscale 2010 il Congresso USA avrebbe assegnato 1,3 miliardi di dollari, con un aumento del 9,9% rispetto al budget assegnato all'organismo che il NIFA sostituisce. La quota per ricerca e sviluppo è di 808 milioni di dollari. L'Istituto si

propone di collaborare con le altre agenzie federali per evitare duplicazioni e, in particolare, con la FDA (US Food and Drug Administration) per sviluppare nuovi sofisticati test diagnostici atti ad identificare patogeni alimentari e contaminanti chimici. L'USDA è, da parte sua, fortemente impegnato a sviluppare un sistema agricolo che si adatti ai cambiamenti climatici e collabora anche con il Dipartimento dell'Energia per quanto riguarda i biocarburanti. Nell'ambito di questa che si configura come una vera e propria trasformazione di un campo del sapere viene altresì sottolineata l'importanza della formazione degli scienziati, dei tecnologi, degli ingegneri e degli insegnanti.

Per quanto riguarda l'Europa, non si può dire che faccia solo da spettatrice e fornitrice di cervelli, anche se non esiste un organismo simile al NIFA. Bruxelles finanzia la ricerca in agricoltura e il VII Programma Quadro (VII PQ) 2007-2013 comprende, come noto, il tema "Biotecnologie, prodotti alimentari e agricoltura" il cui obiettivo principale è la creazione di una bioeconomia europea basata sulla conoscenza. Lo sforzo dovrebbe associare scienza, industria ed altre parti interessate, per sfruttare opportunità di ricerca nuove ed emergenti, con uno sguardo attento alle problematiche sociali ed economiche. Il budget è € 1.9 miliardi per tutta la durata del Programma Quadro, ben lungi quindi dal finanziamento del NIFA ma pur sempre di tutto rispetto. Di recente pubblicazione (20 luglio 2010) il bando FP7-KBBE-2011-5-CP-CSA per il settore "Food, Agriculture and Fisheries, and Biotechnology".

Circa le tante controversie in campo agricolo, non si può fare a meno di ricordare l'attuale competizione fra la produzione di bioenergia (derivata da biocarburanti) e quella di cibo. Si ricorda che i biocarburanti sono quelli derivati direttamente o indirettamente dalla biomassa. La necessità di contrastare i cambiamenti climatici riducendo l'emissione dei gas serra, spinge a utilizzare l'agricoltura per la produzione di bioenergia sottraendo terreno e acqua alle colture destinate all'alimentazione. I rischi di tale operazione in termini di sostenibilità sono stati recentemente illustrati da Muller, al cui articolo [36] si rimandano gli interessati. Un altro tema spinoso dell'odierna agricoltura riguarda gli Organismi Geneticamente Modificati (OGM), ossia quelli il cui patrimonio genetico è stato modificato stabilmente mediante l'inserzione di porzioni di DNA, allo scopo di sviluppare in essi nuove funzioni o far produrre sostanze nuove. L'operazione si compie grazie all'utilizzo di tecniche biotecnologiche che comprendono tecniche della biologia molecolare e dell'ingegneria genetica. Anche i rischi degli OGM sono piuttosto dibattuti e controversi. Ma, almeno in questo caso, il chimico ha più che altro da ascoltare. Viceversa, a lui spetta un ruolo essenziale nella messa a punto e convalida di metodi adatti a rivelare la presenza di materiale GM, e specialmente di saggi rapidi di analisi utilizzabili anche dal consumatore [37]. Con riferimento all'industria alimentare occorre poi spendere almeno due parole sulla crescente richiesta da parte del consumatore di cibi "naturali" e sulle l'etichettatura dei medesimi. Poco tempo fa è emerso [38] che negli USA l'industria è disorientata in quanto l'appellativo "naturale" è inteso in maniera differente dalla Food & Drug Administration e dal Dipartimento dell'Agricoltura. La questione è complessa in quanto, ad esempio, un latte addizionato di vitamine non potrebbe recare l'indicazione "naturale". La chimica, produttrice di coloranti, conservanti e altri additivi alimentari sembra un avversario della "naturalità" dei cibi ma, forse, occorre tener presente che le conoscenze chimiche restano indispensabili anche per la produzione e la tutela della qualità dei cibi "naturali".

A conclusione di questo lavoro, che la vastità dell'argomento rende per forza incompleto, si può stabilire un collegamento fra la situazione attuale e quella descritta da James Archibald McCrae nell'articolo "*The relation of chemistry to agriculture*" pubblicato più di ottant'anni fa sul *Journal of Chemical Education* [39]. McCrae si occupava non soltanto della produzione agricola, ma anche dei carburanti per i macchinari, dell'alimentazione degli agricoltori (cibi e cucina), della manutenzione degli edifici agricoli. La chimica era messa in relazione non solo con la produzione agricola ma anche con i diversi aspetti della loro esistenza. L'acquisizione di conoscenze chimiche aveva dato agli agricoltori: *confidence, enterprise, a sense of power, satisfaction, and contentment that were impossible before*. Sarebbe piaciuto a chi scrive dedicare, nella rassegna storica, un po' di spazio anche alle persone che lavoravano nei campi, perché fare l'agricoltore voleva dire, sottoporsi a una fatica incessante e monotona, a privazioni e perdite. Non è stato possibile. Detto questo, ci si può rallegrare che l'acquisizione di conoscenze chimiche da parte degli agricoltori sia continuato e abbia contribuito non solo a sfamare l'umanità, ma anche all'ulteriore emancipazione umana e sociale di coloro che lavorano la terra, auspicando nel contempo che ciò avvenga anche nelle zone più povere del pianeta. Solo così, gli agricoltori avranno verso gli scienziati quel *feeling of confidence and esteem* che anche oggi, come nel 1926, rimane un premio ambito.

Bibliografia

- [1] <http://www.fao.org/hunger/en/>
- [2] Hoffmann, *La chimica allo specchio*, Longanesi, Milano, 2005, p. 200, 242
- [3] P. Scaglione, *La Chimica e l'Industria*, 2009, **91**(10), 126
- [4] F. Trifirò, *La Chimica e l'Industria*, 2009, **91**(8), 104
- [5] I. Giglioli, *Chimica agraria campestre e silvana*, Marghieri, Napoli, 1902
- [6] F. Malaguti, *Nuove lezioni di chimica agraria*, Solari, Piacenza, 1857
- [7] G. Freschi, *Mem. R. Ist. Ven. Sci. Lett. Arti*, 1878, **20**, 325
- [8] G. Freschi, *Mem. R. Ist. Ven. Sci. Lett. Arti*, 1882, **22** (Parte I), 5

- [9] A. Selmi, *Almanacco di chimica agricola*, III, Battezzati, Milano, 1875
- [10] A. Saltini, *Storia delle scienze agrarie*, Edagricole, Bologna, Vol 2 p. 485, 633; Vol. 3, p. 23
- [11] A.L. Lavoisier, Trattato elementare di chimica (trad. S. T. Pàttaro, 2007, del *Traité élémentaire de chimie*, 1789), Baiesi, Bologna, p.122
- [12] U. Klein, *Ambix*, 2005, 52(2), 107
- [13] E. V. Meyer, *Storia della chimica*, Hoepli, Milano, 1915, p.585-608
- [14] J. Adrian, *Les pionniers français de la science alimentaire*, TEC & DOC – LAVOISIER, 1994, p. 147
- [15] J. Pennec, J.P. Escofier, Un centre de développement scientifique au XIX siècle: la faculté de sciences de Rennes” in *La Bretagne des savants et des ingénieurs: 1825-1900*” v. II, sous la direction de Jean Dhombres, Editions Ouest-France, Rennes, 1994, p.278
- [16] M. Taddia, *Sapere*, 2006, 72(6), 22
- [17] Malaguti, Durocher, *Ann. Chim. Phys.* 1858, Troisième série. Tome 54, 257
- [18] G.W. Black, Jr., *J. Chem. Ed.*, 1978, 55(1), 33
- [19] G. F. Johnston, *Catechismo di geologia e di chimica agraria*, Pomba, Torino, 1847
- [20] M. Loria, *Technology and Culture*, 1967, 8(2), 159
- [21] B. Silliman, Manual on the cultivation of the sugar cane and the fabrication and refinement of sugar, F. Preston Blair, Washington, 1833
- [22] C. A. Browne, *J. Am. Chem. Soc.*, 1926, 48 (8), 177
- [23] G. Testi, *Storia della chimica*, Casa Editrice Mediterranea, Roma, 1940, pp. 251 e segg.
- [24] I. Giglioli, *Commemorazione del Prof. Fausto Sestini*, in *Prosopografia di Chimici Italiani : commemorazioni dal 1895 al 1918* (Op. citata)
- [25] A. Menozzi, *Fausto Sestini*, in *Prosopografia di Chimici Italiani: commemorazioni dal 1895 al 1918* (a cura di N. Nicolini) <http://w3.uniroma1.it/nicolini/sestini.html>
- [26] *Ragguagli sui lavori eseguiti nel laboratorio chimico agrario in Bologna, 1877 anno VI*, Monti, Bologna, 1878
- [27] M. Zucchini, *Le cattedre ambulanti di agricoltura*, G. Volpe, Roma, 1970 (vedere anche R. Landi, *Le cattedre ambulanti*, 2003, in <http://www.arsia.toscana.it/eventiold/svilrur071103/5%20%20Landi.pdf>)
- [28] A. Aducco, *Chimica Agraria*, Hoepli, Milano, 1912, p. 258
- [29] G. Rosini, *Ciamician e la chimica delle piante*, in M. Venturi (a cura di), *Ciamician profeta dell'energia solare*, Atti del convegno storico-scientifico in occasione del 150° anniversario della nascita, Bologna 16-18 settembre 2007, Fondazione Eni Enrico Mattei, 2009, p.83
- [30] G. Ciamician, *La chimica organica negli organismi viventi*, Zanichelli, Bologna, 1908
- [31] C. Ravenna, *Chimica vegetale*, Zanichelli, Bologna, 1925
- [32] M. Giua, *La chimica nella vita sociale*, Vallardi, Milano, 1956, 53
- [33] M. Taddia, *Impatto tecnologico e pubblica utilità della chimica nell'opera di Anselme Payen (1795-1871)*, in *Memorie di Scienze Fisiche e Naturali “Rendiconti della Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL”*, serie V, vol. XXIX, parte II, tomo II, Roma, 2005, p. 99 (Atti XI Convegno Nazionale di Storia e Fondamenti della Chimica, Torino, 21-24 Settembre 2005)
- [34] <http://www.agraria.unibo.it/Agraria/default.htm>
- [35] *Chem. Eng. News*, 2009, 87 (17), 28
- [36] A. Muller, *Climatic change*, 2009, 94, 319
- [37] B. Pöpping, *J. Chem. Ed.*, 2001, 78(6), 752
- [38] B. E. Erickson, *Chem. Eng. News*, 2009, 87 (43), 22
- [39] J. A. McCrae, *J. Chem. Ed.*, 1929, 654

L'IMMAGINE DELLA CHIMICA E LE SUE CAUSE

Pietro Greco

greco@sissa.it

Oggi l'immagine ha perduto le sue tinte più forti e si è un po' stemperata nelle punte più acute. Ma per buona parte del XX secolo la chimica è stata percepita dal grande pubblico come l'icona stessa della "scienza cattiva". La disciplina d'elezione dello "scienziato pazzo", come ricorda Weingart Peter in un articolo, *Chemists and their Craft in Fiction Film*, pubblicato su HYLE, l'International Journal for Philosophy of Chemistry (Vol. 12, No. 1, 2006, pp. 31-44).

Anche i prodotti di più largo uso associati alla parola chimica hanno avuto e hanno tuttora un'immagine pubblica negativa. Prendiamo a esempio quell'insieme di materiali polimerici di sintesi che sono tra i prodotti di maggior successo dell'industria chimica del XX secolo. Ebbene, dapprima sono assurti a espressione di modernità: si pensi al successo, anche pubblicitario, delle calze in fibra di nylon o ai contenitori – inconfondibili, leggeri, resistenti declamava Gino Bramieri a *Carosello* – di moplén (il polipropilene). Poi hanno subito una sorta di transizione di fase nell'immaginario collettivo. La loro immagine si è ribaltata. Tanto che oggi i polimeri di sintesi sono considerati emblema dell'artificioso oltre e prima che dell'artificiale, contrapposto al naturale. Quando di una persona si dice che è "di plastica", si vuole intendere non solo che è falsa e fredda, ma che è addirittura "senz'anima".

La percezione negativa che ha avuto (e che in parte ha tuttora) la chimica non riguarda solo il grande pubblico. Ma ha attecchito anche presso molti intellettuali, dagli artisti più impegnati agli analisti politici più acuti. Il già citato Weingart Peter ha censito decine di film in cui la chimica emerge come la quintessenza dello spirito cattivo fuggito dalla bottiglia dell'apprendista stregone. Alla fine degli anni '80 del secolo scorso Rossana Rossanda, fondatrice e dotta editorialista di un giornale, *Il manifesto*, molto attento ai temi economici, dopo l'ennesimo incidente in un'industria di pesticidi, definiva "irriformabile" la chimica *tout court*.

C'è, come si vede, una costante in questi immaginari. Tutti – grande pubblico e intellettuali critici – trovano una difficoltà, che risulta quasi sempre insormontabile, nel distinguere l'industria chimica dalla scienza chimica.

La cronaca dei mass media e la letteratura per esperti conta così tanti fatti che corroborano la tesi secondo cui la chimica ha avuto (e in parte ha tuttora) una pessima immagine pubblica, che non vale la pena riproporne ancora. In ogni caso chi volesse approfondire l'argomento può consultare lo speciale che la rivista HYLE (International Journal for Philosophy of Chemistry) ha dedicato nel 2006 a *The Public Image of Chemistry*.

Quello che conviene approfondire in questa sede è il perché di questa immagine. Perché è nato questo immaginario chimico insieme negativo e confuso? Perché si è sviluppato? E perché, tutto sommato, si va lentamente stemperando?

Di seguito cercheremo di rispondere a queste domande. Non prima però di aver premesso che le nostre sono ipotesi di lavoro meramente speculative – fondate a loro volta su una percezione, sia pure di un addetto ai lavori con una lunga esperienza di comunicazione della scienza – che non hanno alcun supporto in una qualche ricerca empirica.

D'altra parte in letteratura di ricerche empiriche è possibile trovarne svariate che documentano l'esistenza di una cattiva immagine della chimica. Ma non ci sono – non a nostra conoscenza, almeno – ricerche empiriche che spiegano le motivazioni di questa pubblica percezione.

L'origine dell'immagine negativa della chimica presso il grande pubblico in tempi moderni risale agli anni '60. Dopo il successo – anche di immagine, appunto – delle calze di nylon o delle vaschette di moplén. È nel 1963, infatti, che Rachel Carson scrive il libro *The Silent Spring*, denunciando il susseguirsi di primavere sempre più silenziose nelle campagne del Nord America a causa della progressiva riduzione della popolazione di uccelli. Uccisi fin nella culla (nelle uova) dall'alta concentrazione di pesticidi, un altro dei prodotti di successo dell'industria chimica.

A parere di molti il libro di Rachel Carson segna l'inizio dell'ambientalismo di massa. Ma anche dell'immagine popolare negativa della chimica. Perché, attraverso un processo progressivo di distillazione che gli esperti di mass media e di psicologia delle masse ben conoscono, a uccidere gli uccelli e a rendere silenziose le primavere americane sui giornali e nelle televisioni è stato sempre meno l'uso improprio di un prodotto industriale specifico e sempre più "la chimica".

Cosicché "la chimica" è stata identificata come il principale nemico dell'ambiente dalla nascente cultura ecologica di massa e dai partiti "dei verdi" che ne sono stati l'espressione politica.

Ma non è tutta colpa dell'interpretazione più o meno fondata del libro di Rachel Carson. Spesso sono state le industrie chimiche stesse che ci hanno messo del loro, perseguendo strategie di comunicazione del rischio che hanno generato sospetti. E alimentato paure. Come è avvenuto, per esempio, tra gli anni '50 e gli anni '70 del secolo scorso a Love Canal, Usa, quando la Hooker Chemical Company negò ogni correlazione tra i rifiuti tossici con cui aveva coperto un canale e le malattie delle persone che su quei rifiuti avevano costruito case e scuole. La correlazione, invece, c'era.

E il grande pubblico lo ha poi scoperto. Con danni per percezione pubblica della chimica che è facile immaginare. E che è possibile persino formalizzare.

Peter Sandman sostiene, infatti, che la percezione del rischio può essere espressa in una formula: $R = H + O$. Dove R è, appunto, il rischio percepito, H (da hazard) è il rischio misurabile scientificamente e O è l'outrage, il senso di offesa, di oltraggio. Il sentirsi ingannati. Se O, come nelle vicende di Love Canal, è molto alto, allora il rischio percepito diventa altissimo e supera di gran lunga il rischio reale.

Se poi anche il rischio reale è grande, allora è emergenza piena.

È quanto è successo alla chimica tra il 1976 (incidente di Seveso, reale ma minimizzato dall'industria responsabile) e il 1984, (incidente di Bhopal, con migliaia di morti e una scarsa assunzione di responsabilità da parte dell'industria responsabile). È in quegli anni in cui le due variabili H e O toccano insieme il massimo relativo, che l'immagine pubblica della chimica tocca il suo minimo storico.

Ma la storia – anche la storia delle comunicazioni di massa – non sempre insegna tutto a tutti. Gli errori di comunicazione si ripetono, come rilevato dalla rivista *Chemical&Engineering News* in un recente articolo (20 aprile 2009), *What Should The Public Know?* (Cosa dovrebbe sapere la gente?), a proposito di un incidente a una fabbrica chimica americana e della strategia di comunicazione adottata. La domanda ammette una e una sola risposta: tutto. Solo la trasparenza può deprimere la variabile O e far coincidere R con H, il rischio percepito col rischio reale.

Solo la trasparenza assoluta (insieme alla riduzione del rischio reale) può, dunque, migliorare l'immagine della chimica.

Siamo, dunque, giunti a individuare – o, almeno, a elaborare un'ipotesi verosimile su – una delle cause dell'immagine negativa della chimica: la scarsa trasparenza nelle strategie di comunicazione del rischio dell'industria chimica.

Immagino già le reazioni del lettore: stai parlando degli errori, veri o presunti, dell'industria chimica. Ma cosa c'entra la scienza chimica? Ogni anno succedono milioni di incidenti stradali e solo in Italia muoiono migliaia di persone a causa dell'urto tra due o più corpi mobili: ma non è che per questo l'immagine della fisica va in sofferenza.

Vero. Ma ci sono alcune differenze nel rapporto tra industria meccanica (produttrice di corpi mobili, come auto e camion) e scienza fisica, rispetto al rapporto tra industria chimica e scienza chimica.

La prima è nella nomenclatura. L'industria meccanica si chiama, appunto, meccanica e non fisica. Dunque il grande pubblico non associa – giustamente – lo scontro tra automobili alla scienza fisica (in realtà, neppure a quella parte della fisica chiamata meccanica). Analogo discorso si può fare per la matematica, presente ormai come scienza in ogni processo industriale sebbene nessuno abbia mai parlato di industria matematica.

L'industria chimica invece si chiama proprio come la scienza. E, dunque, il grande pubblico associa inevitabilmente l'industria alla scienza. Cioè il rischio percepito associato all'industria chimica è esteso in maniera automatica alla scienza chimica, finendo per coinvolgerla.

Questo generatore automatico di confusione non interviene solo presso il grande pubblico. Coinvolge, anche gli scienziati. Anche gli scienziati chimici. Che in maniera appunto automatica utilizzano la medesima parola per indicare le due diverse dimensioni dell'industria e della scienza. Non ravvedete forse tracce di questo automatismo nel titolo – *I due volti della chimica* – peraltro molto efficace, scelto da un grande chimico, Luciano Caglioti, per un libro pubblicato nel 1979, che pure vantava la prefazione di un letterato chimico del calibro di Primo Levi e si proponeva tra i suoi obiettivi principali, per paradosso, proprio quello di distinguere tra industria e scienza?

In realtà – ecco uno spunto che meriterebbe un'ulteriore riflessione e una seria indagine empirica – le colpe degli scienziati chimici non si esauriscono nell'ingenuità linguistica. Forse la contiguità tra scienza chimica e industria chimica nel tempo è stata realmente molto stretta. Forse troppo spesso e troppo a lungo i chimici hanno pensato alla loro come a una scienza con una particolare vocazione per le applicazioni pratiche. Per gli sviluppi tecnologici.

Vero è che il rapporto tra scienza e tecnologia è strutturale. Non c'è scienza senza tecnologia. E, ormai, non c'è innovazione tecnologica sistematica senza conoscenza scientifica profonda. Tuttavia questo rapporto inestricabile non deve avere un dominatore assoluto. La scienza non deve essere e non deve sentirsi subalterna alla tecnologia fino al punto da negare a se stessa ogni altro valore se non quello di generatrice di tecnologia.

Lo so, il discorso si va facendo filosofico. E vedo già molti scienziati scappare. Ma questo è un altro punto in questione. Per troppo tempo è mancata – e per troppo tempo questa condizione è stata accettata dai chimici come naturale – una filosofia chimica. Mentre al contrario esistono da tempo una filosofia della fisica, una filosofia della biologia. Una filosofia della matematica (fra poco cercheremo di spiegare perché mettiamo la matematica a parte, rispetto alla fisica e alla biologia).

Gli storici delle idee scientifiche ci dicono che in passato i chimici hanno cercato di definire una filosofia chimica. Nel Seicento, per esempio, esiste una vera e propria "filosofia chimica" distinta e per certi versi contrapposta alla "filosofia fisica". Jan Baptist van Helmont o Robert Fludd pensano, come Galileo, che il grande libro della natura sia scritto in un linguaggio attingibile alla ragione. Ma pensano che la lingua universale non sia quella matematica proposta da Galileo, ma sia appunto la lingua della chimica. L'affermazione della visione meccanicistica del mondo attenua la ricerca di una autonoma filosofia chimica. Ricerca che sembra quasi terminare quando, poi, nel XX secolo viene elabo-

L'immagine della chimica e le sue cause

rata la meccanica quantistica e molti iniziano a considerare la chimica, per dirla con il fisico Paul Dirac, fisica quantistica applicata.

Ovviamente oggi non è possibile in alcun modo pensare i fondamenti della chimica al di fuori del quadro quantistico. Tuttavia – come sostengono in molti, anche non chimici, come il filosofo Karl Popper o il biologo Jacques Monod – non è possibile ridurre la chimica alla fisica.

La chimica, proprio come la biologia, ha una dimensione propria. Con uno statuto epistemologico autonomo (ma non separato) rispetto alla fisica. Solo che mentre alcuni biologi – si pensi a Ernst Mayr – si sono impegnati (riuscendoci) nella ricerca di una filosofia autonoma della biologia, non altrettanto è avvenuto in ambito chimico. I chimici non hanno cercato – non abbastanza, almeno – di definire una filosofia autonoma del proprio ambito di studi.

Tutto ciò ha avuto conseguenze pratiche. Una di queste è che nuove frontiere di ricerca a cavallo tra le discipline vengono ormai attribuite alla fisica (si pensi alle nanoscienze) o alla biologia (si pensi alla biologia molecolare), mentre i fondamenti sono tipicamente chimici. Non è solo un problema di terminologia o di equilibrio di potere accademico. È anche una questione di contenuto. Capita che nell'ambito degli studi di nanoscienze o di biologia molecolare l'approccio dei chimici, pur essendo talvolta più penetrante, sia trascurato o non abbastanza valorizzato.

Ma in questa sede ci occupiamo di immagine della chimica. Ebbene una delle conseguenze della mancata ricerca di una propria forte identità epistemica ha favorito il processo di sovrapposizione di immagine tra industria chimica e scienza chimica. Spesso, anche tra gli stessi chimici.

Inoltre non ha favorito la capacità della comunità chimica di dialogare con il grande pubblico. Una capacità decisamente inferiore a quella di fisici, biologi e matematici. Faccio un esempio: il bisogno di riscattare l'immagine della fisica nucleare dopo Hiroshima e la corsa al riarmo atomico ha portato un fisico, Frank Oppenheimer, a realizzare l'*Exploratorium* di San Francisco e a inaugurare la felice stagione degli *science centres*, i musei di nuova generazione in cui è "vietato non toccare". Non è un caso che in Italia siano stati dei fisici – Paolo Budinich a Trieste, Vittorio Silvestrini a Napoli – a creare *science centres*.

Analoghe esperienze sono state fatte dai matematici e, più di recente, dai biologici. Quasi mai da chimici.

Si dirà: la comunità chimica non ha cercato di elaborare con forza una propria autonoma filosofia perché la chimica ha una dimensione culturale diversa dalla fisica e dalla biologia, i cui ambiti sono più chiaramente definiti. Molti chimici sostengono – il compianto Alfonso Maria Liquori, per esempio – che la chimica somiglia più alla matematica, che alla fisica e alla biologia. È una scienza «trans», uno strumento utile in ogni ambito di studio della natura. È dunque – come la matematica – serva e nel medesimo tempo padrona di tutte le scienze naturali.

Tuttavia proprio questa somiglianza con la matematica rafforza i nostri precedenti argomenti. I matematici hanno coltivato con forza e profondità di pensiero la ricerca di una "filosofia matematica". Questo ha consentito alla matematica di conservare uno statuto epistemologico proprio e un'immagine presso il grande pubblico piuttosto forte. Basta dare uno sguardo agli scaffali dei libri di divulgazione della scienza in una qualsiasi libreria per verificare che la matematica è presente almeno quanto la fisica e la biologia, al contrario della chimica, che occupa spazi decisamente inferiori.

Riassumendo. La nostra tesi, meramente speculativa, è che all'origine della cattiva immagine della chimica presso il grande pubblico e presso molti intellettuali e artisti c'è la confusione tra industria chimica e scienza chimica. E questa confusione è stata favorita da una rivendicazione di autonomia epistemologica della scienza chimica non abbastanza forte.

Se tutto questo è vero allora è possibile spiegare almeno in parte il fatto che l'immagine della chimica – dopo aver toccato un minimo tra gli anni '70 e '80 del secolo scorso – è in una fase di ripresa, sia pure lenta.

La ripresa di immagine dipende dal fatto che R, il rischio chimico percepito, sta diminuendo. E sta diminuendo perché entrambe le variabili che contribuiscono a definire questa particolare funzione sono in calo. Diminuisce il valore della variabile H, ovvero il rischio reale. Perché, almeno nei paesi più avanzati, l'intensità degli incidenti nelle industrie chimiche e l'intensità dell'inquinamento chimico è diminuita. Ma è diminuita anche la variabile O, quella relativa alla percezione dell'inganno associata alla parola chimica.

Il valore di questa variabile è diminuito non tanto perché sono cambiate le strategie di comunicazione delle imprese. Ma perché sta aumentando la capacità della scienza chimica di distinguersi dall'industria chimica. Questa capacità di distinzione è dovuta sia al fatto che più spesso che in passato gli scienziati chimici assumono posizioni di critica esplicita, quando è necessario, ai comportamenti dell'industria chimica. Sia al fatto che sta aumentando la capacità dei chimici di elaborare una propria matura filosofia della natura. Un esempio per tutti, tra quelli che hanno avuto un impatto presso il grande pubblico. Il premio Nobel per la chimica Paul Crutzen, inventando dieci anni fa il termine e il concetto di "antropocene", non ha solo fornito un quadro teorico solido per spiegare come l'uomo sia diventato un attore ecologico globale, capace di interferire nei grandi sistemi biogeochimici globali, come il clima. Ma ha anche dato una chiara dimostrazione di quanto profonda possa essere la visione chimica del mondo non in contrapposizione, ma in sinergia con la visione fisica e/o biologica e/o matematica. Oggi nessuno, anche tra i media più spregiudicati, si sognerebbe di associare la chimica atmosferica di Paul Crutzen all'inquinamento chimico dell'atmosfera.

Di qui, se mi è concesso, l'esortazione finale di un comunicatore chimico alla comunità degli scienziati chimici. Rivendicate e praticate la vostra autonomia scientifica e filosofica. E aumentate la capacità di dialogo con il resto della società. Rimosse le (presunte) cause prossime e remote, la chimica cesserà di essere quell'icona della "scienza cattiva" riscontrata da Weingart Peter in decine e decine di film. E assumerà un nuovo ruolo nell'immaginario collettivo.

DIVERTIRSI CON LA SCIENZA AL TEMPO DI...FB

Vincenzo Villani¹, Concetta Berlantini²

(1) Dipartimento di Chimica, Università della Basilicata, Campus di Macchia Romana, Potenza

(2) Istituto Comprensivo "Umberto Postiglione" Raiano (AQ)



Naturalmente, FB sta per Facebook! Questo contributo è una testimonianza dell'uso utile e divertente che può essere fatto dei social network, le cui potenzialità nella comunicazione della scienza sono ben lungi dall'essere state esplorate!

Professore, cos'è l'effetto-farfalla?

Così è cominciato il lungo scambio di messaggi tra gli autori (un prof. universitario e una prof. di scuola) incontratisi per caso nella community. Messaggi strettamente personali, senza pretese, il cui unico scopo era...un disinteressato divertimento culturale! Tuttavia, ad un tratto ci siamo resi conto che avevamo realizzato qualcosa di originale che poteva essere bello condividere e che poteva rappresentare un esempio da emulare. Lo *skerzo* consisteva nel mescolare Scienza e Poesia: Enzo proponeva una spiegazione scientifica in forma di racconto breve ed informale, Concetta rispondeva con una poesia in puro stile *Berlantinesco*, spesso nella forma del *vekkio* caro sonetto! Il gioco è andato avanti per mesi: il risultato è qui adattato rispettando la spontaneità e la cronologia, per la gioia del lettore! Invece, quello che non è possibile riproporre sono il divertimento, l'ironia dei messaggi, dei link e dei commenti che gli autori si sono scambiati, le risate...anche questa è gaia scienza! Gli argomenti trattati hanno un carattere molto generale e possono essere di interesse non solo per il chimico, il fisico o...il letterato, ma per chiunque abbia voglia di capire e divertirsi con la Scienza! Esso è un esperimento di comunicazione del sapere e...confidiamo nella sua riuscita!

Cara Concetta,

l'effetto-farfalla (vedi, ho accettato il trattino!) è alla base della *teoria del caos*: una cosa veramente affascinante che spiega il comportamento dinamico di un sistema instabile. Di che??? Ad esempio abbiamo una montagna senza l'ombra di un albero, col passare del tempo il terreno diventa friabile, instabile: il suo comportamento diventa caotico! Non sappiamo quando cominceranno le frane e con che frequenza si ripeteranno, ma di sicuro prima o poi ci saranno. E' la triste realtà di tanti luoghi violati del nostro bel paese. Allora, basta un niente, un rumore assordante o...il battito d'ali di una farfalla e...giù la frana! Ma l'effetto-farfalla non spiega solo i disastri ma anche le cose belle! Prendiamo il classico *colpo di fulmine*. Due ragazzi si incontrano, uno sguardo (o un messaggio) e...nasce l'amore! I due erano alla ricerca dell'amore, erano diventati un sistema caotico, oramai bastava un nonnulla per farli innamorare...Questa, questa è la teoria del caos! Essa è presente tanto nella vita sociale quanto...nella dinamica delle molecole.

Ti ricordi il film *Jurassic Park*? è tutto basato sull'effetto-farfalla e il caos: il parco è stato reso così pericoloso, instabile che prima o poi accadrà il finimondo...che inevitabilmente si verifica! Molto meglio pensare al colpo di fulmine! Speriamo di non essere già in un *Jurassic Park*...

Rosa di maggio

*Avrebbe tanto voluto toccare
con mano. Ma non ne ebbe
il coraggio. Avrebbe voluto,
in tutta onestà, fondersi
col tutto, con una rosa di maggio.
Ma, poco lontano, più a valle,
il volo d'una farfalla avrebbe sortito
l'effetto (non secondario) d'un disastro.
Allora rimase appiccata così,
sul bordo di un pensiero,
sul perfetto teorema di un caos,
ad intrecciare primavere.*

L'azzurro del cielo

Cosa c'è di più bello di una giornata di sole con tanto di cielo sereno azzurrissimo? Nulla, tranne... l'amata, come recita la canzone che già cantavano le nostre nonne! Il colore del cielo ci è così familiare che non ci chiediamo più il perché di quel colore eppure...dovremmo! L'aria è trasparente e allora perché appare azzurra, illuminata da un sole giallo? In verità le menti più profonde da Platone ad Einstein se lo sono chiesto e pian pianino l'Uomo ha trovato la risposta esatta! Oggi sappiamo che quando guardiamo un bel cielo azzurro è come se facessimo un immenso esperimento di spettroscopia, di spettro...che??? E' quella branca della chimica-fisica che si occupa dell'interazione della luce con la materia. In questo caso la luce è quella solare, la materia è l'aria dell'atmosfera e lo strumento di misura i nostri occhi! Quando la luce bianca del sole (ma anche della luna) incontra le molecole dell'aria, che sono essenzialmente azoto e ossigeno, subisce un fenomeno noto come diffusione (o *scattering*) di Rayleigh in cui i colori dell'iride (dal violetto al rosso) vengono sparpagliati in tutte le direzioni, come in un immenso flipper, con la particolarità che quelli di piccola lunghezza d'onda (verso il violetto) vengono diffusi molto meglio di quelli di grande lunghezza d'onda (verso il rosso). In verità, Lord Rayleigh dimostrò che l'intensità della luce diffusa da oggetti molecolari è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda elevata alla quarta potenza: più piccola è la lunghezza d'onda e molto più intensa è la diffusione, cioè la luce diffusa risulta molto ricca di blu-violetto e povera di rosso. Il risultato è...il cielo azzurro! Anche il mare è azzurro per lo stesso motivo: in questo caso sono le molecole dell'acqua a diffondere in modo preferenziale la luce blu! D'altra parte, l'assorbimento della luce di piccola lunghezza d'onda ad opera dell'aria è favorito: in questo modo, il sole appare giallo e al tramonto, quando uno strato più spesso d'atmosfera viene attraversato, il rosso prevale.

Stato invisibile

*Non chiedo e neanche la cerco
una risposta. La chiara evidenza
dell'aria mi basta, e avanza.
Se altro non è, l'azzurro del cielo*

*dove entrano gli occhi, ma trasparente
e muto, un gioco di specchi soltanto,
poco m'importa se un miraggio
mi taglia lo sguardo.*

*Lo vedi anche tu che è tutto un
imbroglio, elevato all'ennesima
quarta potenza. Strano gioco*

*davvero, che disambigua in un blu
di molecole intorno. Stato di luce
invisibile, in cui mi nascondo.*

Oggi ti parlerò di...bolle di sapone!

E' molto improbabile che esista un bimbo che non abbia giocato con le bolle di sapone, ma le bolle di sapone piacciono anche ai grandi! Lord Kelvin, uno dei padri della scienza moderna, ebbe a dire: *Fate una bolla di sapone e osservatela: potreste passare tutta la vita a studiarla!*

Cosa rende le bolle di sapone così particolarmente belle? Almeno tre cose: sono perfettamente sferiche, sono colorate e volano capricciosamente! La pellicola saponata è elastica e leggerissima, quindi tende alla minore estensione possibile: (come un palloncino di gomma gonfio...): il risultato è la sfera che è il solido con la minima estensione superficiale. Il sottile guscio, dal punto di vista molecolare, è formato essenzialmente da uno straterello centrale di acqua saponata stabilizzato sulle due facce dal rivestimento continuo di molecole tensioattive: con la testa idrofila disciolta in acqua e la lunga coda idrofoba proiettata nell'aria. La luce bianca si rifrange nella pellicola, si riflette sulle due facce ed interferisce: tutti i colori dell'iride si cancellano tranne quello la cui lunghezza d'onda si accorda con lo spessore della pellicola. Il risultato, mutevole di zona in zona, è il nero nelle regioni troppo sottili, colori *freddi* nelle zone molto sottili, *caldi* nelle zone meno sottili e infine il bianco nelle regioni poco sottili! I colori cangianti e il volo capriccioso sono una conseguenza delle correnti d'aria intorno alla bolla che creano moti turbolenti...

Quando due bolle di sapone di uguali dimensioni si incontrano, si appiccicano l'una all'altra: le pellicole si fondono nella regione intermedia, appiattendosi come due dita premute l'una contro l'altra! Se le bolle sono diseguali, è la più piccola a premere di più formando una superficie sferica bombata all'interno della più grossa. Con tre bolle incollate... il problema è diventato già troppo difficile: è quasi una schiuma... e questa è un'altra storia!

Utopie nell'aria

*Fosforescenze d'inutili sfere,
che avranno da ridere, mi dico
puntando il dito su apparenze
d'arabesche anarchie, utopie*

*nell'aria. Ne combinano di tutti
i colori. Ridono, loro, con grazia
turchina, con dialettica danza.
Io, qua, molla tesa e lasciata,*

*rotondità strampalata di poco
spessore. Basta! sapeste che invidia
mi fanno. Al colmo di illusorie*

*passioni, esplodono, persino,
immagino senza alcun danno,
quelle birichine bolle di sapone.*

Non solo mattonelle!

Mi saprebbe dire con quali poligoni regolari si può piastrellare un pavimento? Il professore mi chiese all'esame di matematica. La richiesta mi sembrò strana, ma non mi scoraggiai! Con quali forme regolari posso ricoprire completamente il piano, senza lasciare spazi vuoti? Dunque, certamente i quadrati sono forme regolari (lati ed angoli uguali) e vanno bene: di quadrati era fatto il pavimento di casa mia. Anche gli esagoni vanno bene: così è fatto quello della nonna. I rettangoli sono irregolari: lati diversi. I triangoli equilateri vanno bene, infatti l'esagono può essere diviso in sei triangoli equilateri. E i pentagoni? Boh! Vediamo un po'. Il triangolo ha angoli di 60° , il quadrato di 90° e l'esagono di 120° : sono tutti divisori di 360° . Infatti, $360/60=6$, $360/90=4$ e $360/120=3$. Questo è importante per il problema della pavimentazione (che i matematici chiamano *tassellazione*). Con i triangoli posso costruire una "rosa" affianandone 6 intorno ad un vertice (una rosa a sei petali!) e continuare in questo modo senza lasciare spazi. Per il quadrato ne posso affiancare 4. Per l'esagono 3 (una rosa con soli 3 petali). Il pentagono ha un angolo di 108° , quindi $360/108=3.3$, affianandone 3 restano scoperti 36° : tre sono pochi per non lasciare spazio ma... non c'è spazio per il quarto: il pentagono non va bene! Per poligoni con un numero di lati maggiore di 6 non è possibile perché due poligoni non bastano e tre sono troppi! Quindi, la risposta esatta è: triangolo, quadrato ed esagono. Bravo, promosso! Il problema si estende al riempimento dello spazio... senza lasciare buchi: un tema importante in Natura, per i cristalli, per la schiuma e... per le api!

Infine, non voglio tralasciare gli sviluppi moderni più interessanti della tematica ovvero gli *aquiloni* e i *dardi* di Penrose. Hai presente un aquilone e la punta di una freccia, quelle in grassetto con gli spigoli angolati all'indietro? Ebbene queste piastrelle hanno proprio quella forma! Questi due poligoni irregolari (hanno lati ed angoli diversi) possono essere incastrati in modo meraviglioso formando un disegno infinitamente vario che non si ripete mai! Immagina come sarebbe bello avere il pavimento di casa fatto in quel modo! Il disegno che si ottiene possiamo dirlo *caotico* in quanto in esso ordine e disordine coesistono... in equilibrio! Inoltre, basta una piccola variazione, l'effetto farfalla, e oplà... il disegno cambia completamente! In più, aquiloni e dardi possono essere disposti a formare delle figu-

re con una complessa simmetria pentagonale, effettivamente scoperta nei cristalli di certe leghe: il pentagono si prende la rivincita!

Sodalizio di forme

*Ora, vedi, chissà se solo rotte
figure, sagome astratte, magari
congetture più o meno traslate,
prive di rilevanza, restano chiuse*

*nell'infinito cui tendiamo. Ora,
dimmi, chissà se il sogno veggente
di un poeta ancora si sposa,
si trasforma in petali di rosa. Ecco,*

*non faccio questione di forma.
Il punto è tutto qua. Si finisce
sempre sul lato buffo delle cose.*

*Troppe variabili in gioco in questo
banale intrico della vita. Poco
collimano col senso, il tempo, la poesia.*

Ultima neve di primavera!

Ricordi? Era un film triste. A Cava il tempo è ancora incerto e a Sulmona?...Chissà potrebbe ancora nevicare! Invece, a Praga quella notte del 1610 nevicava...

Notte di Natale a Praga. Tra le strette e curve strade medievali Johannes *Kepler* cammina frettolosamente, immerso nelle sue profonde meditazioni astronomiche. Tuttavia, una preoccupazione lo assilla: un regalo! Il regalo da offrire al suo nobile mecenate. Considera questo e quello...Ad un tratto la sua infinita curiosità è attratta dalla neve che si è posata sul paltò. Osservando acutamente, vede i tanto decantati cristalli di neve, simbolo e prova della divina perfezione. Per quanto variamente ramificati, la loro forma geometrica è perfettamente riconoscibile: si tratta dell'esagono.

Kepler non si limita alla sola estatica contemplazione, spontaneamente nella sua mente prende forma una domanda: perché i cristalli di neve sono proprio esagonali?

E' questo l'antefatto del libello *De nive sexangula* che Kepler scrive e regala al suo barone: libriccino di fondamentale importanza sotto molteplici punti di vista. Per rispondere alla domanda posta, Kepler ragiona in questo modo. Quale è la porzione più minuta che l'acqua può assumere? La goccia, naturalmente! E le gocce sono sferiche. Dunque, alla maniera di Democrito, immaginiamo l'acqua composta da gocce sferiche estremamente piccole: oggi diremmo le molecole dell'acqua, ma le molecole allora non erano ancora state "inventate"! Facciamo cristallizzare queste molecole. Potrò affiancarle in infiniti modi. Kepler, si chiese: in che modo possono raggrupparsi nella maniera più densa possibile? Dunque, facciamo una prima lunga e dritta fila di biglie, pardon, di gocce, come un collana...OOOOOOOOOOOO... Fatto! Quindi, aggiungiamo una seconda fila incastrando le biglie negli spazi della prima fila. Una terza fila e così via... sempre con lo stesso criterio: annidiamo le gocce negli incavi sottostanti!

Il risultato è l'impacchettamento esagonale compatto di particelle, il raggruppamento più denso possibile! Nel piano, intorno ad ogni particella ne abbiamo sei: 2 di lato + 2 sopra + 2 sotto = 6. Nello spazio 12 e le molecole si dispongono esattamente come l'inconsapevole fruttivendolo fa con la sua pila di arance: a gruppi di quattro sono disposte ai vertici di un tetraedro!

Kepler soddisfatto aveva trovato la risposta alla sua impertinente domanda: i cristalli di neve sono esagonali perché le "molecole" sferiche dell'acqua cristallizzando si dispongono in modo tetraedrico realizzando la simmetria più compatta (più stabile) possibile! In questo modo enunciò un'importante teorema matematico e non andò lontano dalla verità chimico-fisica! Ironia della sorte, il ghiaccio ha simmetria esagonale, ma...densità minore di quella dell'acqua liquida a causa dell'accomodamento ottimale dei legami idrogeno!

*Risuona, risplende, si confonde,
capovolta e senza vuoti, l'armonia
del mondo si riversa, cristallina
simmetria in un abbraccio, in punte*

Divertirsi con la scienza al tempo di...FB

*stellate di ghiaccio. Dico davvero,
in quel perso, flaccido fiocco, posso
vederci l'intero universo, prodigio
che s'avvera. Per caso vola nel cielo,*

*qua e là, spanderà silenzi di gelo,
essenze di memoria. Si scioglie, rovina
cadendo, come le mie speranze,*

*al sole di un triste mattino. Alla fine,
trovarla stretta in una goccia, la ragione,
il vero motivo. Effetto neve.*

Il muratore e la non-linearità!

“Professore è già il terzo livello a bolla che butto: si rompono come niente!”. Mi diceva Antonio mentre lavorava, alludendo a quell'arnese necessario per sistemare le cose dritte! Si tratta di un ingegnoso utensile a forma di righello con su un'ampollina con dentro una bolla d'aria e due tacche. Quando la bolla è sistemata tra le due tacche si è “sicuri” che il livello è perfettamente orizzontale. Altrimenti bisogna abbassarlo un po' a destra o un po' a sinistra! L'altro giorno sistemava una mensola lunga 150 cm. *Va bene a questa altezza? Appena un po' più giù...perfetto!* Stabilita la posizione ad un estremo pose il livello sulla tavola e osservò la bolla. *Bene!* E tirò un segno di matita all'altra estremità. I supporti furono incastrati, la mensola montata. Più tardi mi accorsi che...era inclinata di 3 cm! *Accidenti, mi ha montato la mensola storta!* Mi lamentavo con i miei. E come sovente mi succede, la mia mente...partì per la tangente (è proprio il caso di dire)! *Ma come è potuto accadere? Eppure il livello era orizzontale!* Qui, in pratica, abbiamo a che fare con un triangolo rettangolo di base 150 e altezza 3 cm. Se la mensola è montata dritta il triangolo scompare... altrimenti l'errore è dato proprio dalla sua altezza. Giusto? Base e altezza in un triangolo rettangolo sono i cateti e c'è un teorema che recita: *in un triangolo rettangolo un cateto è uguale all'altro cateto moltiplicato per la tangente dell'angolo opposto, $h = b \cdot \tan \alpha$.* La tangente è una funzione traditrice, è non-lineare! Non è come la tranquilla retta: la tangente aumenta molto in fretta con l'angolo, addirittura da zero all'infinito in novanta gradi! Somiglia un po' al profilo della Torre Eiffel che si impenna verso il cielo...Quindi, l'errore h che si commette misurando l'angolo con il livello non è proporzionale all'angolo, ma...alla tangente dell'angolo: l'errore aumenta in modo non-lineare con l'angolo! Se l'asse è abbastanza lungo è rischioso affidarsi al livello per sistemarlo dritto: nel nostro caso è bastato l'errore di 1° (male avvertibile) per causare l'errore di 3 cm ben visibile: effetto-farfalla! Il buon Antonio ignora il potere della non-linearità e perciò...continua a buttare arnesi nuovi credendoli rovinati! E' sempre il *teorema della tangente* che rende instabili le variazioni angolari sia nello scontro tra automobilisti che... nell'urto tra le molecole!

Verso il cielo

*Hai voglia a smussare angoli,
nel dritto mettere storte pendenze,
credendole rovinare, buttare all'aria
sghembe esistenze. Bella scoperta!*

*Come niente, capita che la somma
delle incertezze di una vita
intera, prende una brutta piega,
in discrepanze si propaga, senza*

*peso né metro. In questo caso
rischioso diventa impennarsi
verso il cielo. Sterile impresa.*

*Niente da fare, t'inganna, non è
lineare l'orizzonte che hai di fronte:
un'illusione ottica, soltanto.*

Tu credi che le piume dei pavoni siano iridescenti

e le ali delle farfalle di mille colori! Sì, è innegabilmente vero, ma esse sono anche... incredibilmente incolori! Non ci capisco più nulla...quasi non credo più ai miei occhi! Fu Robert Boyle, scienziato inglese del '600, ad osservare per primo che le piume dei pavoni apparivano colorate di bellissimi azzurri intensi in luce riflessa, ma apparivano incolori

guardate contro luce, in luce trasmessa! Esse, in verità, sono prive di pigmenti colorati, ma essendo dotate di una trama finissima possono dar luogo al fenomeno di interferenza della luce: come per le bolle di sapone, tutti i colori si cancellano tranne quello compatibile con la microscopica dimensione... delle barbule!

Allo stesso modo è iridescente il collo del piccione e il suo arcobaleno di colori varia mentre l'ignaro pennuto volge il capino a destra e a manca modificando, in questo modo, la trama riflettente! Analogamente, le farfalle appaiono variopinte per effetto... dell'interferenza della luce! Esse non sono colorate come il mio maglione color malva a base del primo colorante sintetico che Perkin preparò nell'1856. Sulle ali delle farfalle, la luce interferisce con la fine "polverina" superficiale e... ne risulta il solo colore compatibile con lo spessore di quelle microscopiche squame che formano le tessere di un mosaico, come tegole sul tetto!

Ricordi, dicemmo che il cielo è blu a causa della diffusione della luce ad opera delle molecole che costituiscono l'aria. Una cosa divertente è che gli occhi sono azzurri per un motivo analogo. Non è il tuo caso che hai dei bellissimi occhi scuri! Ma è il caso di mia moglie che ha bellissimi occhi azzurri! Il colore sia dell'iride chiara che scura è dovuto come per la pelle alla melanina, una complessa macromolecola. Solo che negli occhi chiari ce n'è pochissima e in finissime particelle che come le molecole dell'aria (e dell'acqua) diffondono preferenzialmente la luce azzurra. Quindi, quelli con gli occhi chiari si portano dietro un cielo in miniatura! Come taluni studenti mi fecero notare, al mare gli occhi chiari si scuriscono cioè... si abbronzano! Infatti, nell'iride d'estate la concentrazione di melanina aumenta per proteggere la sottostante retina e gli occhi chiari esposti al sole (mai in modo diretto!) diventano, come la pelle, più scuri. Ma non è finita: anche i capelli vanno dal biondo al nero per un motivo analogo!

Se ci pensi

*Tu appari diafano, senza colore,
mondo, se ti guardo contro luce
se soffio la polvere sulla trama
d'una vita stranita, mosaico*

*astratto sui tetti. Mosaico
che riflette una festa di colore
se risuona a caso nella trama
un armonico canto di luce.*

*Smerigliata farfalla, una luce
s'accende nell'oscuro mosaico
e allora ci pensi che trama
diventa, che incoerente colore!*

*Come graffia, adesso, quel colore
sull'onda perplessa della luce.
Vorticando quasi nella trama,
impazzano pixel nel mosaico.*

*Ma uno, soltanto un colore guizza
nel mosaico, deflagra nella trama.
Ed è solo amore che risplende, vita. Invio di luce.*

Considerazioni metafisiche?!

E' tutto un imbroglio, un miraggio, un'illusione ottica. Forse è così come dici tu: è sorprendente che l'aria trasparente ci appaia infine... azzurra. Ma la diffusione della luce spiega tutto in modo cristallino... trasparente. Un imbroglio certo è dovuto invece alla cieca credenza nella verità obiettiva offertaci dai nostri sensi. In verità, quello che noi vediamo, udiamo, sentiamo, gustiamo e odiamo è il risultato di un'elaborazione estremamente complessa della realtà. E' la rappresentazione psicologica che l'individuo e l'Uomo in quanto specie fa del mondo che lo circonda. I colori esistono come tali solo nella nostra mente, sono il risultato mentale di un processo che comincia sui coni della retina e termina nella corteccia cerebrale... Intorno a noi, mentre noi stiamo ad occhi chiusi, ci sono solo onde elettromagnetiche oscillanti in tutte le direzioni che raggiungono le nostre palpebre con varia intensità e frequenza: i colori non ci sono, non hanno realtà obiettiva, nascono nel nostro cranio, sono il risultato dell'interazione della luce con il vivente. E analogamente accade con gli altri sensi. Noi dobbiamo sapere che è così, ma sappiamo anche che non possiamo fare diversamente, non c'è modo di vedere la realtà in modo diverso da come la vediamo! Siamo ingabbiati nelle rappresentazioni che l'evoluzione biologica ha selezionato per noi. Il solo pensare ad una via d'uscita, ad una possibile alternativa... fa venire il capogiro! E' così: la nostra mente elabora sempre una qualche rappresentazione della realtà in

Divertirsi con la scienza al tempo di...FB

modo...utile alla sopravvivenza! Forse questo è l'imbroglio?! Forse, la verità la possiamo immaginare solo...con l'occhio della mente! *Ricordiamoci che il nostro cervello è un velo di cipolla!* Mi dice Raffaele, invitandoci a non... sopravvalutarci, ma anche, aggiungo io, a non sottovalutarci!

Assopita realtà

*Con il tempo che scorre
nel suo letto di stelle,
non è mia la colpa
se la buia realtà si assopisce
e sogna
lampi di luce.*

*Figùrati. Niente di grave.
Elettrizzata da un magnetico
sguardo, luccicherà di banale
buon senso, qualcosa
di evanescente
Io resto qua, in mezzo a questo
vibrare di onde, frequenze,
parafrasando quel tale:
tanto "colore" per nulla.*

14 giugno Convegno di Chimica & Beni Culturali!

Nella suggestiva Sala Odeion della *Sapienza*, tra modelli di gesso di statue classiche e rivestimento in serpentino, quante cose ho scoperto quel lunedì! Ho scoperto che la Chimica oltre a spiegare l'evoluzione dell'Universo tra il tempo e l'eternità è stata alla base dell'Istituto di Patologia del Libro, nato nel 1938 (nel convento di Panisperna, *panis et perna* ovvero pane e prosciutto...per i poveri) e morto nel 2008. Pensa, prima che l'Istituto operasse, si mirava a trascrivere il testo danneggiato, rinverdendo l'inchiostro e...distruggendo l'antico documento! Oggi si torna a leggere e scrivere sul...marmo! La carta dei libri e quaderni che appesantiscono gli zainetti dei nostri figli sono fatti sempre più di carbonato di calcio e sempre meno della costosa e leggera cellulosa! Sappiamo che il degrado del testo è legato alle condizioni ambientali ma anche all'invecchiamento spontaneo del materiale: *se la carta è cartaccia è come scrivere sulla sabbia* e...i raggi γ non si debbono usare giammai per sterilizzare la carta!

Ho scoperto che esiste l'Istituto Superiore per la Conservazione e il Restauro, i cui chimici si sono attrezzati a lavorare all'esterno, sulle opere, lontani dai laboratori. Ho scoperto la storia del ritrovamento e del restauro della *Vittoria* di Brescia, statua di bronzo probabilmente romana, simbolo di quella città. E' una *Nike* alata, nell'atto di incidere su di uno scudo l'elenco delle eroiche vittorie! Come quella più celebre del Louvre è...decapitata! Nel lontano 1826 fu ritrovata, ne fu stabilita l'esatta composizione chimica e avviato il restauro...Ho scoperto la figura eroica del chimico Enzo Ferroni che coniugando felicemente teoria e sperimentazione, tanto fece per il restauro delle opere d'arte danneggiate nell'alluvione di Firenze del 1966! E poi, analisi di leganti e di pigmenti, uso di strati protettivi, spettri di riflettanza e di fluorescenza e... tanto altro ancora: mi si è dischiuso un Universo!

Sul palmo della mano

*Lo sappiamo bene entrambi
che non è tutta chimica a far girare
il mondo. Plastica, trionfa la Vittoria
sul minerale informe,
s'invola, infine un canto
dal muto e freddo marmo.
E bene li vediamo ancora,
quei paladini di antichi splendori,
senza allori, né gloria, eccoli
ai piedi di chiese, a volte chini
dentro spelonche di streghe,
aleggiano, quasi astrali,
su spuntate cattedrali. Li porterei*

*di certo sul palmo della mano,
come Giove la sua Nike alata.
È amore per il bello che li muove,
un fluido magico su libri dal tempo
rosicchiati. Carta altrimenti affumicata.*

e ancora, per finire...

Tutto sommato, l'universo

*Tutto sommato l'universo respira
anche senza questa fissa di sognarlo,
inventare favole, risvegliare
i sassi dal sonno.*

*Fermo restando che un desiderio
chimico, un'astuzia, pulsa
intorno al cuore minerale del mondo,
a notti in perenne debito col giorno.*

*Ma la bellezza delle cose si eleva
Con ali di marmo
dal palmo di un Giove un po' invecchiato,
una specie di vaga scommessa
di eternità col tempo.*

*Come non lo sapessi, del resto,
che dovrei farne carta straccia
di quel sbiadito primo amore,
di passeggiate, mano nella mano,
ascoltando risacche del mare.*

*Le parole brillano, comunque,
come dorati granelli di sabbia
in preda alle carezze
teneramente gamma del sole.*

DALL'INTERARTICOLAZIONE DELLE DISCIPLINE SCIENTIFICHE AI PERCORSI DIDATTICI INTEGRATI

Silvia Ripoli

I.C. "M. L. King", Calcinaia (Pisa)
ripolirb@tin.it

Riassunto

Questo lavoro presenta un'analisi del significato dei termini "concetto unificante" (National Academy of Sciences degli U.S.A) e "concetto vitale" (E. Morin). Quest'analisi permette di identificare quale problematica sottende la progettazione e la realizzazione di percorsi didattici transdisciplinari nell'ambito dell'insegnamento delle Scienze. In particolare, è scelto il concetto interarticolante di Trasformazione come fondamento per la realizzazione di una serie di attività per l'insegnamento integrato delle Scienze nella scuola secondaria di 1° grado. Infine, vengono riportati e discussi i risultati di attività didattiche riguardanti le trasformazioni della materia.

Abstract

This work presents an analysis of the terms "unifying concept" (National Academy of Sciences of the U.S.A) and "vital concept" (E. Morin). This analysis is addressed to the identification of the problematic area underlying the planning and the realization of transversal education-paths in teaching of Sciences. In particular, the interconnecting concept of Transformation has been chosen as base for several activities for integrate teaching of Sciences in the Italian first grade secondary school. Finally, the results of activities about the transformations of the matter are reported and discussed.

Introduzione

Il tema della riorganizzazione dei curricula scolastici, pur essendo argomento di dibattito da anni, è estremamente attuale in seguito alle più recenti scelte nazionali sia per la scuola del primo ciclo che del secondo. In particolare il riordino del curriculum si è concluso, a livello centrale, per la scuola dell'infanzia, per la primaria e per la secondaria di 1° grado [1].

Uno degli aspetti che ha caratterizzato la ricerca per la riorganizzazione dei curricula della cosiddetta scuola di base è stata la necessità di una interdisciplinarietà. Ad esempio, per evitare la iperspecializzazione si parla di «inter e transdisciplinarietà»[2] oppure di «canali di interazione tra le discipline» [3] facendo riferimento all'«emergere di categorie aggreganti e/o trasversali, di nodi epistemici o problematici comuni, di simmetrie metodologiche che coordinano i vari saperi»[2]. Il problema della transdisciplinarietà è però spesso riferito al sapere nel suo insieme, divenendo così non facilmente traducibile in termini pratici nella riorganizzazione dei curricula scolastici.

Nelle recenti *Indicazioni per il curriculum per la scuola dell'infanzia e per il primo ciclo d'istruzione*[1] la trasposizione in ambito scolastico della transdisciplinarietà è stata realizzata con l'identificazione di "aree disciplinari". Tuttavia, all'interno di ogni area, traguardi e obiettivi sono spesso ripartiti in settori disciplinari veri e propri, così che l'idea della trasversalità perde la sua forza nelle indicazioni operative per gli insegnanti. Ad esempio, per l'area matematico scientifica tecnologica (che ci interessa nello specifico di questo lavoro) troviamo la suddivisione di traguardi e obiettivi nelle tre materie d'insegnamento: matematica, scienze sperimentali, tecnologia; all'interno di scienze sperimentali, specialmente per la scuola secondaria di 1° grado, è effettuata un'ulteriore tripartizione in Fisica e Chimica, Astronomia e Scienze della Terra, Biologia.[1]

Un altro esempio recente per l'area scientifica è il Piano Insegnare Scienze Sperimentali (Piano ISS). Anche in questo caso uno dei principi fondamentali del piano è quello di sviluppare un curriculum di educazione scientifica connotato da «forte continuità-integrazione con le altre aree» con la matematica e con le TIC.[4] Durante lo sviluppo del Piano ISS, piuttosto che aree disciplinari, sono stati individuati quattro temi riferibili a più discipline o di confine tra esse (**Tabella 1**),[5] intorno ai quali sviluppare una ricerca di percorsi realizzabili, possibilmente in verticale. Inoltre, la scelta di sperimentare attività didattiche organizzate intorno a temi a forte carattere interdisciplinare ha conferito al Piano ISS una connotazione originale in ambito europeo.[6]

Tabella 1. I quattro temi cruciali del Piano ISS.[5]

I temi trasversali di ISS
Luce, colore, visione
Le Trasformazioni
Leggere l'ambiente
Terra e Universo

Questi due recenti esempi (Indicazioni per il curricolo e Piano ISS) delineano un quadro ancora abbastanza aperto su come realizzare a scuola la transdisciplinarietà, in particolare in ambito scientifico, probabilmente a causa della mancanza dell'individuazione condivisa degli elementi di connessione tra le discipline stesse.

Questo articolo si propone di individuare una chiave di lettura del rapporto tra discipline nell'ottica puramente didattica della riorganizzazione dei percorsi scolastici, compatibili con l'idea della transdisciplinarietà. Illustrando alcune attività realizzate nella scuola secondaria di 1° grado, si vuole portare come esempio l'esperienza di lavoro in questo livello scolastico, che per suo ordinamento, non suddivide le Scienze in veri e propri compartimenti disciplinari.

Concetti e processi unificanti

La National Academy of Sciences degli U.S.A. nel 1996 pubblicò un volume ampio e articolato,[7] cui seguirono in anni successivi alcuni supplementi. In questa pubblicazione l'accademia scientifica americana proponeva gli standard nazionali per l'educazione delle scienze, elaborati con il coinvolgimento di diversi soggetti legati al mondo educativo (insegnanti, addetti all'articolazione dei curricoli, operatori dei musei o dell'industria, legislatori,...). Gli standard, inoltre, furono stesi sia per la formazione professionale che per il curricolo scolastico. I seguenti aspetti degli standard per il curricolo scolastico risultano particolarmente interessanti ai fini di questo lavoro.

L'organizzazione dei contenuti nel curricolo (suddiviso su tre livelli di abilità e conoscenze: Livello K-4; Livello K-5-8; Livello K-9-12) abbracciava le seguenti discipline:

- Scienze Fisiche (inclusi alcuni contenuti propri della Chimica);
- Scienze della Vita;
- Scienze della Terra e dello Spazio;
- Scienze e Tecnologia;
- Scienze in una prospettiva personale e sociale;
- Storia e Natura delle Scienze.

L'intero impianto poggiava su una serie di strutture che mettevano in relazione le discipline, queste strutture sono state definite dalla National Academy of Sciences *concetti e processi unificanti* **Tabella 2**. [8]

L'idea alla base della proposta americana fu proprio quella di identificare concetti e processi che *unificano* le discipline scientifiche e tecnologiche, sui quali focalizzare l'insegnamento delle Scienze. L'identificazione dei concetti e dei processi unificanti fu fatta seguendo i seguenti criteri:

- i concetti e i processi forniscono connessioni tra e attraverso le discipline scientifiche tradizionali;
- i concetti e i processi sono fondamentali e generali;
- i concetti e i processi sono comprensibili e utilizzabili da coloro che attuano i programmi scientifici;
- i concetti e i processi possono essere espressi e sperimentati in una maniera appropriatamente sviluppata durante l'educazione scientifica K-12.

Tabella 2. Concetti e processi unificanti identificati dalla National Academy of Sciences.[8]

Concetti e processi unificanti
Sistema, ordine e organizzazione
Evidenza, modello e spiegazione
Cambiamento, costanza e misura
Evoluzione e equilibrio
Forma e funzione

Interarticolazione tra discipline: i concetti vitali secondo Morin.

La proposta della National Academy of Sciences, stimola almeno una domanda: «È veramente didatticamente efficace organizzare il curricolo scolastico delle Scienze in un'ottica di *unificazione* delle discipline?».

In questo articolo, l'attenzione è concentrata all'ambito scientifico, ma ovviamente il problema è generale. Se l'idea dei concetti e processi unificanti fosse valida per l'insegnamento delle Scienze, non è escluso che potrebbe essere applicata anche ad altri ambiti, ad es. all'ambito linguistico o a quello storico-sociale-economico, e così via fino ad abbracciare tutto il sapere nel suo insieme. Di conseguenza il problema risulta ampio e generale.

Per poter dare una risposta alla domanda appena posta, è necessario fare una piccola deviazione e spostarci dal piano didattico a quello epistemologico. Come anticipato nell'introduzione, al problema della connessione tra discipline e le ricadute che essa può e deve avere sulla realizzazione dei percorsi didattici è fornita spesso una soluzione invocando la inter- transdisciplinarietà; tuttavia, in questa sede può essere utile focalizzare l'attenzione su pochi aspetti, esaminati con chiarezza e profondità insieme da Edgar Morin in appendice al suo libro "La testa ben fatta". [9] Vediamo quindi alcune affermazioni di E. Morin che, anche se estratte dal testo originario, non perdono il loro significato.

Dall'interarticolazione delle discipline scientifiche ai percorsi didattici integrati

«Sebbene sia inglobata in un contesto scientifico più vasto, una disciplina tende naturalmente all'autonomia, con la delimitazione delle sue frontiere, il linguaggio che essa si dà, le tecniche che è portata a elaborare o a utilizzare ed eventualmente con le teorie che le sono proprie».[10]

«Certe concezioni scientifiche mantengono la loro vitalità perché non si prestano alla chiusura disciplinare».[11]

«Il grande problema è dunque di trovare la difficile via della interarticolazione fra scienze, ciascuna delle quali ha non soltanto il proprio linguaggio, ma anche concetti fondamentali che non possono passare da un linguaggio all'altro».[12]

In altre parole, l'idea proposta da E. Morin è che ogni disciplina in quanto tale risulta autonoma, di conseguenza *non* si può parlare di unificazione delle discipline. Morin tuttavia individua dei concetti importanti per la connessione tra le discipline, anzi, non sono solo importanti, sono *concetti vitali*. La vitalità di questi concetti è data proprio dal valicare i confini della disciplina, la quale senza tali sconfinamenti risulterebbe sterile:

«Certe nozioni circolano e spesso varcano clandestinamente le frontiere senza essere individuate dai "doganieri". Contrariamente all'idea, molto diffusa, secondo cui una nozione ha pertinenza solo nel campo disciplinare in cui è nata, certe nozioni migratrici fecondano un nuovo campo nel quale si radicano, anche al prezzo di un fraintendimento».[13]

Sul piano epistemologico possiamo condividere la posizione di E. Morin che esclude un'unificabilità delle discipline ma le pone in relazione tramite i concetti vitali; tuttavia dobbiamo tornare al punto iniziale, cioè quello didattico. Trasportare l'idea di E. Morin sul piano didattico significa individuare i concetti vitali e su essi costruire i percorsi d'insegnamento. I percorsi così pensati avranno insita la caratteristica dell'integrazione, saranno necessariamente percorsi interarticolati o integrati, pur non snaturando le singole discipline (**Figura 1**).

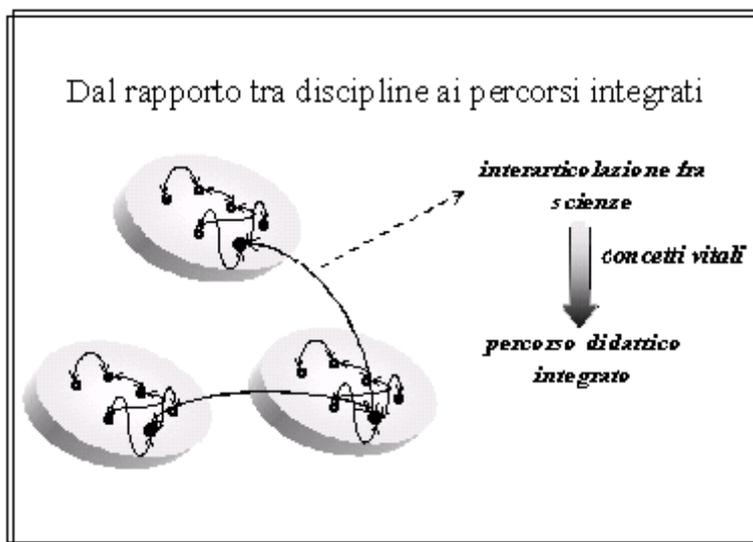


Figura 1. Schematizzazione del passaggio dall'interarticolazione tra discipline alla realizzazione di percorsi didattici integrati. Le scatole ovali rappresentano le discipline; i cerchi e i processi e i linguaggi che le caratterizzano; i cerchi neri i concetti vitali; le frecce le connessioni.

Trasformazione: un concetto vitale; un concetto didatticamente interarticolante.

Dall'idea che è stata delineata a partire dalle affermazioni di E. Morin segue che un percorso didattico integrato debba ancorarsi ai *concetti vitali*. La loro identificazione necessita inevitabilmente un lavoro d'equipe, però è possibile sbilanciarsi almeno in una prima proposta riguardante il concetto di Trasformazione.

Innanzitutto, è importante delimitare il significato del termine Trasformazione, identificando con esso *un processo che si realizza nel tempo attraverso una serie di cambiamenti tra loro correlati*.¹ [14] *E' idea condivisa che la Trasforma-*

1. Il concetto di Trasformazione cui si fa riferimento non include quello di trasformazione geometrica, essendo questa "una corrispondenza dei punti del piano in sé: ad ogni punto del piano la trasformazione fa corrispondere un punto del piano stesso".

zione sia caratteristica di diverse discipline scientifiche (Fisica, Chimica, Biologia, Geologia, Astronomia),[15] di conseguenza questo concetto è facilmente identificabile come concetto interarticolante che scavalca i confini disciplinari. Inoltre, esso è un concetto ampio che include quelli di cambiamento e quello di equilibrio, appoggiandosi anche al concetto di tempo (a sua volta interarticolante?) [16]).

A questo proposito vale la pena allargare lo sguardo verso la dimensione storico-epistemologica del concetto di Trasformazione. Esso infatti ha le sue origini nella filosofia greca, ovviamente assumendo un significato differente da quello contemporaneo. I filosofi greci si posero il problema di spiegare il “divenire del mondo” esprimendo soluzioni diverse e talvolta antitetiche.[14] Ad esempio, Eraclito (VI-V sec. a.C.) sosteneva, in estrema sintesi, che il mondo fosse un eterno fluire in cui ogni cosa cambiava per spostamento o mutamento di qualità, producendo un Tutto che fosse unione di contrari. Differentemente, Parmenide (VI-V sec. a.C.) negava il “divenire” identificando la vera essenza del mondo nell’Uno, infinito e invisibile. Possiamo però affermare che la posizione espressa da Aristotele (IV sec. a.C.) sul “divenire” ha condizionato il significato di Trasformazione fino allo sviluppo della scienza moderna, avvenuto con G. Galilei. Per Aristotele il “divenire” aveva un ruolo generale che soggiaceva a tutte le forme di conoscenza, ognuna delle quali si occupava di uno specifico “divenire”: quello dell’anima, quello degli animali, quello dei corpi celesti.

Nel Seicento G. Galilei, come è noto, introdusse la lettura del “libro della natura” attraverso il linguaggio e il ragionamento matematico. Questa posizione escludeva così i concetti aristotelici finali (scopi della natura) e formali (essenze e qualità), non descrivibili in termini matematici. Per quanto riguarda il “divenire”, ovvero la trasformazione della natura, l’attenzione di Galilei si spostò verso ciò che per Aristotele era invece un “divenire” particolare: la trasformazione secondo il luogo (moto locale). Galilei considerò come unico processo di trasformazione solo il moto, inteso nel significato moderno di spostamento, descrivendolo e spiegandolo attraverso il ragionamento matematico.

La posizione galileiana ha avuto un merito indiscusso per lo sviluppo della scienza moderna, operando tuttavia una riduzione del significato di Trasformazione alla sola trasformazione per spostamento ed escludendo per molto tempo le trasformazioni chimiche, biologiche, geologiche dallo studio con i nuovi strumenti logici galileiani (le quantità). Le attuali scienze che studiano tali trasformazioni, pur trovando fondamento nella posizione di Galilei circa l’uso della matematica, si occupano, in un certo senso, del “divenire del mondo” attraverso lo studio dei mutamenti di qualità. Prendiamo ad esempio il caso della reazione chimica:

«Da un punto di vista fisico, una reazione è un processo di trasformazione che modifica le posizioni medie dei nuclei e, in misura maggiore, la distribuzione degli elettroni. [...] Da un punto di vista chimico, tuttavia, una reazione implica sempre degli enti, sostanze chimiche/molecole, che si distruggono ed altri che si creano. Questo comporta che il sistema iniziale e quello finale sono costituiti da enti diversi e, quindi, chimicamente sono due sistemi diversi.»[17]

Ugualmente, possiamo trovare differenze tra il concetto di mutamento in Biologia (evoluzione) e quello in Fisica.[18] D’altra parte il ruolo della Chimica nel declinare e fortificare il concetto moderno di Trasformazione è sicuramente fondamentale, al punto che la trasformazione della materia viene considerata un nucleo fondante di questa disciplina.[19] Sul piano didattico un percorso integrato riguardante la costruzione del concetto di trasformazione non potrà prescindere, nel suo sviluppo verticale, anche dai contenuti propri della Chimica.

Gli aspetti che sono stati riassunti in questa sezione caratterizzano certamente il concetto di Trasformazione come *concetto vitale* sul piano epistemologico e come *concetto integrante* sul piano didattico. Nella prossima sezione è presentato un percorso, sperimentato nelle classi, e fondato proprio su questo concetto ma prima è necessario concludere questa parte con alcune riflessioni sulla scelta del termine “trasformazione”.

Per esprimere il concetto di cambiamento nel tempo si trova usato anche il termine “evoluzione”. [7] In questo lavoro è stato comunque preferito quello di “trasformazione”, essendo il primo comunemente associato all’ambito biologico, con estensione a quello delle Scienze della Terra. Il concetto di Evoluzione, così come è usato in Biologia, si riferisce a una “direzione storica” del tempo,[20] non tanto nel senso di velocità del mutamento, ma proprio riguardo alla direzione del mutamento: «*ciò che al presente deriva da materiali e forme del passato*».[21] In Fisica e in Chimica il tempo è considerato piuttosto un parametro, una grandezza comoda nel proporre un modello del mutamento studiato. Il termine “trasformazione” è sembrato pertanto più idoneo ad esprimere un *concetto vitale* avendo una maggiore forza semantica riguardo all’interarticolazione tra i vari ambiti scientifici (e non solo).

Un esempio di attività nelle classi.

Come premesso nell’introduzione, una delle idee che muove questo articolo è quella di proporre l’esperienza del lavoro nella scuola secondaria di 1° grado, la quale per ordinamento non prevede la compartimentazione delle discipline scientifiche e presuppone una didattica integrata, anche se non sempre ciò è realizzato nei fatti.

In **Tabella 3** sono riportate alcune attività svolte nelle tre classi della cosiddetta scuola media e pensate con il filo con-

Dall'interarticolazione delle discipline scientifiche ai percorsi didattici integrati

duttore della Trasformazione; in alcune di esse, è stato previsto anche l'uso di linguaggi matematici.²

Tabella 3. Attività realizzate in una scuola secondaria di 1° grado e ancorate al concetto di Trasformazione.

Livello	Classe	Percorso	Attività che sviluppano il concetto di Trasformazione	Discipline
Scuola secondaria di 1° grado	1 ^a	La trasformazione del seme [26]	Osservazioni della germinazione dei semi di fagiolo	Biologia Matematica
			Osservazione dell'interno di un seme di fagiolo	
			Statistica sulla variabilità nei tempi di germinazione dei semi di fagiolo	
	2 ^a	Le trasformazioni della materia [22] [23] [27]	Le idee spontanee sul concetto di trasformazione	Chimica Fisica
			Il tempo nel processo di dissoluzione e nella trasformazione dello zucchero per riscaldamento	
			Le reazioni chimiche: la formazione del caramello; la reazione tra acido cloridrico diluito e polvere di marmo con recupero del prodotto, l'interazione tra sostanze acide/basiche/neutre e un indicatore di pH.	
		L'apparato digerente	Le trasformazioni del cibo	Chimica Biologia
3 ^a	Rocce e minerali	La cristallizzazione	Chimica Scienze della Terra	

Un aspetto molto importante su cui è stata focalizzata l'attenzione nelle varie attività è quello del tempo. Si è ritenuto, infatti, che sia proprio la percezione del cambiamento associato al tempo, ciò che innesca e/o rafforza l'apprendimento del concetto di Trasformazione. Se il concetto di Trasformazione è sviluppato stimolando l'organizzazione di una serie di cambiamenti in "un prima", "un durante" e "un dopo", è prevedibile che siano più accessibili concetti sofisticati come quello di equilibrio.

Tra le varie attività risulta interessante l'analisi più approfondita di quelle riguardanti la trasformazione della materia, realizzate nella classe seconda, all'interno delle quali il ruolo della Chimica è dominante. In questo caso, le attività sono state avviate con un sondaggio sulle conoscenze spontanee degli alunni,[19] che da un lato ha permesso all'insegnante di registrare i modelli mentali degli alunni, dall'altro ha stimolato la curiosità della classe verso le attività successive.³ Le **Tabelle 4 e 5** e la **Figura 2** riportano nel dettaglio i risultati del sondaggio.

Tabella 4. Domande proposte per il sondaggio iniziale per l'attività "le trasformazioni della materia" di Tabella 3.[22]

1) Dei seguenti esempi quali, secondo la tua idea, possono essere chiamati "trasformazione"? a) Un bambino fa una passeggiata. b) Accendiamo un fiammifero. c) Un bicchiere cade e si rompe. d) Cuociamo una fetta di carne. e) Un osso lasciato in aceto. f) Leggiamo un libro. g) Bruciamo un pezzo di legno.
2) Fai un esempio, diverso dai precedenti, che secondo te può essere detto "trasformazione".
3) Secondo te, quanto tempo serve a sciogliere due cucchiaini di zucchero in una tazzina di caffè?

2. Tali attività sono state realizzate nell'anno scolastico 2008/2009 presso l'I.C. "M. L. King" di Calcinaia (PI) come tirocinio del Master universitario di II livello in "Didattica integrata delle scienze matematiche e delle scienze sperimentali" organizzato dall'Università di Pisa.

3. La classe aveva svolto in maniera operativa un percorso introduttivo sulle soluzioni [20] e utilizzato un semplice modello grafico a particelle per interpretare e spiegare alcune proprietà della materia.

Tabella 5. Risposte alle domande 2 e 3 del sondaggio iniziale di Tabella 4.

alunno	risposte alla domanda n°2	risposte alla domanda n°3
1	un foglio viene strappato	in caffè caldo 30s; in caffè freddo 1 min
2	una persona si infila due dita negli occhi e diventa cieco	1 min
3	trasformare un blocco di ghiaccio in liquido	un'infinità di tempo perché anche se si scioglie, si scioglie in parti più piccole e sempre più piccole fino a diventare minuscole ma quei due cucchiaini sono sempre rimasti
4	un osso lasciato in aceto perché prima di essere immerso è diverso da quando viene levato	poco perché il calore lo fa sciogliere più velocemente
5	Aria riscaldata da una candela	Non si scioglie
6	gli occhiali cadono e si rompono le lenti	Non si scioglie
7	un soldo lavato e sporco	pochissimo perché il caffè brucia e lo zucchero si scioglie grazie al calore del caffè
8	un osso si brucia e si può spezzare	1 min
9	Quando da piccoli si diventa grandi oppure dalle elementari alle medie	2 min
10	<i>Non risponde</i>	30 s
11	<i>Non risponde</i>	1 min e 30 s
12	acqua messa dentro il frigo diventa ghiaccio	30 s
13	<i>Non risponde</i>	Non si scioglie
14	spezzare un ramo	3 min
15	il bruco che diventa bozzolo e poi farfalla	00,10 s
16	da seme a fiore	pochissimo
17	una farfalla nella crisalide che diventa farfalla	2 s

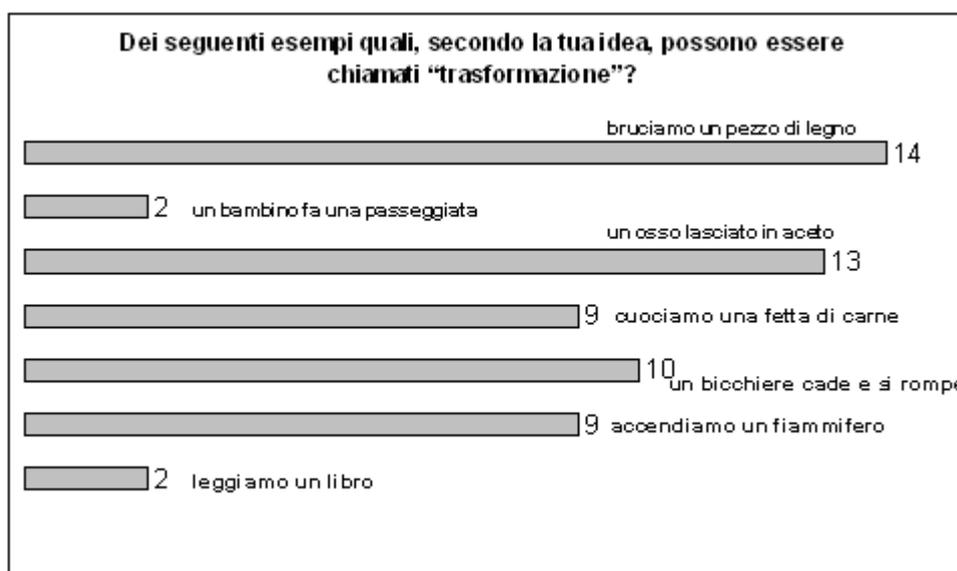


Figura 2. Diagramma a barre orizzontali delle frequenze delle risposte fornite alla domanda 1 del sondaggio iniziale di Tabella 4.

Le attività successive (Scheda 1; Figura 3; Figura 4) sono state realizzate con la finalità di far assumere la consapevolezza del concetto di Trasformazione; in particolare sono state progettate per attivare la percezione della Trasformazione come processo che si svolge nel tempo (prima-durante-dopo). Essenzialmente gli alunni hanno realizza-

Dall'interarticolazione delle discipline scientifiche ai percorsi didattici integrati

to o osservato nel tempo due processi di solubilizzazione (solido-liquido e liquido-liquido), con e senza mescolamento, e una reazione chimica con riscaldamento. Al termine delle varie attività gli alunni sono stati invitati a scrivere una relazione.

Una volta realizzate queste attività, sono state confrontate le relazioni e i dati raccolti dai ragazzi. L'insegnante ha guidato una discussione verso la concettualizzazione e una sintesi:

«una trasformazione è un processo che avviene nel tempo; posso riconoscere che è avvenuta una trasformazione perché partendo da una situazione iniziale arrivo, nel tempo, ad una situazione finale nettamente diversa da quella di partenza».

Infine, gli alunni, opportunamente guidati, hanno riesaminato le risposte-tipo del sondaggio iniziale alla luce della nuova e/o più consapevole idea di trasformazione.

Scheda 1. Attività operative realizzate in una classe 2^a della scuola secondaria di I grado sul concetto di Trasformazione.

Chiedere ai ragazzi di portare strumenti di misura del tempo (orologi; cronometri...). Durante le attività l'insegnante fotografa le fasi dell'esperimento.

I. Soluzione di acqua e sale.

Lavoro a gruppi di 3.

Consegne

- A) Versa due cucchiaini di sale in mezzo bicchiere di acqua demineralizzata. Annota le osservazioni e disegna.
- B) Un ragazzo comincia a mescolare la miscela; un altro comincia a misurare il tempo; il terzo annota e/o disegna cosa accade nel tempo.
- C) In quale situazione avete deciso di smettere di mescolare e avete smesso di misurare il tempo?

II. Soluzione di sciroppo di frutta.

Lavoro a gruppi di 3.

Consegne

- A) Usando il contagocce, versa con cautela lo sciroppo sul fondo di mezzo bicchiere di acqua demineralizzata.
- B) Subito dopo aver versato lo sciroppo comincia a misurare il tempo. Non mescolare!
- C) Annota e/o disegna ciò che osservi nel tempo.
- D) In quale situazione avete deciso di smettere di misurare il tempo?

III. Formazione del caramello.

Osservazione individuale; esperimento collettivo.

Consegne

Versare un cucchiaino di zucchero in uno stampino per dolci di carta stagnola (o in una capsula di porcellana) e porlo sulla piastra riscaldante accesa. Cominciare a misurare il tempo. Annotare e/o disegnare cosa accade ai vari intervalli di tempo secondo uno schema del genere:

t₀=...min | t₁=...min | t₂=...min | t₃=...min |
accade..... | accade..... | accade..... | accade..... |



Figura 3. Documentazione fotografica dell'attività I della Scheda 1.



Figura 4. Documentazione fotografica dell'attività II della Scheda 1.

Metodi, risultati e discussione.

Per quanto riguarda le metodologie didattiche praticate nello svolgimento delle attività nelle classi (**Tabella 3**), tre sono i punti principali tenuti in considerazione:

1. Attività operativo laboratoriali.
2. Problem-solving.
3. Concettualizzazione.

Dall'interarticolazione delle discipline scientifiche ai percorsi didattici integrati

Si cercato il più possibile di far svolgere attività laboratoriali con esperimenti, anche progettati dai ragazzi, eseguiti da loro o con la loro collaborazione, poiché è ormai idea consolidata (anche se non altrettanto diffusa) che sia la metodologia più idonea ad un apprendimento significativo delle scienze. [20] [21]

Le varie attività sono state proposte in seguito a problematiche o domande sollevate dalla classe e possibilmente ancorate ad esperienze già eseguite dagli alunni, così che il salto concettuale potesse essere sviluppato in un contesto noto. Quando questo non è stato possibile (ad esempio per le attività della **Scheda 1**) si è cercata la condivisione del problema attraverso un sondaggio sulle conoscenze spontanee dei ragazzi. Essenzialmente, l'intento è stato quello di proporre e/o progettare alcune attività in risposta a un problema condiviso con la classe (problem-solving).

Infine, le varie attività sono state accompagnate da discussioni e verbalizzazioni, substrato indispensabile per la fase di concettualizzazione e la costruzione di significati.[22]

Per quanto riguarda nello specifico le attività sulla trasformazione della materia descritte nella sezione precedente (**Scheda 1**), il problema è stato introdotto ai ragazzi attraverso un sondaggio sulle conoscenze spontanee. Dalle risposte fornite alla domanda 1 si evince che questo gruppo di alunni ha un'idea abbastanza consolidata del concetto di Trasformazione associato alle trasformazioni della materia, dal momento che soltanto 2 alunni classifica come trasformazione le opzioni *a* ed *f*. Dalle risposte alla domanda 2, che richiedeva un processo attivo essendo una domanda a stimolo chiuso ma a risposta aperta, possiamo notare che tre alunni non riescono a fornire nessun esempio, l'alunno 4 invece ripropone un esempio già fornito alla domanda 1, trascurando così parte della richiesta 2; di difficile classificazione sono le risposte degli alunni 2, 7 e 9, mentre gli altri riportano esempi riguardanti le trasformazioni della materia (meccaniche, chimiche, fisiche) o afferenti al mondo vivente (alunni 15, 16, 17).

In generale possiamo comunque sostenere che la quasi totalità della classe associa il concetto di Trasformazione alle trasformazioni della materia o degli esseri viventi. Questi risultati possono derivare essenzialmente da tre fattori: la proposta del sondaggio durante le lezioni di scienze; il tipo di attività effettuate in precedenza nel corso di scienze della scuola secondaria o nella primaria; l'età e di conseguenza le esperienze extra-scolastiche.

Ciò che invece risulta non ben definito ed è difficile trarre delle conclusioni è la percezione del tempo associato ad una trasformazione molto comune nella vita quotidiana come la dolcificazione di una tazzina di caffè (domanda 3 del sondaggio iniziale). E' evidente che le esperienze di quantificazione del tempo, in quanto grandezza, sono state esigue e raramente (o mai) associate direttamente al concetto di Trasformazione. Questo risultato ha giustificato la realizzazione delle attività I, II e III riportate nella **Scheda 1**.

Durante le attività successive gli alunni, ripetendo esperimenti già noti (formazione di soluzione acquose con sale o sciroppo alla frutta), hanno potuto fare esperienza diretta con la misura del tempo e, fatto di notevole importanza, rilevare quanto il mescolamento meccanico accelera il processo di solubilizzazione. Durante l'attività II, infatti, essi non avevano accessori per il mescolamento e hanno percepito sin dai primi minuti che la solubilizzazione può essere un processo molto lento, al punto che spazientiti hanno utilizzato ciò che avevano a disposizione (penne, matite) per mescolare i due liquidi.

Al termine del percorso gli alunni sono stati guidati dall'insegnante nel fare un confronto tra quanto avevano appreso di nuovo e alcune risposte-tipo riportate nel sondaggio iniziale. Questo momento è stato molto importante per stimolare la consapevolezza dell'ampliamento della propria mappa cognitiva.

L'attività III della **Scheda 1** è stata inserita perché consente di associare il concetto di tempo a una reazione chimica. Infatti, questa attività è stata anche il collegamento tra questa fase del percorso e la successiva (**Tabella 3**), con la quale a partire dall'esempio della formazione del caramello il "discorso sulle reazioni chimiche" è stato ampliato con altri esempi, quali le reazioni con cambiamenti di colore (in particolare quelle di indicatori acido-base) oppure le reazioni senza cambiamenti di proprietà percepibili con la vista (reazione tra polvere di marmo e soluzione acquosa di HCl, che richiede saggi ulteriori per l'identificazione dei prodotti).

Conclusioni

Su un piano generale, questo lavoro è stato strutturato con l'idea di sperimentare un percorso didattico integrato (o transdisciplinare) per le Scienze. Per realizzare questo obiettivo, è stato necessario basare il percorso su un concetto che, scavalcando i confini disciplinari, stabilisce una connessione tra le varie discipline, di per sé distinte. In altre parole si è cercato un concetto vitale secondo la definizione di E. Morin e in particolare è stato scelto quello di Trasformazione. Inoltre, poiché l'insegnamento delle Scienze nella scuola secondaria di 1° grado richiede proprio un'integrazione tra le varie discipline scientifiche, è stato naturale sperimentare un percorso del genere in questo ordine scolastico.

Da un punto di vista didattico, le attività presentate in questo articolo hanno consentito di sviluppare (se assente) il concetto scientifico di Trasformazione, o di consolidarlo in modo consapevole (se già presente), giungendo a un significato condiviso del termine e basato su osservazioni dirette, con speciale attenzione alle trasformazioni della materia.

Un altro aspetto significativo che si è cercato di realizzare con il lavoro nelle classi, è stato quello dello sviluppo delle proprie conoscenze e abilità attraverso la progettazione di esperienze su un problema condiviso; quando questo non è stato possibile, è stata scelta la via del sondaggio iniziale sulle conoscenze spontanee con discussione a posteriori.

Con particolare riferimento alle attività relative alle trasformazioni della materia, gli alunni hanno potuto fare esperienza diretta (e quindi rafforzare) il concetto di tempo, in quanto grandezza misurabile e concetto strettamente connesso a quello di Trasformazione e di equilibrio. Infatti, i risultati sulle conoscenze spontanee degli alunni hanno evidenziato una scarsa consapevolezza di quanto tempo e Trasformazione siano connessi.

I risultati ottenuti danno forza all'obiettivo dell'identificazione di alcuni principali concetti vitali per le discipline scientifiche. Un simile obiettivo è infatti auspicabile per arrivare a una più ampia progettazione di percorsi integrati e per rendere più agevole non solo la definizione di competenze standard per l'apprendimento delle Scienze, ma anche la concreta articolazione verticale dei curricula scolastici, in modo da favorire la cultura del pensiero scientifico.

Bibliografia

- [1] *Indicazioni per il curricolo per la scuola dell'infanzia e per il primo ciclo d'istruzione*, M.P.I., Roma 2007.
- [2] F. Cambi, *Saperi e competenze*, Editori Laterza, Roma 2006, p.58.
- [3] G. Bocchi, M. Ceruti, *Educazione e globalizzazione*, Raffaello Cortina Editore, Milano 2004, p. 19.
- [4] *Piano ISS: documento di base*, M.I.U.R., 2006.
- [5] Comitato scientifico del Piano ISS (a cura di), *Documenti di lavoro: seminario nazionale*, Milano 12-15 dicembre 2006, p.40; disponibili su http://www.museoscienza.org/scuole/progetti/iss/iss_2006_12_documenti_lavoro.pdf
- [6] P. Ambrogi, *Progetti, studi e rapporti internazionali per la formazione docente*, Annali della Pubblica Istruzione 2010 (in stampa).
- [7] The National Academies (a cura di). *National science education standards*, National Academy Press, Washington, 1996; Disponibile su <http://www.nap.edu>.
- [8] rif. [7], p.104.
- [9] E. Morin, *La testa ben fatta*, Raffaello Cortina Editore, Milano 2000.
- [10] rif. [9], p.111.
- [11] rif. [9], p.116.
- [12] rif. [9] p.121.
- [13] rif. [9], p.115.
- [14] G. Villani, *La chiave del mondo*, CUEN, Napoli 2001, p. 227-268.
- [15] P. Ambrogi, F. Carasso, D. Lanfranco, S. Ripoli, S. Saiello, *La trasformazione*, Annali della Pubblica Istruzione 2010 (in stampa).
- [16] P. Ambrogi, M. A. Floriano, E. Ghibaudi, *CnS*, 2010, **1**, 24-30.
- [17] rif. [14], p. 243-244.
- [18] C. Longo, *Didattica della Biologia*, La Nuova Italia – R.C.S. Libri S.p.A., Milano 1999, p. 1-19.
- [19] DD/SCI - Commissione curricula, *Indicazioni per il curricolo verticale di chimica*, 2008; disponibile su <http://www.didichim.org/>.
- [20] rif. [18], p. 8-9; 113-129.
- [21] rif. [7], p. 119.
- [22] P. Riani, *CnS*, 2008, **4**, 130-141.
- [23] S. Ripoli, *CnS*, 2008, **4**, 85-94.
- [24] F. Olmi, *CnS*, 2006, **4-5**, 2-13.
- [25] J. Bruner, *La cultura dell'educazione*, Feltrinelli, Milano 2007.
- [26] S. Ripoli, *SEMI: cominciamo con i fagioli*, 2008 – percorso validato dal Progetto Trio –Regione Toscana. http://eduscienze.areaopen.progettotrio.it/esperienza.asp?id_esp=98
<http://eduscienze.areaopen.progettotrio.it/index.asp>
- [27] C. Fiorentini, E. Aquilini, A. Testoni, D. Colombi, *CnS*, 2008, **4**, 47-61.

I FENOMENI CHIMICO-FISICI NEL PRIMO CICLO

ovvero

PRENDERE SUL SERIO I BAMBINI E INSEGNARE SCIENZE

Eleonora Aquilini, Leonardo Barsantini

ITIS “G.Marconi” Pontedera, IIS Balducci Pontassieve
ele.aquilini@tin.it - leomad@tin.it

“Non posso non studiare..sono troppo curiosa”

(Rachele, studentessa)

1. Lo scienziato come bambino non il bambino come scienziato

Si sente spesso dire che poiché bambini e scienziati mostrano curiosità per il mondo naturale e provano autentica gioia e soddisfazione dopo una scoperta, i bambini sono come gli scienziati. Le considerazioni riportate a questo proposito in Tuo figlio è un genio ci sembra possano chiarire le somiglianze e le differenze.

Vediamo alcune delle somiglianze: “Diversi psicologi dell’età evolutiva hanno recentemente proposto l’ipotesi che quel che fanno i bambini assomigli sorprendentemente a quel che fanno gli scienziati. I bambini creano e modificano teorie nello stesso modo in cui gli scienziati creano e modificano teorie. ... Noi pensiamo che alcuni degli strumenti usati da bambini e scienziati sono effettivamente gli stessi. Gli scienziati sono bambini grandi. Sono così bravi ad imparare perché usano le capacità cognitive che l’evoluzione ha progettato perché venissero usate dai bambini ... come i bambini hanno del mondo rappresentazioni, complesse, astratte, coerenti. Elaborano teorie. Le teorie traducono gli input – l’evidenza da essi raccolta - in rappresentazioni più astratte della realtà ... Inoltre le teorie vanno oltre l’evidenza su cui si basano. Vale a dire che mettono gli scienziati in grado di fare nuove predizioni su cose che non hanno mai visto, proprio come i bambini possono fare nuove predizioni mediante le loro rappresentazioni. Queste predizioni permettono agli scienziati, e ai bambini, di avere un influsso più efficace e incisivo sul mondo ...”¹

Vediamo ora le differenze sostanziali: “... Ma le contingenze storiche, circa cinque secoli fa, diedero a molti più adulti l’opportunità di conoscere il mondo. Inventammo istituzioni che ricreavano le condizioni dell’infanzia: tempo libero protetto e i giusti giocattoli. Sono queste istituzioni che chiamiamo scienza. Cinque secoli fa un’attività naturale dei bambini fu trasformata in un’attività di adulti organizzata a livello istituzionale. Naturalmente, questa trasformazione, determinò molte differenze fra quel che fanno i bambini e quel che fanno gli scienziati. Forse quella più importante è che i bambini inventano teorie su oggetti vicini, comuni, di medie dimensioni, compresi gli adulti. Di conseguenza sono letteralmente immersi nell’evidenza che riguarda le loro teorie. Tutto quello che hanno bisogno di sapere è alla loro portata. Al contrario gli scienziati spesso inventano teorie su oggetti che sono molto piccoli oppure molto grossi, nascosti o rari o irraggiungibili, come stelle lontane o malattie elusive, e l’evidenza relativa è spesso scarsa.”²

Inoltre si deve aggiungere che le teorie con le quali gli scienziati guardano il mondo sono di natura molto diversa da quelle del bambino o dell’adolescente. È la natura diversa delle teorie che fa la differenza, il loro grado di astrazione, la consapevolezza nel loro uso e nella loro scelta, gli oggetti d’indagine e di studio. Le teorie dello scienziato sono prodotti di elaborazione molto sofisticata e anche se bambini e scienziati “formulano teorie, fanno e verificano predizioni, cercano spiegazioni, compiono esperimenti e modificano quel che sanno alla luce della nuova evidenza”³ non possiamo concludere che i bambini siano scienziati.

Se ci si preoccupa di ciò che i bambini possono apprendere a scuola, se ci si vuol prendere cura di loro da questo punto di vista, occorre tenere presente che anche bambini più grandi dei neonati sono immersi nella concretezza e nell’evidenza che riguarda le loro teorie e solo mantenendo l’insegnamento sul piano della concretezza e dell’evidenza si riesce a raggiungere i bambini nel loro livello mentale di acquisizione e di rielaborazione. Proiettarli precocemente nel mondo astratto degli scienziati può significare accompagnarli verso un mondo senza significato.

Cosa vuol dire prendere sul serio i bambini?

Crediamo che i bambini abbiano il diritto di essere presi sul serio e che noi adulti abbiamo il dovere di farlo, sia come genitori che come insegnanti. Scrive Nicholas Humphrey, psicologo teorico,⁴ in un saggio del libro *Menti Curiose*:

1. A. Gopnik, A.N. Metzoff, P.Kuhl, *Tuo figlio è un genio*, Baldini & Castoldi, 2000, Milano, p.194-195.

2. J. Brockman, *Menti curiose*, Codice, 2005, Torino, p.199.

3. *Ibidem*, p.201

4. N.Humphrey, School Professor alla London School of Economics e professore di psicologia alla New School for Social Research. E’ conosciuto a livello internazionale per i suoi studi sull’evoluzione dell’intelligenza e della coscienza umane.

“Ciò che ho tratto dall’ambiente della mia infanzia è stata la sensazione di un diritto acquisito sul piano intellettuale: il diritto di fare domande, di esprimere curiosità, di provocare, di andare dove volevo in nome della conoscenza. Da ragazzo mi colpivano le parole stampate sulla prima pagina del mio passaporto inglese: la rivendicazione che il titolare dovesse <passare liberamente senza alcun impedimento>. Sono cresciuto con l’idea di possedere una simile autorizzazione per esplorare qualsiasi luogo scegliessi ... L’interesse nei confronti dei segreti della natura può muovere da basi svariate e differenti, ma nulla è paragonabile, ho il sospetto, alla sensazione di avere una sorta di diritto di signoria ancestrale”.⁵

Questa apertura verso la conoscenza, fino all’acquisizione della certezza di poter accedere a mondi ignoti a cui si è spinti dalla curiosità, con la certezza che gli altri, gli adulti, lo permettano, non è cosa da poco. Non è infatti scontato che la risposta degli adulti sia adeguata alla richiesta.

A scuola l’adeguatezza della risposta s’identifica con la qualità dell’insegnamento.

La comprensibilità della risposta, la capacità d’interagire con le conoscenze pregresse, costituiscono la base per generare nell’alunno altra curiosità che genera altre domande. Se anche le risposte successive s’innestano su un tessuto conoscitivo, si ha rielaborazione e costruzione di significati. Se si riesce ad andare non troppo al di là di quello che gli alunni possono comprendere e assimilare allora questo modo d’interagire contribuisce a rendere sicuri di sé gli alunni. Si passa infatti dalla percezione della possibilità d’imparare a quella del diritto d’imparare di cui parla Nicholas Humphrey. Infatti se si resta sul terreno dell’accessibilità cognitiva della risposta si sconfigge pian piano il meccanismo per cui, non si chiede perché tanto non si capisce. Quando le risposte non sono appropriate alla mente dei bambini allora dopo un po’ si rinuncia a chiedere e si rinuncia a capire. Questo genera sfiducia prima di tutto in se stessi.

La curiosità dei ragazzi è spesso genuina ma generica. Ad una curiosità generica l’insegnante deve dare una risposta specifica che tenga conto dell’età cognitiva degli alunni, non deve sbagliare. Nel caso delle scienze spesso e volentieri accade che nella scuola di base la risposta andando al di là della comprensibilità, magari affascina ma non costruisce nulla. È importante invece impostare il lavoro sull’utilizzo di percorsi motivanti che stimolino curiosità e attenzione, che abbiano per oggetto lo studio di fenomenologie semplici su cui ci si possa interrogare e su cui sia possibile dare risposte verificabili⁶. Occorre che il lavoro per stimolare nuovi perché, non sia casuale ma pensato, costruito, avendo come riferimento anche l’architettura di conoscenze che può essere in linea di principio degli alunni di una determinata età. Occorre tuttavia la flessibilità di cambiare rotta, di tornare indietro, di rispettare le individualità, di mettere in gioco anche se stessi nell’azione educativa di aiutare gli studenti a costruire una valida competenza scientifica.

2. In quali modi si può costruire conoscenza scientifica?

Scrive Alice Miller: “È un bisogno originario del bambino l’essere considerato (e preso sul serio) per quello che è di volta in volta e come centro della propria attività Con l’espressione < quello che il bambino è di volta in volta > intendo i sentimenti, le sensazioni e la loro espressione fin dai primi mesi di vita”.⁷

Non si può pensare che l’alunno mantenga intatta la sua capacità di sentirsi al centro della propria attività, di esserne padrone se l’insegnante lo redarguisce ad ogni errore, se l’insegnante parla e l’alunno ascolta, se le lezioni non prevedono il ruolo attivo dello studente, se l’unica cosa che interessa è lo sguardo attento. Il bambino si decentra e l’attività perde di significato. Quindi, i docenti devono riflettere sulle strategie didattiche più opportune.

A tal proposito, pensiamo che la metodologia delle cinque fasi⁸ sia particolarmente significativa, nell’ambito dell’insegnamento scientifico per la scuola di base, perché elimina il meccanismo perverso della “penalità” che segue allo sbaglio, perché fa sì che il lavoro nella scuola di base si sviluppi tramite definizioni operative che si costruiscono grazie al contributo di tutti gli alunni.

Vediamo nel dettaglio *la metodologia* proposta. Si parte con l’esperimento al quale segue la riflessione sull’esperienza (su quali contenuti e sul tipo di esperimento si dirà meglio nella sezione tre). Si descrive, si individuano somiglianze e differenze, si inizia a stabilire quella rete di connessioni che permetterà poi di giungere alla consapevolezza delle relazioni che caratterizzano un fenomeno. È fondamentale, in questa fase, che si scriva per mettere ordine nei pensieri, per passare da percezioni e considerazioni soggettive ad un primo tentativo di oggettivazione; non importa che si scriva bene dal punto di vista formale. Le considerazioni in questi scritti sono molto vicine al senso comune, le espressioni sono spesso dialettali e “familiari”, ma l’importante è che si colgano gli aspetti significativi del fenomeno descritto. Si mette ordine anche individuando le sequenze temporali dell’evento che si sta studiando. Segue poi la fase della discussione collettiva. Questo è il momento del confronto fra pari e con l’insegnante, che fa anche in modo di indirizzare la discussione verso un’elaborazione significativa delle osservazioni fatte. Ognuno qui confronta le proprie convinzioni, il suo modo di vedere, riconsidera e rielabora tenendo conto del parere degli altri. È importante sottolineare

5. J Brockman, Op.cit., p.11

6. C. Fiorentini “Quali condizioni per il rinnovamento del curricolo di scienze?” in *L’arcipelago dei saperi* (a cura di) Franco Cambi, Firenze, Le Monnier, 2000.

7. A. Miller, Op. cit., p.19

8. C. Fiorentini, *Il ruolo del laboratorio nell’insegnamento scientifico. Una proposta metodologica per il primo ciclo di istruzione*, Scuola e Didattica, 2005, n. 11, pp. 31-40.

I fenomeni chimico-fisici nel primo ciclo

are che tutte le idee hanno uguale diritto di cittadinanza, tutte possono essere messe in discussione da tutti. Nella discussione collettiva vince la ragionevolezza, la condivisione, il convincimento dopo prove ricorrenti.

La quarta fase è quella dell'affinamento della conoscenza che si traduce nella revisione della parte scritta: si corregge e si rivedono le proprie posizioni riscrivendo le frasi in modo aderente alle nuove acquisizioni. Non si parla di errori ma di interpretazioni diverse che sono oggetto di nuove ripensamenti e di nuove rielaborazioni per tutti.

La quinta fase è stata introdotta perché non tutti i bambini riescono a fare una sintesi scritta chiara dal punto di vista del contenuto con un linguaggio corretto. Allora l'insegnante, alla fine dell'attività che porta ad una conclusione condivisa, utilizzando tutto il materiale prodotto, fa una sintesi scritta che gli alunni trascrivono sul quaderno; in questo modo tutti i bambini hanno la definizione, conquistata in modo operativo, in una forma linguisticamente corretta.

La metodologia delle cinque fasi è un modo per raccontare ciò che si sta studiando e la narrazione è necessaria per *fare significato* in ambito scientifico. Le modalità di costruzione delle storie sono però diverse a seconda che ci si riferisca al ciclo primario o alla scuola secondaria superiore. Nella scuola di base si creano percorsi didattici in cui fenomenologie non troppo complicate dal punto di vista teorico vengono analizzate partendo da esperimenti sui quali è possibile discutere, fare ipotesi e ottenere conferme, giungendo a definizioni operative che sono la sintesi ovvero la conclusione a cui si è pervenuti. La definizione operativa è il frutto di più operazioni: si lavora manualmente sulle cose, si sviluppano ipotesi individuali e si confrontano con quelle degli altri, si esercita il pensiero logico, si elabora il linguaggio. Il risultato è costituito da una o più frasi linguisticamente corrette che riassumono il percorso didattico. Il procedimento è prevalentemente induttivo e porta a *generalizzazioni* che sono il frutto di astrazioni adeguate all'età degli alunni. La didattica laboratoriale per le scienze della scuola di base si concretizza quindi nella costruzione di definizioni operative. Quando successivamente si passa allo studio di leggi e teorie, allora le definizioni operative non sono più sufficienti a creare storie che tengano conto dei risultati a cui si è giunti in una determinata disciplina scientifica. Allora è necessaria una contestualizzazione storica ed epistemologica che ricostruisca gli ambiti teorici ed epistemologici in cui si è pervenuti ad una determinata convinzione scientifica. Si usa la storia della scienza per evidenziare i tratti cruciali, i nodi epistemologici che hanno portato alla elaborazione di una nuova teoria. In questo caso la *generalizzazione* è un concetto astratto lontano dal senso comune. Il procedimento logico non è induttivo. Fare percorsi didattici nei due ambiti di scuola è completamente diverso. Nonostante ciò il legame fra i diversi tipi di storie ci deve essere.

2. Una proposta di curricolo per i fenomeni chimico-fisici nel primo ciclo

I FENOMENI FISICO-CHIMICI

(lo spazio orario ipotizzato è il 50% di quello previsto per le scienze sperimentali)

SCUOLA PRIMARIA

1) DAGLI OGGETTI AI MATERIALI

IDENTIFICAZIONE E DESCRIZIONE DEGLI OGGETTI

- inizialmente conversazione libera
- successivamente indirizzata principalmente alle proprietà
- giochi con gli oggetti e le proprietà

CLASSIFICAZIONE DI OGGETTI IN BASE AD UNA O DUE PROPRIETA'

LE PARTI DI UN OGGETTO

I PRIMI CONFRONTI

- più alto di, il più alto di
- più pesanti di, il più pesante di
- più duro di, il più duro di

IDENTIFICAZIONE DI ALCUNI MATERIALI

- dato un oggetto, individuare i materiali
- dato un materiale, individuare gli oggetti
- il raggruppamento dei metalli e delle leghe
- alcune proprietà dei metalli: conducibilità del calore, lavorabilità, ecc.
- il ferro è uno dei metalli (utilizzo della calamita)

CLASSE TERZA

2) IL FENOMENO DELLA COMBUSTIONE

- 2.1** effettuazione e descrizione della combustione di alcuni materiali (carta, legno, ecc.)
- somiglianze e differenze
 - definizione del fenomeno
- 2.2** importanza dei combustibili nella vita quotidiana
- un combustibile artificiale: il carbone di legna
 - la combustione e l'inquinamento
 - la combustione e l'energia nella vita quotidiana

3) PROPRIETA' MACROSCOPICHE ED OPERATIVE

- 3.1**
- osservazione di polveri con e senza lente
 - riconoscimento di 3 sostanze: zucchero, sale, polvere di marmo
- 3.2 LA SOLUBILITA'**
- esperimenti di solubilizzazione in acqua
 - classificazione delle soluzioni
 - definizione operativa delle soluzioni
 - distinzione tra significato di senso comune e significato scientifico del termine solubile
 - spiegazione particellare della solubilizzazione

4) IL PESO

- 4.1** avendo a disposizione diversi oggetti, come si fa a stabilire chi è più pesante?
- costruzione di una bilancia a bracci uguali
- 4.2** si può anche constatare quanto pesa di più?
- quali oggetti si può usare come unità di misura per il peso?
- 4.3** unità di misura di peso convenzionali: grammo, chilogrammo, ecc.
- utilizzo di bilance a bracci uguali

CLASSE QUARTA

5) L'ACQUA

- 5.1**
- descrizione del riscaldamento dell'acqua
 - definizione del fenomeno dell'ebollizione dell'acqua
 - che cos'è il "fumo"?
 - la distillazione dell'acqua
 - l'acqua distillata
- 5.2** - le acque minerali
- 5.3**
- temperatura e calore nell'esperienza quotidiana
 - l'acqua bolle a 100 °C
 - che cosa sono le bolle che si formano durante l'ebollizione?
- 5.4**
- l'evaporazione dell'acqua
 - il "fumo" è vapore acqueo?
 - come mai il vapore acqueo non è visibile?
- 5.5** - dall'evaporazione di soluzioni si ottengono cristalli
- 5.6** - il ciclo dell'acqua

6) LIQUIDI E SOLIDI

- le proprietà più evidenti dei liquidi e dei solidi
- nei liquidi, quando li si versa, la superficie libera si dispone orizzontalmente
- se si inclina un bicchiere, come si dispone l'acqua contenuta?
- liquidi viscosi e polveri

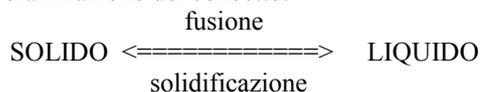
7) ORIZZONTALE E VERTICALE

- quale concetto hanno i bambini di orizzontale e verticale?
- come si dispongono gli alberi e le case in montagna?
- definizione operativa di verticale e di orizzontale; livella e filo a piombo

CLASSE V

8) LA FUSIONE E LA SOLIDIFICAZIONE

- la fusione del ghiaccio
- la solidificazione dell'acqua
- la fusione e la solidificazione della cera, della paraffina, dello stagno, ecc.
- generalizzazione del concetto:



9) IL VOLUME E LA CAPACITA'

- 9.1** - quando si travasa dell'acqua da un recipiente ad un altro di forma diversa, la quantità di acqua cambia o si conserva?
- con recipienti di forma diversa come si fa a stabilire chi contiene più acqua?
- 9.2** - come si fa a misurare un corpo liquido?
- si può misurare il peso
- si può misurare lo spazio occupato (il volume) per mezzo di recipienti più piccoli
- 9.3** il litro, i suoi sottomultipli e multipli:
- il cm^3 , il dm^3 , il m^3 e le loro relazioni

10) PESO E VOLUME A CONFRONTO

- seriazione sia in relazione al peso che al volume di
- oggetti di volume leggermente diverso e dello stesso materiale (o di materiali diversi)
- all'aumentare della temperatura, mentre il peso rimane inalterato, il volume aumenta
- durante la fusione, mentre il peso rimane inalterato, il volume aumenta
- il comportamento anomalo dell'acqua
- la conservazione della sostanza, del peso, del volume in semplici modificazioni di forma

SCUOLA SECONDARIA DI PRIMO GRADO

10) ASPETTI QUALITATIVI DELLA VELOCITA'

- il movimento
- la velocità
- la costruzione di grafici spazio-tempo
- prove di verifica
- approfondimento: costruzione e interpretazione di grafici

11) LE CLASSI DEGLI ACIDI, DELLE SOSTANZE BASICHE E DEI SALI

- gli acidi hanno la proprietà di sciogliere alcune sostanze insolubili in acqua, quali ad esempio il calcare ed alcuni metalli
- la distinzione tra acidi forti ed acidi deboli
- la distinzione tra le modalità di sciogliere degli acidi e dell'acqua
- la distinzione tra trasformazione fisica e chimica
- che cos'è l'effervescenza?
- la scoperta degli acidi minerali
- anche le proprietà basiche hanno la proprietà di sciogliere alcune sostanze insolubili in acqua
- alcune sostanze basiche
- la produzione del sapone
- la reazione di neutralizzazione tra acido cloridrico e soda
- la distinzione tra acidi e sostanze basiche

- la preparazione di un indicatore mediante estrazione con alcol del colore di fiori
- la cartina indicatrice universale
- la reazione di neutralizzazione tra acido cloridrico e soda
- l'estrazione della potassa dalla cenere

12) LE FORZE

- che cosa significa *forza*, *fare forza*, *essere forti*?
- fare raggruppamenti dei vari tipi di forza
- confronto di forze muscolari per mezzo di estensori
- deformazione di altri oggetti
- le deformazioni a che cosa sono dovute?
- gli effetti delle forze
- bilancia e forze: la forza-peso
- confronto di forze-peso
- misura di forze-peso

13) IL PESO SPECIFICO

- distinzione tra *pesante* ed *avere maggior peso*
- determinazione del peso specifico dell'acqua
- determinazione del peso specifico dell'olio
- determinazione del peso specifico solidi regolari
- determinazione del peso specifico di solidi irregolari
- significato del peso specifico
- prove di verifica

14) IL GALLEGGIAMENTO

- equilibrio
- principio di Archimede
- galleggiamento
- approfondimento
- prove di verifica

15) TEMPERATURA E CALORE

- determinazione della temperatura di fusione della naftalina la temperatura di fusione delle sostanze solide il ghiaccio fonde a 0 °C distinzione tra temperature e calore
- la costruzione di un termometro
- termometri non confrontabili e termometri confrontabili
- alcune scale di temperatura

16) PRIMI FENOMENI ELETTRICI

- cosa accade se si strofina una bacchetta di plastica con un panno di lana e si avvicina la bacchetta ad un piccolo frammento di carta cosa accade quando si avvicina una bacchetta di vetro?

- esistono due tipi di carica o più di due?
- l'attrazione e la repulsione si esercitano solo tra corpi elettrizzati?
- si può affermare che le cariche si possono spostare nei materiali?

17) PRIMI FENOMENI MAGNETICI

- la realizzazione di una tabella che permetta di distinguere tra materiali attratti dalla calamita ed altri
- prendendo due calamite ed avvicinandole che cosa si osserva?
- che cosa accade se si avvicina ad una bussola una calamita?
- che cos'è l'ago di una bussola?
- è possibile separare il polo nord di una calamita dal polo sud in modo da ottenere due poli isolati?

Il senso di questa proposta di curricolo è quello di affrontare alcuni fenomeni di ambito chimico- fisico cercando di porre le basi per le conoscenze disciplinari future. Esiste un'interazione costante fra i fenomeni studiati che dà significato al lavoro. Si pensi ai percorsi relativi ai solidi e ai liquidi, al peso, al volume e al peso specifico; lavorare a lungo su queste tematiche è fondamentale per una conoscenza delle grandezze in sé e per l'uso che se ne potrà fare successivamente. Capire, ad esempio, che il peso specifico è una caratteristica dei materiali che permette di classificarli come sostanze pure oppure no, capire che il galleggiamento è un gioco di forze, è fondamentale. Come esempio di questo lavoro, si riporta il percorso relativo a liquidi e solidi-fusione e solidificazione.

**PERCORSO DIDATTICO
LIQUIDI E SOLIDI
FUSIONE E SOLIDIFICAZIONE⁹**

1. Collocate su un banco alcuni corpi liquidi, quali ad esempio acqua, aceto, vino olio, ecc., ed alcuni corpi solidi, quali ad esempio, una matita, un sasso, una mattonella, una sbarretta metallica, una forchetta, ecc. Dopo aver chiesto ai bambini quali sono liquidi e quali sono solidi, chiedete loro di indicare le proprietà caratteristiche dei due raggruppamenti.

Ciascun bambino sarà in grado di annotare alcune delle proprietà più evidenti dei liquidi e dei solidi. Dalla discussione collettiva potrebbero emergere tutte le proprietà più significative. In questo caso non si ha come prima fase la sperimentazione, in quanto si può ritenere scontato che le proprietà più evidenti siano conosciute da tutti i bambini.

E' probabile che la maggior parte dei bambini sia in grado di indicare come proprietà caratteristiche dei liquidi e dei solidi le seguenti.

I **liquidi**: 1) hanno bisogno di un contenitore, 2) assumono la forma del contenitore, 3) si possono versare, 4) quando vengono versati, si spandono, scorrono, 5) si lasciano penetrare.

I **solidi**: non si lasciano facilmente penetrare, ne scalfire, ne disgregare (sono duri).

Nel caso in cui qualche bambino avesse ancora dopo la discussione dubbi su qualcuna di queste proprietà, è necessario effettuare alcune semplici esperienze. Si può, ad esempio, chiedere ai bambini: 1) di portare dell'acqua o un altro liquido, e degli oggetti solidi, 2) di collocare dentro bicchieri o becker oggetti solidi, 3) di inclinare sul banco i becker contenenti sia oggetti solidi che liquidi.

2. Probabilmente la proprietà dei liquidi di disporsi nei recipienti con la superficie libera in modo orizzontale non viene colta da nessun bambino. In questa eventualità, chiedete loro come è questa superficie, indirizzando la loro attenzione sia su liquidi già presenti in contenitori che su liquidi dopo averli versati in nuovi contenitori. I bambini osserveranno che la superficie è regolare, è piana, ma probabilmente non utilizzeranno il termine orizzontale.

⁹ L. Barsantini e C. Fiorentini (a cura di), *L'insegnamento delle scienze verso un curricolo verticale. I fenomeni chimico fisici*, I.R.R.S.A.E Abruzzo, S. Gabriele (TE), Editoriale Eco srl, 2001.

3. Collocate su un banco, a questo punto, un becker contenente dell'acqua e chiedete ai bambini di ipotizzare come si disporrà l'acqua se il becker venisse inclinato. Per essere sicuri che tutti comprendano senza ambiguità, effettuate l'operazione con un becker vuoto.

Fornite loro dei disegni schematici raffiguranti becker collocati su un tavolo in posizione normale ed inclinata. Chiedete loro di indicare la superficie libera.

E' probabile che la classe si divida in due raggruppamenti (o più): alcuni bambini avvanzeranno l'ipotesi corretta, altri indicheranno, invece, la superficie libera parallela alla base del recipiente.

E' fondamentale nella discussione collettiva far confrontare le spiegazioni addotte dai bambini dei due raggruppamenti; probabilmente emergerà la spiegazione corretta, quella che fa riferimento al **concetto di orizzontale**, che, cioè, la superficie libera non è parallela alla base del recipiente ma al piano di appoggio (al banco, al pavimento).

Mettete a confronto le ipotesi dei bambini con la realtà, inclinando il becker contenente acqua.

4. Nei manuali, dove generalmente la parte macroscopica degli stati della materia viene affrontata superficialmente, si trova la seguente definizione di liquido: i liquidi sono caratterizzati da volume proprio ma assumono la forma del recipiente che li contiene.

Questa definizione è evidentemente utile perché in modo lapidario indica due proprietà importanti dei liquidi che permettono di distinguerli sia dai solidi che dai gas. Ma come tutte le definizioni scientifiche, essa, per essere effettivamente compresa ed utilizzata in modo sensato, non può essere semplicemente enunciata, deve essere costruita: occorre prima individuare le proprietà caratteristiche dei tre stati della materia, confrontarli tra loro, diventare consapevoli delle molteplici caratteristiche distintive di ciascuno stato, e solo a questo punto è possibile comprendere quella definizione.

E' una definizione pregnante in un confronto a tre, in un confronto tra solidi, liquidi e gas. E' una definizione che presuppone la conoscenza approfondita della fenomenologia dei tre stati; è una sintesi raffinata ed astratta: in poche parole fornisce moltissime informazioni sui liquidi, ma implicitamente anche sui solidi e soprattutto sui gas: i liquidi hanno come i solidi volume proprio, ed assumono come i gas la forma dei recipienti. E' quindi psicologicamente insensato partire da questa definizione; essa può essere ricavata soltanto alla fine della scuola di base, dopo che è stata affrontata in modo adeguato la fenomenologia basilare dello stato gassoso. Riteniamo, inoltre, che questa definizione, somministrata in modo prematuro, sia responsabile del rinforzo della conoscenza erronea secondo la quale le polveri sono liquidi, come è stato evidenziato da molte ricerche sulle concezioni degli studenti.

Siamo partiti in questo percorso sui liquidi e sui solidi chiedendo ai bambini di indicare in un determinato campione di corpi, quelli liquidi e quelli solidi. Erano stati utilizzati corpi non problematici. Se fin dall'inizio fossero stati messi anche liquidi viscosi e polveri, l'attività di classificazione sarebbe risultata indubbiamente meno banale. Riteniamo didatticamente più adeguato prendere in considerazione anche questi casi meno ovvi dopo che sono state esplicitate le caratteristiche dei liquidi.

5. Collocate su un banco alcuni corpi liquidi, quali shampoo, miele liquido, olio lubrificante, olio di oliva, ecc., e polveri quali zucchero, sale, farina, carbonato di calcio, ecc. Chiedete ai bambini, scrivendo individualmente sul quaderno, di classificarli: quali sono liquidi, quali solidi, e quali appartengono ad altri eventuali raggruppamenti.

I liquidi viscosi, anche se all'inizio potrebbero suscitare delle perplessità poiché generalmente si utilizza l'acqua o liquidi simili ad essa, dovrebbero essere facilmente classificati tra i liquidi; è, infatti, facile constatare che hanno le cinque proprietà dei liquidi precedentemente individuate. Se dall'attività individuale e dalla discussione collettiva rimanesse delle perplessità, indirizzate i bambini ad effettuare il confronto delle proprietà.

Le maggiori difficoltà dovrebbero esserci per le polveri, poiché risultano avere alcune proprietà dei liquidi. Probabilmente la classe si dividerà in tre gruppi: vi sarà chi collocherà le polveri tra i liquidi, chi in un gruppo a sé, chi tra i solidi. Dalla discussione dovrebbero emergere le motivazioni che portano ad identificare le polveri come solidi.

Non possono essere liquidi perché non hanno tutte le proprietà dei liquidi: quando sono versate non scorrono, e quando sono versate in un altro contenitore non si dispongono spontaneamente con la superficie libera orizzontale. Ma potrebbero essere una classe a sé, perché all'apparenza non hanno neppure nessuna proprietà dei solidi. Ma se l'attenzione viene rivolta su ciascun granello di una polvere, esso ha tutte le caratteristiche di un solido.

Questa consapevolezza può essere rinforzata mostrando la genesi di alcune polveri facendo frantumare dai bambini, in pezzi di diversa consistenza, del sale grosso, del marmo, del gesso, dei chicchi di grano, granoturco, fagioli, ecc.

6. Fusione e solidificazione

La fusione e la solidificazione sono trasformazioni abbastanza elementari, ma anche in questo caso pensiamo che il bambino di 10-11 anni non abbia un'idea adeguata del fenomeno, benché si sia già imbattuto in diversi esempi di fusione e di solidificazione.

Attrezzatura e materiale occorrente:

- alcuni becker da 250 cc e da 50 cc., bacchette di vetro, provetta, piastra elettrica, bilancia
- ghiaccio, acqua, burro, cera, paraffina, stagno, piombo.

La fusione del ghiaccio e la solidificazione dell'acqua

Tutti i bambini conoscono il ghiaccio, lo trovano in frigorifero e lo utilizzano per raffreddare le bevande; ma quanti bambini hanno consapevolezza della relazione tra acqua e ghiaccio?

a) Mettete 2-3 cubetti di ghiaccio in ciascuno di 2 becher da 250 cc. Riscaldate uno dei 2 recipienti con una piastra elettrica e lasciate l'altro a temperatura ambiente.

Dopo che i bambini hanno osservato, chiedete loro: "che cosa è successo?"

b) Successivamente, collocate i due recipienti contenenti l'acqua ricavata dal ghiaccio nella ghiacciaia di un frigorifero; dopo un po' di tempo fate osservare e chiedete di nuovo ai bambini: "che cosa è successo?"

c) Dall'osservazione e dal confronto degli esperimenti precedenti, i bambini possono trarre le seguenti conclusioni:

- il ghiaccio, quando viene riscaldato o lasciato a temperatura ambiente, si trasforma in acqua;
- l'acqua, quando viene raffreddata sufficientemente, si trasforma in ghiaccio.

Chiedete agli alunni di ipotizzare che cosa succederebbe se le esperienze precedenti venissero ripetute. Essi sono in grado di comprendere che è possibile trasformare l'acqua in ghiaccio ed il ghiaccio in acqua quante volte si vuole (se fosse necessario ripetete le esperienze precedenti):

ghiaccio \rightleftharpoons acqua

Una trasformazione di questo tipo viene definita **reversibile**.

- l'acqua ed il ghiaccio sono la stessa sostanza, ora allo stato liquido ed ora allo stato solido: acqua liquida e acqua solida.

La trasformazione da ghiaccio ad acqua viene denominata **fusione**, e quella inversa **solidificazione**

fusione
 ghiaccio \rightleftharpoons acqua
 solidificazione

Anche in questo caso vi sono termini della vita quotidiana fuorvianti. Tutti, in riferimento alla trasformazione del ghiaccio o della neve in acqua, affermiamo che essi si sono sciolti. Dovremmo invece dire che si sono fusi, perché il termine sciogliersi si riferisce alla solubilizzazione (ad esempio del sale in acqua).

d) Chiedete infine ai bambini da che cosa dipende che l'acqua sia solida o sia liquida.

Nelle esperienze precedenti hanno osservato che il ghiaccio diventa acqua quando viene riscaldato, e l'acqua diventa ghiaccio quando viene raffreddata, quando, cioè, acquista o perde calore:

+ calore
 ghiaccio \rightleftharpoons acqua
 - calore

Chiedete ai bambini: "come può il ghiaccio, lasciato a temperatura ambiente, diventare acqua; dove prende il calore necessario?"

Questa trasformazione si verifica sempre, oppure no ?

Il ghiaccio fonde, ricevendo del calore dall'ambiente, quando l'ambiente è più caldo (quando cioè, la temperatura dell'ambiente è superiore alla sua).

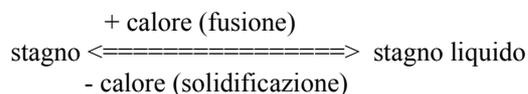
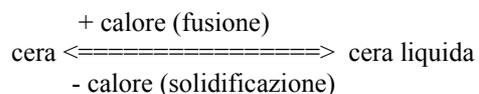
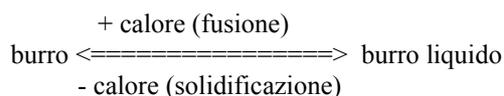
La fusione e la solidificazione della cera della paraffina, del burro, dello stagno e del piombo

7. Riscaldate su una piastra elettrica 3 becker da 50 cc., contenenti rispettivamente 2 cucchiaini di burro, cera e paraffina, e 2 capsule contenenti delle quantità equivalenti di stagno e piombo. Che cosa si osserva?

Lasciateli raffreddare e chiedete ai bambini di osservare che cosa accade ai cinque materiali. Se i bambini lo richiedono, versate i materiali fusi in altri contenitori.

I bambini, con queste esperienze, sono in grado di comprendere che i 5 materiali si comportano come il ghiaccio e l'acqua, cioè, che essendo solidi si trasformano per riscaldamento in liquidi, e che questi, poi per raffreddamento ritornano solidi.

I fenomeni chimico-fisici nel primo ciclo

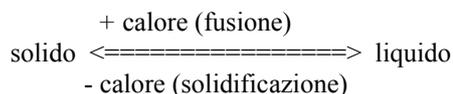


Mentre per l'acqua, il termine acqua viene riferito all'acqua liquida, venendo l'acqua solida denominata ghiaccio, per questi materiali si utilizza lo stesso termine, seguito dall'aggettivo indicante lo stato solido o lo stato liquido.

8. Vi è qualche differenza significativa nei solidi prima e dopo la fusione-solidificazione?

Gli esperimenti precedenti possono suggerire un modo in cui è possibile trasformare polveri in solidi compatti?

9. La fusione e la solidificazione possono essere effettuate con molti altri materiali. Conseguentemente i termini *fusione* e *solidificazione* vengono indicati per indicare, in generale, il passaggio da solido a liquido e da liquido a solido:



Crediamo che questo sia un modo di lavorare che prenda veramente sul serio i bambini con le loro individualità, con la loro affettività, con il loro bisogno costante “di stare al centro” e che faccia acquisire col tempo *la certezza del diritto di fare domande, di esprimere curiosità, di provocare, di andare dove si vuole in nome della conoscenza.*