

C_nS

La Chimica nella Scuola

n. 1 anno 2024



**Atti del Convegno 2023
della Divisione di Didattica
della Società Chimica Italiana**



Società Chimica Italiana

DIRETTORE ONORARIO

Gianluca Farinola

COMITATO EDITORIALE

Direttore: Margherita Venturi

Vice-direttori: Eleonora Aquilini, Giovanni Villani

COMITATO DI REDAZIONE

Eleonora Aquilini, Luigi Campanella, Giorgio Cevasco,
Marco Ciardi, Valentina Domenici, Maria Funicello,
Silvano Fuso, Elena Ghibaudi, Elena Lenci, Anna Maria Madaio,
Raffaele Riccio, Antonella Rossi, Antonio Testoni,
Francesca Turco, Mariano Venanzi, Margherita Venturi,
Giovanni Villani, Roberto Zingales

COMITATO SCIENTIFICO

Presidente: Luigi Campanella

Vincenzo Balzani, Agostino Casapullo, Carlo Fiorentini



ISSN: 0392-8942

REGISTRAZIONE: 03/05/1996 n. 219 presso il Tribunale di Roma.

PERIODICITÀ: Bimestrale

Indice

Editoriale

Atti del Convegno 2023 della Divisione di Didattica della Società Chimica Italiana	1
Margherita Venturi	

Scuola Secondaria di primo e secondo grado

Le parole e i concetti nella costruzione del curriculum verticale di chimica... Eleonora Aquilini	3
Chimica, Materiali e Sostenibilità	12
Teresa Cecchi	
Ripensando l'equazione di reazione	26
Alfredo Tifi	

Scuola Primaria e insegnamenti di Fondamenti e Didattica della Chimica c/o Scienze della Formazione Primaria (SFP)

Chimica e Sostenibilità: un gioco da ragazzi!	37
Francesca Deganello, Maria Luisa Testa, Alberto Zanelli, Riccardo Lucentini, Andrea Ienco, Massimo Calamante, Claudia Vineis, Alessio Varesano, Armida Torreggiani	
Pioggia e acqua	48
Mauro Icardi	

Università, formazione docenti, orientamento, PLS

La nuova edizione del Piano Lauree Scientifiche	52
Ugo Cosentino	

Competenze e formazione STEM come motore della competitività: l'esperienza di Federchimica, federazione nazionale dell'industria chimica	59
Federchimica	
Didattica della Chimica: un'esperienza all'Università di Parma	64
Dominga Rogolino	
L'utilità di un approccio integrato nella didattica della chimica	71
Valentina Domenici	
Il Sistema Periodico di Primo Levi come spunto di percorsi didattici interdisciplinari	81
Maria Funicello e Lucia Chiummiento	
Insegnare chimica con passione tra i banchi di scuola	89
Alessandra De Togni, Lucia Giuffreda e Laura Orian	
La formazione degli insegnanti come motore dell'innovazione	100
Mariano Venanzi	
Processi cognitivi e apprendimento della chimica: uno studio pilota sulla popolazione universitaria a sviluppo tipico	110
Francesca De Vita, Stefania Bufalino, Elena Ghibaudi, Renato Lombardo, Antonella Maria Maggio, Anna Maria Re, Barbara Sini	
Insegnare chimica fisica con dashboard sviluppate in Python	119
Renato Lombardo	
Un corso innovativo in cui Chimica e Scienza della Complessità preparano le nuove generazioni ad affrontare le sfide globali del XXI secolo	128
Pier Luigi Gentili	
Perché gli studenti universitari decidono di abbandonare gli studi?	137
Italo Testa, Silvia Galano e Oreste Tarallo	

Storia e fondamenti della Chimica per la didattica

I contributi di J. N. Brønsted e di T. M. Lowry alla definizione di acidi e basi	148
Franco Calascibetta	
Il simbolismo chimico come interpretazione unificante del mondo materiale scientifico moderno	157
Giovanni Villani	
Il ruolo dell'entropia come descrittore fenomenologico delle reazioni chimiche	164
Alessandro Motta	
Una pagina di Storia della Chimica per la Didattica: lo sviluppo della teoria molecolare della capillarità	174
Vincenzo Villani	

**Atti del Convegno 2023
della Divisione di Didattica
della Società Chimica Italiana**

Margherita Venturi

Cara lettrice e caro lettore,

ho voluto dedicare il primo numero della nostra rivista di quest'anno al Convegno della Divisione di Didattica della Società Chimica Italiana, che si è tenuto dal 15 al 17 giugno 2023 nella splendida cornice di Salerno e che ha avuto il piacere di ospitare l'intervento del Presidente della SCI, prof. Gianluca Farinola, testimonianza della sua attenzione per le attività della Divisione di Didattica.



**CONVEGNO DELLA DIVISIONE DI DIDATTICA DELLA
SOCIETÀ CHIMICA ITALIANA**

Salerno 15 – 17 giugno 2023

Grand Hotel Salerno

Lungomare Clemente Tafuri 1



Questa scelta è stata motivata dal fatto che i contributi presentati al Convegno hanno coperto diversi e interessanti aspetti per chi legge il CnS: esperienze, riflessioni, discussioni di problematiche relative alla didattica della chimica nei differenti livelli di formazione (scuola primaria, secondaria di I e II grado e università) e all'approfondimento di risvolti relativi alla storia della chimica per la didattica (in collaborazione con il Gruppo Nazionale Fondamenti e Storia della Chimica). In particolare, la sessione dedicata alla scuola primaria è

stata l'occasione per discutere e valorizzare l'esperienza degli insegnamenti di Fondamenti e Didattica della Chimica attivi presso i corsi di laurea in Scienze della Formazione Primaria, mentre la sessione relativa all'università ha ospitato anche interventi relativi al tema della formazione dei docenti, del Piano Lauree Scientifiche e dell'orientamento scolastico e universitario.

Ho, pertanto, suddiviso i contributi, che i partecipanti mi hanno inviato, seguendo lo schema e le sessioni del Convegno stesso:

- Scuola Secondaria di primo e secondo grado
- Scuola Primaria e insegnamenti di Fondamenti e Didattica della Chimica c/o Scienze della Formazione Primaria (SFP)
- Università, formazione docenti, orientamento, PLS
- Storia e fondamenti della chimica per la didattica

Sono sicura che leggendo i contributi troverai molto spunti per il tuo lavoro in classe, per motivare i tuoi studenti e, forse, anche per aggiungere qualche aspetto nuovo nel tuo insegnamento.

Buona lettura

Margherita

Le parole e i concetti nella costruzione del curriculum di chimica

Eleonora Aquilini

Presidente della Divisione di Didattica della SCI

e-mail: ele.aquilini6@gmail.com

Abstract. The transition from common sense concepts to scientific concepts in school requires careful consideration of what and how to teach at different levels. Language must accompany the evolution of scientific concepts, so that the scientific language is not perceived as abstract and incomprehensible words. In chemistry, the word “acid” is often taken as an example of this conceptual transformation.

Keywords: concetti scientifici; acidi; linguaggio

1. Introduzione

Affrontando il problema del linguaggio vorrei iniziare da una definizione semplice, data da alunni di una scuola molto particolare, quella di Barbiana [1]:

La lingua poi è formata dai vocaboli d'ogni materia. Per cui bisogna sfiorare tutte le materie un po' alla meglio per arricchirsi la parola. Essere dilettanti in tutto e specialisti solo nell'arte del parlare.

Questa osservazione traduce in realtà in maniera ottimale la trasversalità del linguaggio rispetto alle varie discipline, soprattutto nella scuola di base, dove le discipline non devono istruire degli specialisti, ma devono solo formare gli individui per essere cittadini capaci di capire e farsi capire. Del resto, anche Gramsci, come ci ricorda De Mauro, aveva sottolineato la connessione tra linguaggio e formazione [2]:

Gramsci [...] non dimentica mai d'insegnarci che è il linguaggio, quale luogo di conoscenza, espressione, interazione, è il linguaggio, il terreno su cui da alcune decine di millenni si gioca la grande partita che degli umani fa, quando la vincono, esseri pienamente capaci di senso e di storia. Ed è l'educazione, è la scuola lo spazio in cui nelle società anche appena sviluppate, singoli e ceti possono farsi classe

e vincere quella diuturna partita sibi et alienis. Questo, penso, leggeva e ha spinto a leggere in Gramsci don Milani.

Ma restiamo a Gramsci; le sue osservazioni, infatti, ci tornano utili per definire uno dei termini dell'argomento che dobbiamo affrontare, quello di 'senso comune' [3]:

Ogni strato sociale ha il suo 'senso comune' e il suo 'buon senso', che sono in fondo la concezione della vita e dell'uomo più diffusa. Ogni corrente filosofica lascia una sedimentazione di 'senso comune': è questo il documento della sua effettualità storica. Il senso comune non è qualcosa d'irrigidito e d'immobile, ma si trasforma continuamente, arricchendosi di nozioni scientifiche e di opinioni filosofiche entrate nel costume. Il 'senso comune' è il folclore della filosofia e sta sempre di mezzo tra il folclore vero e proprio (cioè comunemente inteso) e la filosofia, la scienza e l'economia degli scienziati.

2. Il passaggio dai concetti di senso comune ai concetti scientifici

A scuola il passaggio dai concetti di senso comune ai concetti scientifici è, parafrasando Koyré, un passaggio dal mondo del pressappoco all'universo della precisione. Ci vuole lentezza nel modo di insegnare per promuovere la crescita dei concetti insieme al linguaggio. Ci sembra illuminante quanto scrive lo stesso Koyré a proposito dell'alchimia, chiedendosi se all'uomo del Medioevo e del Rinascimento mancassero solo gli strumenti di misura e il linguaggio per appartenere al mondo della precisione [4]:

Ci si può domandare tuttavia se questa doppia carenza non si spieghi proprio con la mentalità caratteristica, con la struttura del "mondo del pressappoco". Ora, a questo riguardo, mi sembra che il caso dell'alchimia ci fornisca la risposta decisiva. In effetti nel corso della sua esistenza millenaria, essa, sola fra le scienze delle cose terrestri, è riuscita a costruirsi un vocabolario, una notazione e anche un'attrezzatura, di cui la nostra chimica ha conservato l'eredità. Essa ha accumulato tesori di osservazioni, ha compiuto migliaia di esperienze, ha anche fatto scoperte importanti. E tuttavia non è mai riuscita a fare un'esperienza precisa: questo perché non l'ha mai tentata. Le descrizioni delle operazioni alchimistiche non hanno niente in comune con le formule dei nostri laboratori: sono ricette di cucina, imprecise, approssimative, qualitative come quelle. E non è l'impossibilità materiale di eseguire le misure che arresta l'alchimista, egli non se ne serve, anche quando le abbia a portata di mano. Non gli manca il termometro, ma l'idea che il calore sia suscettibile di misura esatta. Così egli si accontenta dei termini di senso comune: fuoco vivo, fuoco

lento, ecc., e non si serve quasi mai della bilancia. Eppure la bilancia esiste; anzi essa -quella degli orafi e dei gioiellieri- è relativamente precisa. È appunto questa la ragione per cui l'alchimista non ne fa uso. Se egli la usasse, sarebbe un chimico. Anzi, perché egli avesse idea di farne uso, bisognerebbe che già lo fosse.

Passare da una conoscenza di senso comune che è approssimativa, che *non conta e non misura*, a una conoscenza scientifica, che dà un peso ai fenomeni sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo, è un'operazione che comporta un'organizzazione del curriculum diversa da quella usuale, basata solo sulle sequenze disciplinari stabilite dall'università.

Nel primo ciclo è indispensabile soffermarsi prevalentemente sugli aspetti qualitativi dei fenomeni, mentre nel secondo ciclo è importante privilegiare gli aspetti quantitativi collegati spesso a leggi e teorie della chimica.

È fondamentale conoscere i fenomeni, farsene una rappresentazione mentale, descriverli e interpretarli usando parole. Le parole devono essere semplici e appropriate ed esprimere dei concetti.

A tal proposito, pensiamo che *la metodologia delle cinque fasi* [5] sia particolarmente significativa, nell'ambito dell'insegnamento scientifico per la scuola di base, anche 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'esperienza al quale segue la riflessione sull'esperienza (su quali contenuti e sul tipo di esperienza 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 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 nuovi 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 a 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 di secondo grado. 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.

Il modello metodologico-relazionale proposto si rifà ai quattro grandi della psicologia dell'educazione del ventesimo secolo: Dewey, Piaget, Vygotskij e Bruner. Per quanto concerne il ruolo del linguaggio nell'apprendimento ci sembra importante rilevare la grande importanza del contributo vygotkiano e, in particolare, del linguaggio scritto nello sviluppo della presa di coscienza, nell'acquisizione della conoscenza, nello sviluppo del pensiero.

Possiamo imparare, con questa modalità, argomenti che riguardano i passaggi di stato, le soluzioni, acidi, basi e sali, parole e concetti importanti per la chimica.

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 all'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.

3. Il caso degli acidi nel curriculum verticale nella scuola secondaria di primo e secondo grado

Nel primo ciclo è fondamentale lavorare sul concetto di trasformazione attraverso lo studio di fenomenologie comprensibili. Le trasformazioni definite a scopo didattico, come fisiche e chimiche, sono una componente essenziale delle conoscenze di base della chimica. Ci sembra significativo esemplificare con lo sviluppo del concetto di acido, come sia possibile costruire l'idea di trasformazione in chimica [6]. Le trasformazioni chimiche permettono di ottenere sostanze diverse dai reagenti. In altre parole, l'acqua "scioglie" il sale da cucina, si ottiene una soluzione e da questa si può riottenere, per evaporazione, il sale stesso. L'acido cloridrico "scioglie" il carbonato di calcio, insolubile in acqua, ma la sostanza che si ottiene, per evaporazione, non è più carbonato di calcio. Lo si capisce perché questa nuova sostanza è solubile in acqua. Ci si chiede allora se gli acidi "sciogliono" tutte le sostanze insolubili in acqua. Dalle diverse prove che vengono fatte con varie sostanze, come metalli e altri sali, si comprende che non è così. Il rame, ad esempio, non viene solubilizzato dall'acido cloridrico e invece forma una soluzione con l'acido nitrico. Questo punto viene approfondito nel biennio della scuola secondaria di secondo grado, come si illustrerà di seguito. La classe delle sostanze basiche e quella dei sali vengono poi trattate con lo stesso approccio. Questo percorso operativo sul concetto di acido, che è incentrato sull'acquisizione del concetto di trasformazione in chimica, comporta una *trasformazione* del linguaggio: la parola di senso comune "sciogliere" diventa "solubilizzare" e viene distinta da "fondere"; si acquisiscono operativamente parole come soluzione, soluto, solvente e poi miscuglio eterogeneo ed omogeneo. I concetti si definiscono insieme al linguaggio.

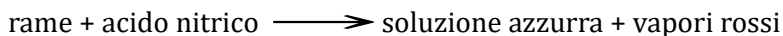
Nel biennio, dopo avere compreso il significato della gerarchia compositiva di Lavoisier (Figura 1), in cui i metalli si trasformano in ossidi (calci metalliche) quando reagiscono con l'ossigeno e i non metalli (i combustibili) diventano acidi reagendo sempre con l'ossigeno, si può affrontare il problema dell'acido nitrico che reagisce con il rame [7].



Figura 1. La gerarchia compositiva di Lavoisier

L'esperimento e la spiegazione che fornisce Lavoisier è un'interpretazione congruente con la sua teoria che ha un grande valore didattico.

Consideriamo la reazione:



Se viene realizzata raccogliendo i vapori in un bagno pneumatico (Figura 2), questi vapori non sono rossi, ma incolori. Non si ha nessuna modifica dell'indicatore (ad esempio, rosso metile) aggiunto nell'acqua del bagno pneumatico.



Figura 2. La raccolta in bagno pneumatico dei vapori derivanti dalla reazione tra rame e acido nitrico

In base alla sua teoria sulla composizione dell'aria, Lavoisier riteneva che l'ossigeno si combinasse con i vapori incolori per dare poi vapori rossi. Que-

sta ipotesi può essere verificata facendo reagire il gas incolore raccolto con il bagno pneumatico con l'ossigeno, ottenuto ad esempio per decomposizione dell'acqua ossigenata con diossido di manganese (Figura 3).

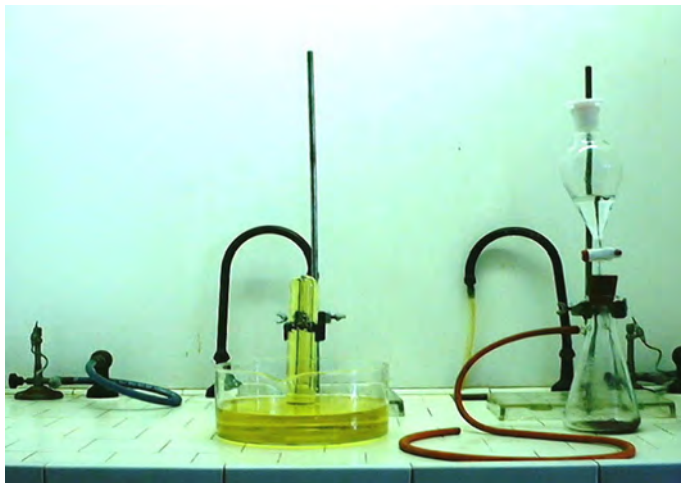


Figura 3. Il dispositivo necessario alla generazione di ossigeno dalla reazione di diossido di manganese e acqua ossigenata (a destra nella foto)

Collegando il tubo di gomma sotto il cilindro contenente il gas incolore, si osserva che esso combinandosi con l'ossigeno, diventa bruno (Figura 4). Pian piano i vapori rossi scompaiono e aumenta l'acidità del liquido, acidità evidenziata dal cambio di colore dell'indicatore. Lavoisier confermò la presenza di acido nitrico nell'acqua, neutralizzando la soluzione con idrossido di sodio e verificando che il sale ottenuto era nitrato di sodio.

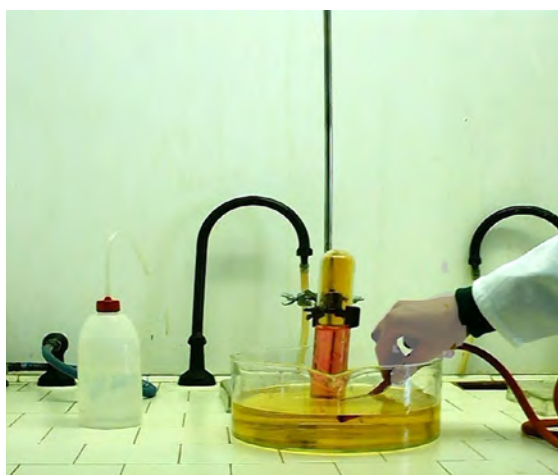


Figura 4. La reazione tra il gas incolore e l'ossigeno, con la comparsa del colore bruno

Si può schematizzare così la reazione, secondo l'interpretazione di Lavoisier: il rame "prende" l'ossigeno dall'acido nitrico, diventando ossido di rame. L'acido nitrico riacquista l'ossigeno che ha perduto dall'aria diventando aria nitrosa. In acqua l'aria nitrosa diventa l'acido nitrico che reagisce con l'ossido di rame, diventando nitrato di rame (Figura 5).

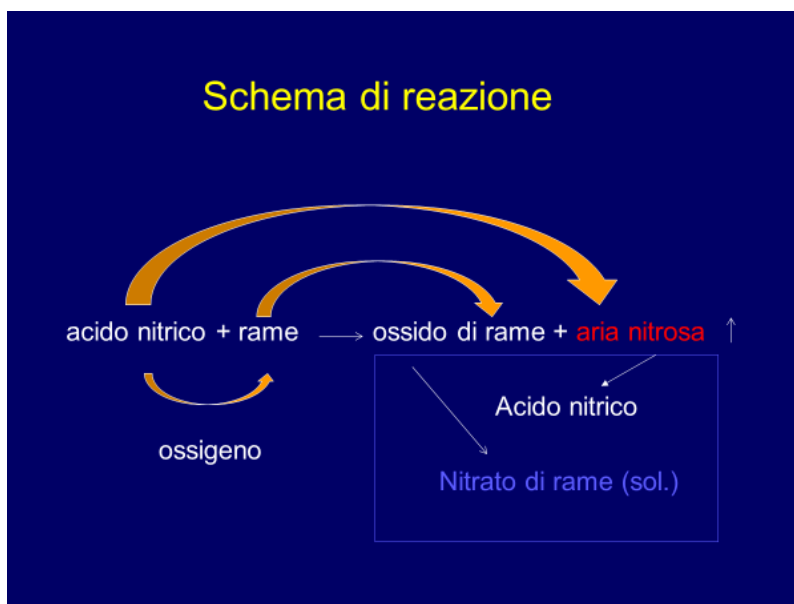


Figura 5. Lo schema di reazione complessivo secondo Lavoisier

Scaldando la soluzione azzurra si ottiene il sale, il nitrato di rame verde. Continuando il riscaldamento e collegando la beuta con un bagno pneumatico si ottiene una polvere nera (ossido di rame) e vapori rossi.

La reazione di discioglimento del rame con l'acido nitrico è un esempio di coerenza interpretativa dei dati sperimentali sulla base di una teoria. Il meccanismo di reazione che viene proposto è alla portata degli alunni del biennio e introduce al concetto di ossido-riduzione in modo operativo e non come conseguenza di reazioni a cui dei numeri, percepiti come magici, aumentano e diminuiscono senza ragione.

4. Conclusioni

Il senso di lavorare secondo uno sviluppo verticale del curricolo è, dal mio punto di vista, costruire concetti importanti per la disciplina di interesse, nel nostro caso la chimica, avendo come punto focale la capacità di comprendere gli argomenti trattati da parte degli studenti. Il cammino viene tracciato avendo come guida lo sviluppo storico dei concetti stessi e la loro evoluzione. I concetti crescono insieme al linguaggio che è così ricco di contenuti. Nel passaggio

dai concetti di senso comune a quelli scientifici le parole diventano sempre più astratte, ma il loro significato è rintracciabile nelle teorie di riferimento che sono una miniera di tesori che riflettono nelle parole il loro segreto splendore.

Riferimenti

- [1] Scuola di Barbiana, *Lettera a una professoressa*, Libreria Editrice Fiorentina, Firenze, 1969.
- [2] T. De Mauro, *Prima persona singolare passato prossimo indicativo*, Bulzoni, Roma, 1998, p. 158.
- [3] A. Gramsci, *Quaderni del carcere*, Einaudi, Torino, 1977, p. 2271.
- [4] A. Koyré, *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, Einaudi, Torino, 1999, pp. 98 - 99
- [5] C. Fiorentini, Il ruolo del laboratorio nell'insegnamento scientifico. 2 Una proposta metodologica per il primo ciclo di istruzione, *Scuola e Didattica*, 2005, n. 11, pp. 31 - 40.
- [6] C. Fiorentini, *Rinnovare l'insegnamento delle scienze*, Aracne, Roma, 2018, pp. 302-304.
- [7] C. Fiorentini, E. Aquilini, A. Testoni, D. Colombi, *Leggere il mondo oltre le apparenze*, Armando, Roma, 2007.

Chimica, Materiali e Sostenibilità

Teresa Cecchi

ITT "G. e M. Montani", Fermo

e-mail: cecchi.teresa@istitutomontani.edu.it

Abstract. Sustainability is one of the most used words in communication and perhaps it is sometimes abused. It is certainly unachievable without the chemical skills necessary for the transition from the linear economy (plunder, consume, throw away) to the circular one (recovery, transform, reuse), that is the cornerstone of the ecological transition. The laboratory teaching practice is renewed by taking inspiration from the 17 objectives of the 2030 Agenda. Making students aware of the key role of chemistry in harmoniously attending to the planet, profit and people is fully a civic education action.

Keywords: CLIL; green HPLC; depolimerizzazione del PLA; struccante da scarti alimentari; scale-up industriale; SDGs

1. Introduzione

Sostenibilità è una parola che ha invaso le nostre vite, molto usata e spesso abusata.

L'etimologia di questa parola è illuminante. In latino *sustĭnĕre* significa "reggere, sostenere, sopportare". La descrizione esatta di un futuro sostenibile non è semplice; il 1972 rappresenta una pietra miliare: alla conferenza dell'ONU sull'Ambiente Uomo tenutasi a Stoccolma, l'intera comunità internazionale ha concordato sul concetto fondamentale che sviluppo e ambiente possono essere gestiti in modo reciprocamente vantaggioso. Nello sviluppo storico del concetto di Sostenibilità dobbiamo compiere due balzi in avanti di 20 anni per fare tappa nel 1992 alla conferenza dell'ONU a Rio de Janeiro con la formulazione dell'Agenda 21 e arrivare al 2012 alla conferenza ONU sulla Sostenibilità. Solo tre anni dopo, il 25 settembre 2015, l'ONU definisce nell'Agenda 2030 i 17 obiettivi (SDGs), dettagliati in 169 target, da raggiungere entro il 2030 per garantire al nostro pianeta e alla struttura sociale dell'umanità la piena Sostenibilità. Un sistema è sostenibile se può essere mantenuto a un certo livello indefinitamente. Affinché ciò accada gli aspetti ambientali, sociali ed economici debbono

essere considerati e correttamente gestiti. I tre pilastri della sostenibilità adeguano quindi il concetto stesso di profitto (“bottom line”): per ogni linea produttiva sostenibile serve scrivere una “Triple bottom line: Planet, People, Profit” [1].

La sostenibilità è destinata a non essere praticata senza le variegate competenze chimiche necessarie per il passaggio dall’economia lineare, che segue lo schema “depredo, consumo, uso e getto” a quella circolare, caratterizzata invece dalla strategia “recupero, trasformo, riutilizzo, restituisco alla biosfera”. Le pratiche sostenibili diventano il perno della transizione ecologica e digitale.

Il presente contributo illustra attività didattiche concrete, ispirate dai 17 obiettivi di sviluppo sostenibile dell’Agenda 2030 e dalle strategie dell’economia circolare; sono interessate tutte le tre discipline che caratterizzano il corso dell’articolazione Chimica e Materiali presso un Istituto Tecnico Tecnologico; l’approccio didattico è l’Inquiry based learning (Ask, Investigate, Create, Discuss, Reflect): gli studenti sono co-progettisti delle procedure sintetiche o analitiche, razionalizzando ogni passaggio. La modalità didattica CLIL ha aiutato i ragazzi a sentirsi “citizens of the world” dato che i SDGs sono certamente di respiro planetario e il lavoro in teams internazionali sarà il loro futuro.

2. Parte sperimentale

2.1. Chimica organica e biochimica

Materiali: un bicchiere di PLA o di PP, acido citrico, NaOH 1,4 M in etanolo/acqua 1:1 (la soluzione può essere ottenuta usando in parte la basicità della cenere del camino anche se, in tal caso, bisogna tener conto della variabilità della sua composizione il che non rende standardizzabile l’esperienza), beuta da 250 ml, cartina al tornasole, bacchetta di vetro, piastra riscaldante con agitatore magnetico, termometro digitale, ancoretta magnetica, contagocce, vetrino da orologio, guanti, occhiali, camice.

Metodo: tagliare i bicchieri in striscioline larghe circa 1 cm e lunghe 5 cm, evitando le parti spesse del bicchiere. Pesare 2,5 g di pezzetti di PLA e metterli in una beuta da 250 ml. Misurare 50 ml di una soluzione di NaOH 1,4 M in etanolo/acqua 1:1 e versarli nella beuta contenente i pezzetti di PLA. Riscaldare a una temperatura di 80 °C sotto agitazione fino a completa dissoluzione dei pezzetti di PLA (5 – 10 min) avendo cura di coprire la beuta con un vetrino da orologio per ridurre l’evaporazione. La soluzione fortemente basica contiene il lattato di sodio. Una volta lasciata raffreddare, usando la cartina al tornasole, valutare il pH della miscela (pH ~ 11). Aggiungere lentamente acido citrico in polvere, fino a raggiungere un valore di pH finale di circa 4. A tale valore di pH la soluzione contenente acido lattico è un detergente ad azione disinfettante.

Note particolari: si può fare un confronto con un bicchiere in PP per poter osservare la diversa biodegradabilità.

2.2 Chimica analitica e strumentale

Materiali: etanolo grado LC-MS, acqua ultra-pura (18 MOhm × cm), banconote o polvere derivante dalle banconote, HPLC-MS, guanti, occhiali, camice.

Metodo: corsa cromatografica in gradiente.

2.3 Tecnologie chimiche industriali

Materiali: scarti di legumi, bucce di arancia, etanolo alimentare, acido citrico alimentare, glicerina alimentare, cartina al tornasole, piastra riscaldante, agitatore orbitale, bagno ad ultrasuoni, guanti, occhiali, camice.

Metodo per l'estrazione delle pectine dalle bucce d'arancia

Aggiungere a 100 g di albedo (strato interno di colore bianco della buccia degli agrumi) 30 ml di alcol etilico, 270 ml di acqua distillata e acido citrico (ca. 2,5 g); controllare quindi il pH (che deve essere fra 3 e 4) tramite cartina tornasole. Portare a ebollizione e ricontrrollare il pH dopo 1h; nel caso in cui non dovesse più essere compreso tra 3 e 4 aggiungere altro acido citrico e lasciar bollire per altri 40 minuti. Lasciare raffreddare. Filtrare con un colino a maglie larghe, centrifugare il filtrato che viene messo in un becher contenente 75 ml di alcol etilico e posto sotto agitazione, evitando che il solido si depositi nel fondo. Estrarre i filamenti gelatinosi di pectina dal becher servendosi di una bacchetta di vetro. Mettere in stufa (temperatura 30 °C) per almeno 2 ore per eliminare gli eccessi di alcol.

Metodo per l'estrazione delle saponine dagli scarti di legumi

In una beuta mettere 100 g di scarti di legumi in 300 ml di acqua potabile e lasciare riposare per 2 ore. Porre su agitatore orbitale per 1,5 ore, decantare per 7 minuti e trasferire la fase liquida in un'altra beuta.

Preparazione dello struccante

Aggiungere 1,3 g di pectina e 1,5 g di glicerina a 10 ml di filtrato, sonicare per 5 minuti in modo da ottenere una miscela omogenea; aggiungere eventualmente 1 goccia di altri oli essenziali (rosmarino, lavanda) per aumentare l'azione antimicrobica. Confezionare il tutto come struccante.

3. Risultati e discussione

3.1. Chimica organica e biochimica (L'azione didattica sotto descritta è in linea con i SDGs 3, 4, 8, 9, 11, 12, 13, 15 dell'Agenda 2030)

3.1.1. Ask

Nella fase motivazionale gli studenti, mediante brainstorming, immagini e discussioni di gruppo, sono stati sollecitati a riflettere sulla definizione ufficiale di bioplastica che, per esser tale, non deve necessariamente essere biodegradabile, sulla diffusione vertiginosa delle bioplastiche nelle nostre vite e sulla comparazione di plastiche e bioplastiche circa la loro destinazione d'uso. Abbiamo scelto di

focalizzarci sulla sintesi di una bioplastica monouso diventata molto comune, il PLA, e sul suo fine vita. Si sono studiate le varie strategie sintetiche del PLA [2, 3] scegliendo quella storicamente più antica, ma didatticamente più efficace, cioè la semplice policondensazione dell'acido lattico, consci che avremmo sintetizzato un PLA con un basso peso molecolare. Sono state effettuate prove di densità, durezza, resistenza a trazione, e sono stati eseguiti gli spettri IR e i cromatogrammi dello spazio di testa dei campioni.

Dai dati in letteratura [4] risulta che il PLA necessita di impianti industriali ad hoc per esser compostato in tempi ragionevoli e non ci sono impianti per il riciclo chimico del PLA. Da qui è partita la domanda stimolo caratteristica dell'Inquiry based learning: possiamo progettare un metodo sostenibile per evitare che il PLA diventi solamente compost in un impianto industriale ad alta temperatura? Possiamo ritornare al monomero di partenza, utile sia per una nuova polimerizzazione che per altri usi della chimica verde?

3.1.2. Investigate

Ragionare sulla natura dei legami esterei che realizzano lo scheletro del polimero ha permesso la verifica e il consolidamento dei prerequisiti necessari per progettare la depolimerizzazione del PLA. Era chiara la necessità di un'idrolisi alcalina. L'etimologia araba dell'aggettivo "alcalina" rimanda alla "cenere di piante", per cui si è chiesto agli studenti di portare a scuola la cenere del camino e di usarla come reattivo.

3.1.3. Create

Lisciviando la cenere si è ottenuto il reattivo a costo zero per la depolimerizzazione del PLA sintetizzato; tuttavia si è notata una notevole variabilità nella capacità di tale soluzione di idrolizzare il PLA in tempi ragionevoli, per cui si è riflettuto sulla non costanza delle caratteristiche dei reattivi derivanti dai rifiuti; si è quindi deciso di standardizzare il metodo utilizzando la soluzione idroalcolica dell'idrossido di sodio, dato il basso costo del reattivo; in parallelo si è constatato che un bicchiere in PP non veniva depolimerizzato e il fenomeno è stato con facilità razionalizzato sulla base della diversa natura del legame nei due polimeri, ottenuti peraltro con due meccanismi diversi, policondensazione per il PLA e poliaddizione, per il PP (Figura 1). Dopo la completa depolimerizzazione si è proceduto ad acidificare la soluzione risultante mediante l'acido citrico ottenibile dagli scarti alimentari.

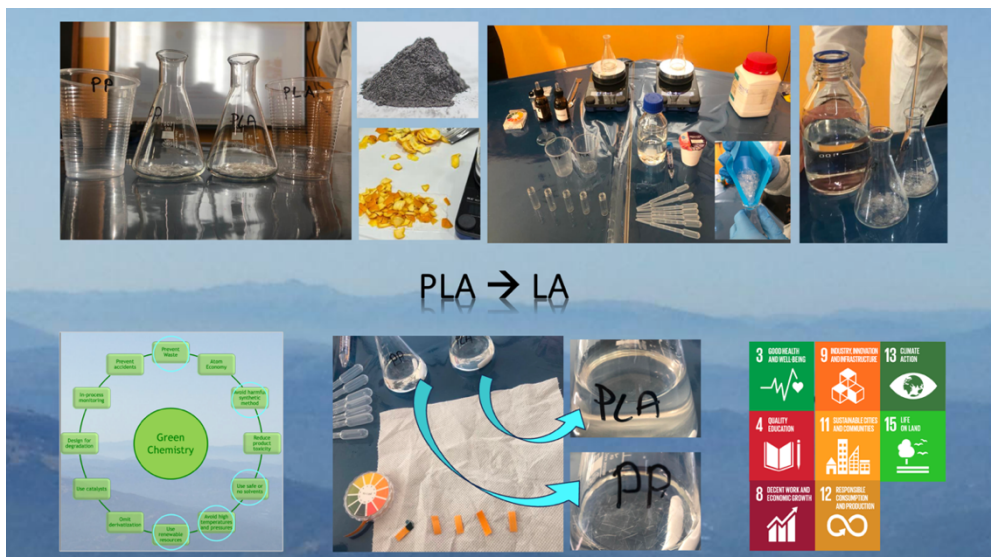


Figura 1. Idrolisi green del PLA

3.1.4. Discuss and reflect

La soluzione contenente acido lattico e citrato di sodio è efficace come detergente ad azione disinfettante.

3.2. Chimica analitica e strumentale (L'azione didattica sotto descritta è in linea con i SDGs 3, 4, 8 dell'Agenda 2030)

3.2.1. Ask

Durante il brainstorming si è ragionato sulle più diffuse applicazioni HPLC che prevedono l'uso di colonne in fase inversa, apolari, con fasi mobili polari. L'eluente è classicamente una miscela di acqua e metanolo o acetonitrile. Questi due solventi sono così largamente utilizzati in quanto presentano un'ottima trasparenza nel VIS e UV, una completa miscibilità con l'acqua dando soluzioni a bassa viscosità che generano basse pressioni nel sistema cromatografico strumentale. Tali soluzioni sono inoltre inerti verso tutto il circuito idraulico cromatografico. Tuttavia, entrambi i solventi sono pericolosi sia per l'uomo che per l'ambiente, in quanto sono tossici, infiammabili e volatili. La domanda stimolo è stata: si può trovare un sostituto green del metanolo o dell'acetonitrile?

3.2.2. Investigate

Richiamando le conoscenze pregresse gli studenti realizzano che l'etanolo ha una pressione di vapore inferiore a quella del metanolo; dunque, a parità di condizioni, la quantità inalata dall'operatore è minore; dal punto di vista economico, è un solvente disponibile con un costo di approvvigionamento e di smaltimento inferiore rispetto all'acetonitrile e al metanolo; inoltre l'etanolo

viene considerato un solvente GRAS (Generally Recognized As Safe), data la sua presenza anche nella dieta di molte popolazioni. Infine, è sicuramente ottenibile da un vasto range di scarti alimentari per fermentazione degli zuccheri; quindi, è un solvente “biobased”.

Gli studenti, a gruppi, si sono scambiati idee sui parametri qualitativi e quantitativi da individuare per misurare la greenness di una procedura analitica. I quattro parametri fondamentali individuati nella discussione per stimare l'ecocompatibilità dei metodi analitici sono stati: (i) la quantità dei reattivi, (ii) i rifiuti generati; (iii) il consumo energetico, (iv) i rischi per la salute, per l'ambiente e la sicurezza. Quanto da loro proposto è stato messo a confronto con le varie metriche attualmente in uso, grafiche o numeriche, illustrandole come segue.

Lo strumento grafico di valutazione GAPI (Green Analytical Procedure Index) sfrutta una rappresentazione grafica di cinque pentagoni, ciascuno relativo a una fase della metodologia analitica; i pentagoni sono suddivisi in parti che possono essere verdi o gialle o rosse in base alla gravità dell'impatto sulla salute, sicurezza, ambiente, energia e rifiuti.

Lo strumento grafico di valutazione NEMI (National Environmental Methods Index) prevede una rappresentazione grafica definita da un cerchio con quattro quadranti, ciascuno relativo a un aspetto importante per la greenness del metodo: (i) assenza di sostanze persistenti, bioaccumulabili, tossiche, (ii) assenza di sostanze corrosive, (iii) assenza di sostanze pericolose, (iv) rifiuti minori di 50 g. Se un metodo rispetta i criteri sopra elencati, il quadrante relativo a tale aspetto è verde, se ciò non si verifica il quadrante rimarrà incolore.

La valutazione numerica su scala ecologica ESA (Environmental Scale Assessment) si basa sulla sottrazione, da un totale pari a 100 punti relativi ad un metodo ideale, di punti di penalità per: (i) reagenti che potrebbero causare problemi ambientali o sanitari, (ii) quantità di energia consumata, (iii) trattamento analitico dei rifiuti. Un metodo accettabile da questo punto di vista deve avere un punteggio maggiore di 50.

La valutazione numerica e grafica AGREE (Analytical GREENness metric) si basa su 12 aspetti significativi per la greenness, esemplificati dall'acronimo SIGNIFICANCE; ogni sezione ha un colore che va dal verde al rosso come per la scala GAPI, ma la valutazione restituisce infine anche un valore numerico dato che il colore corrisponde anche ad un rating fra 0 (rosso) e 1 (verde).

3.2.3. Create

È, quindi, iniziato lo studio della sostituzione del metanolo con l'etanolo come eluente HPLC durante l'ottimizzazione di una analisi importante per l'educazione alla salute e alla legalità, riguardante la quantificazione dei residui di cocaina [5] nelle banconote e nella polvere delle banconote (Figura 2).



Figura 2. Analisi della cocaina nelle banconote

3.2.4. *Discuss and reflect*

Sia in fase estrattiva che durante le corse cromatografiche la performance è stata comparata riconoscendo, inoltre, che il maggior potere elotropo dell'etanolo rispetto al metanolo ha anche comportato tempi minori per la corsa cromatografica e, dunque, una minore produzione di rifiuti e un minor costo dell'analisi.

Si è poi studiata l'influenza del passaggio al metanolo in ogni scala studiata e si è calcolato l'indice AGREE riportato in figura 3 con un risultato ottimo dal punto di vista numerico e molto "verde" dal punto di vista visivo; l'unico aspetto con un rating rosso è relativo al fatto che l'analisi deve essere svolta in laboratorio, ma tale circostanza non è migliorabile dato che il cromatografo non è trasportabile.

Analytical Greenness report sheet

01/02/2024 12:21:03

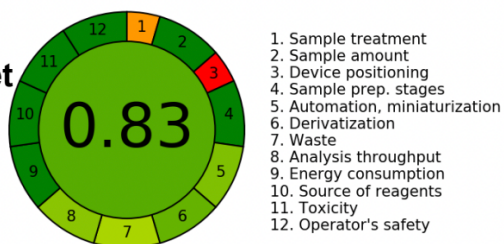


Figura 3. Valutazione del metodo secondo la scala AGREE

3.3. Tecnologie chimiche industriali (L'azione didattica sopra esposta è in linea con i SDGs 3, 4, 8, 9, 13, 14, 15 dell'Agenda 2030)

3.3.1. Ask

La fase motivazionale ha riguardato un altro argomento affine alle studentesse e agli studenti: la cosmesi. La scoperta guidata ha portato a focalizzarci su uno struccante sostenibile utilizzando solo scarti alimentari di aziende locali impegnate nel ripristino della biodiversità, in un ecosistema montano, attraverso la coltivazione di colture tipiche della Dieta Mediterranea. La sfida lanciata era relativa alla possibilità di ottenere un cosmetico sicuro, senza componenti di origine fossile che possa essere facilmente prodotto anche in casa.

Gli studenti sono stati esposti al ruolo cruciale della chimica verde per la sostenibilità; la bioraffineria è l'incarnazione dell'economia circolare e, in questo quadro, si sono cercate alternative sostenibili e salutari agli ingredienti tossici e/o a base fossile di uno struccante.

3.3.2. Investigate

Da un'accurata ricerca bibliografica, anche mediante Google Scholar, abbiamo studiato come viene prodotto uno struccante, per valutare la sicurezza dei suoi ingredienti e per studiare il ruolo dei composti attivi. Si è scoperto che molti sono di origine fossile. Dai risultati del progetto PSR Marche "Economia Circolare in Agricoltura: la corretta gestione dei rifiuti organici e della produzione di biomassa per aumentare la fertilità del terreno nelle Marche" [6], al quale il Montani ha partecipato come partner scientifico, si è scoperto che la biomassa offre molecole "monumentali" e l'uso di principi attivi da biomassa è stata la nostra priorità; per evitare la competizione fra l'uso alimentare o industriale delle colture, sono state esplorate varie fonti di principi attivi con funzione analoga a quella dei componenti di origine fossile.

Si è chiesto agli studenti di documentarsi circa la legislazione europea per quanto riguarda l'uso della biomassa [7].

Dallo schema in figura 4 è chiaro che, prima di inviare gli scarti alimentari

ai processi fermentativi, o di termovalorizzazione, o utilizzarli nel compostaggio, è auspicabile recuperare molecole ad altissimo valore aggiunto. Nel nostro caso servono tensioattivi, addensanti e antimicrobici.

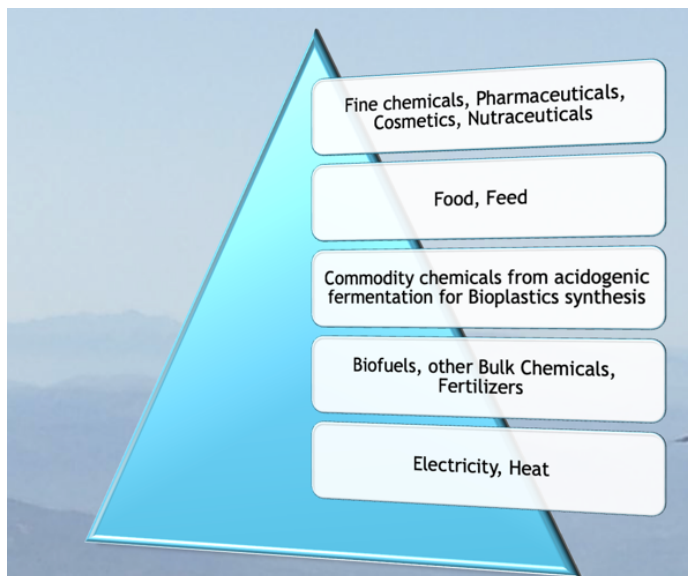


Figura 4. La piramide della biocascata: la biomassa va usata sequenzialmente e nel modo più efficiente estraendo prima i prodotti a più alto valore aggiunto

3.3.3. Create

Avendo in mente quali composti erano necessari per la formulazione del prodotto, le competenze di chimica organica e chimica degli alimenti sono state applicate per selezionare possibili composti funzionali a valore aggiunto provenienti dai rifiuti alimentari. Le saponine presenti nei legumi sono ottime sostitute dei tensioattivi; la pectina dalla buccia degli agrumi può sostituire emulsionanti e addensanti di origine fossile e le microplastiche, che un tempo venivano aggiunte; gli oli essenziali sono invece ottimi antimicrobici. Si è quindi passati alla progettazione del prodotto.

Si sono provati praticamente diversi protocolli con vari solventi GRAS (Generally Accepted As Safe) e diversi pH per l'estrazione di saponine dagli scarti di legumi e della pectina dalla buccia d'arancia; si è quindi ottimizzato il protocollo finale utilizzando solo acqua nel primo caso e una miscela di alcol etilico ed acqua nel secondo.

Si sono mescolati gli ingredienti estratti dagli scarti alimentari con glicerolo, altra molecola biobased molto umettante, per aumentare la scorrevolezza e la lubrificazione.

Si è verificata la stabilità microbiologica tramite il metodo pour plate e non si sono rivelati necessari i conservanti, data l'azione antimicrobica degli oli essenziali.

Gli studenti hanno documentato tutte le fasi del progetto (Figura 5) e si sono tuffati nella realizzazione del video (**qui visionabile**). La musica del video è stata creata da uno di loro dal momento che il gruppo ha sempre valorizzato le competenze specifiche di ciascun componente.



Figura 5. Produzione dello struccante da scarti alimentari

3.3.4. Discuss

Sostituendo i tensioattivi di origine fossile con le saponine degli scarti delle leguminose, i silossani e le microplastiche con la pectina delle bucce d'arancia che donava anche oli essenziali antimicrobici, non si sono rivelati necessari conservanti tossici, fragranze e sostanze di sintesi.

Abbiamo utilizzato concetti di chimica analitica per studiare la resa estrattiva e il ruolo del pH, abbassato tramite l'aggiunta di acido citrico ottenuto dagli scarti degli agrumi.

Si è testata l'efficacia dello struccante e la sua accettazione da parte dei consumatori (tramite un modulo Google condiviso con gli studenti).

3.3.5. Reflect

Si sono studiati i flussi di energia e di materia per un impianto di estrazione delle saponine da scarti di legumi e della pectina dalle arance.

Lo scale-up del processo dalla scala di laboratorio al livello industriale è stato concepito sia dal punto di vista matematico (scale-up e bilanciamento dei flussi di materiali ed energia) che dal punto di vista tecnico (sono stati scelti componenti idonei dell'impianto chimico). L'impianto industriale finale progettato per la sintesi dello struccante è una vera e propria bioraffineria ispirata ai principi dell'economia circolare e della Chimica Verde.

Si è studiato lo scale-up industriale (UNESCO Project Planner) con imprese locali e organizzazioni a sostegno dell'imprenditorialità giovanile nella Città Learning UNESCO di Fermo, anche con il supporto di un professionista esterno per lo sviluppo del business plan. L'impianto chimico è stato progettato in CAD e può essere osservato in figura 6.

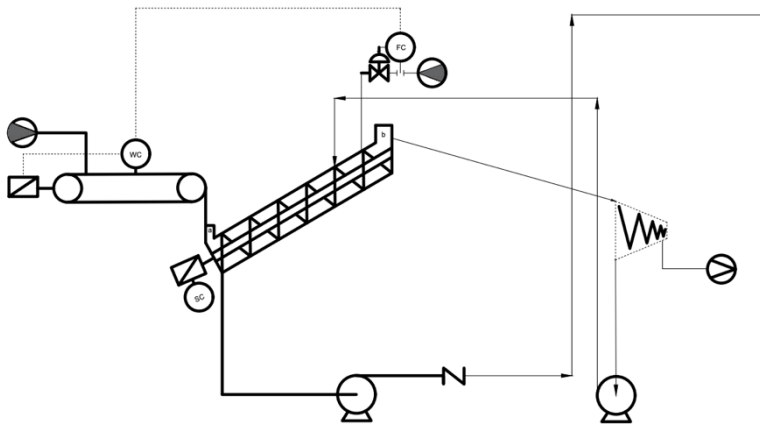


Figura 6. Scale up della procedura laboratoriale: impianto chimico della bioraffineria per ottenere il cosmetico dagli scarti alimentari

Per questi meriti il progetto, **qui discusso dagli studenti in inglese (modalità CLIL)**, è stato selezionato a livello Europeo nell'ambito della competizione di Science on Stage Europe "Future League" [8] ed è stato presentato a Berlino dal 23 al 24 Novembre 2023.

4. Conclusioni

La pratica della chimica presso l'ITT Montani di Fermo è stata ispirata fin dal primo momento dall'Agenda 2030. Per quanto riguarda il Dipartimento di Chimica, gli studenti sono stati coinvolti nella produzione di bioplastiche da scarti alimentari, nello studio dell'inquinamento da microplastiche a livello molecolare, nel riciclo chimico della plastica, nello studio degli antiossidanti e nutraceutici, nel recupero di metalli preziosi da rifiuti elettronici e altri rifiuti, nell'analisi di sostanze d'abuso in matrici non convenzionali come le banconote o alimenti, nel rilevamento delle impronte digitali molecolari di sostanze volatili per l'autenticazione degli alimenti, per la descrizione molecolare della biodiversità o del patrimonio culturale.

Le pratiche consolidate sono state riviste e le nuove attività, sviluppate mediante creatività e inferenza, ricadono perfettamente nelle cinque aree di azione prioritarie dell'Educazione per lo sviluppo sostenibile (ESD) di seguito riportate.

1. *Attuare politiche avanzate*: la progettualità pilota sopra esposta ha portato a integrare la Sostenibilità nel curriculum di istituto; dal 2023-24 è stato infatti istituito un nuovo corso curricolare di Chimica Verde per la Sostenibilità ed Outreach.
2. *Trasformare gli ambienti di apprendimento*: gli studenti agenti di cambiamento sono diventati GenB Ambassador nell'ambito del progetto Generation Bioeconomy e hanno pianificato attività di sensibilizzazione verso i più giovani circa il ruolo cruciale della chimica per la bioeconomia circolare con attività di edutainment, gamification, teatro.
3. *Sviluppare le capacità degli educatori*: adottare una pratica didattica attenta al "waste to treasure approach" significa riuscire a fornire alla società professionisti formati per un approccio competente all'economia circolare.
4. *Realizzare empowerment e mobilitazione degli studenti*: stimolare l'imprenditoria giovanile mediante il Project Planner dell'UNESCO e il lancio della startup rende gli studenti protagonisti orgogliosi del loro processo di apprendimento.
5. *Accelerare l'azione a livello locale*: interagire con le istituzioni (Banca, Rotary club) le imprese locali nella nostra Learning City (Fermo) e altri attori nazionali (GenB, BIOVOICES etc.) crea legami e opportunità di lavoro, promuovendo partenariati e scambiando ispirazione, know-how e migliori pratiche.

L'attività didattica è importante per gli studenti, ma anche per tutta la società perché la loro formazione e competenza chimica plasmerà il nostro

futuro nella transizione ecologica che stiamo vivendo. Rendere gli studenti consci del ruolo chiave della chimica per poter essere attenti armonicamente al pianeta, al profitto ed alle persone è pienamente un'azione di educazione civica.

Il coinvolgimento degli studenti è stato molto elevato durante tutte le fasi del rinnovamento della pratica laboratoriale che è in corso all'ITT Montani: la loro attenzione, curiosità, interesse, ottimismo e passione hanno favorito l'apprendimento. La loro motivazione ad apprendere è stata aumentata dall'idea di avviare una propria startup. Hanno dedicato molta energia fisica e psicologica all'esperienza del "learning by doing" per affrontare problemi e risultati inattesi.

Gli studenti si sono a volte incontrati online anche senza la supervisione dell'insegnante e questo è molto remunerativo per un docente, perché significa che si è contagiato il desiderio di produrre e non solo riprodurre il "sapere".

Gli studenti si sono impegnati nella documentazione delle esperienze di apprendimento e si sono tuffati con entusiasmo nella realizzazione di vari video, nonché nella progettazione di una Escape Room centrata sulla sostenibilità presentata al Maker Faire a Roma e al Festival della Scienza di Fermo, FermHamente, rispettivamente il 20 e il 22 novembre 2023. L'amicizia e i rapporti personali sono stati fortemente rafforzati dalla partecipazione alle varie attività.

La cosmesi in particolare ha permesso di affrontare la questione STEM e gender: lo stereotipo della ragazza consumatrice di cosmetici è stato analizzato e ribaltato; le ragazze sono diventate produttrici del cosmetico sostenibile che hanno anche testato! Le ragazze hanno mostrato una spiccata capacità di affrontare situazioni difficili e di ideare possibili soluzioni, uno studente-musicista ha creato la musica. Nel gruppo è stato chiaro quanto sia importante valorizzare le diverse abilità.

La strategia didattica utilizzata ha cercato di sviluppare negli studenti non solo le LOTS (lower order thinking skills), ma anche le HOTS (higher order thinking skills) mediante brainstorming e Inquiry based learning.

Il percorso valutativo ha sempre messo a fuoco l'obiettivo principale dell'azione didattica: permettere al discente di produrre (e non solo riprodurre) il proprio sapere sfruttando la costruzione di ulteriori intuizioni basate sulla conoscenza pregressa.

Il corretto smaltimento dei rifiuti di laboratorio ha permesso infine di abituarli gli studenti a una pratica laboratoriale in linea con il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità dell'Agenda 2030.

Riferimenti

- [1] J. Elkington, *Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business*, New Society Publishers, 1998.
- [2] T. Cecchi, A. Giuliani, F. Iacopini, C. Santulli, F. Sarasini, J. Tirillo, Unprecedented high percentage of food waste powder filler in poly lactic acid green composites: synthesis, characterization, and volatile profile, *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**, 7263–7271, 2019 (<https://doi.org/10.1007/s11356-019-04187-1>).
- [3] G. Pastore, S. Gabrielli, T. Cecchi, A. Giuliani, C. Cimarelli, A. Menchi, E. Marcantoni, A new and efficient lactic acid polymerization by multimetallic cerium complexes: a poly(lactic acid) suitable for biomedical applications, *RSC Advances*, 2021, **11**, 10592–10598 (<https://doi.org/10.1039/d0ra10637b>).
- [4] T. Cecchi, C. De Carolis, *Biobased products from food sector waste. Bioplastics, biocomposites, and biocascading*, Springer Nature, 2021 (<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-63436-0>).
- [5] T. Cecchi, E. Santoni, First liquid chromatography-high resolution mass spectrometry method for the determination of cocaine on banknote dust, *Forensic Toxicology*, 2022, **40**, 357–365 (<https://link.springer.com/article/10.1007/s11419-022-00627-9>).
- [6] <https://www.grasciaririuniti.it/>
- [7] Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Guidance on cascading use of biomass with selected good practice examples on woody biomass, Publications Office, 2018 (<https://data.europa.eu/doi/10.2873/68553>).
- [8] <https://www.science-on-stage.eu/final-projects-future-league>

Ripensando l'equazione di reazione

Alfredo Tifi

Progetto ASSeT - ITTS E. Divini San Severino Marche (MC)

e-mail: a.tifi@divini.org

Abstract. The Project ASSeT, currently underway at ITTS Divini in San Severino Marche, focuses on strengthening the basic tools for the mathematization of reality, both in its quantitative and qualitative aspects. Considering previous activities on stoichiometric relationships, we recognized the need to modify the symbolic description to bring it closer to the essential and systemic aspects of the particle model of chemical reactions. We consider the iconic register presented in the article suitable for this purpose and believe it should be practiced before introducing the typical formalism of chemical equations.

Keywords: Equazione di reazione; sistema chimico; reazione chimica; modello iconico microscopico

1. Introduzione: codifica simbolica dei sistemi chimici

La didattica della matematizzazione, oggetto del progetto d'istituto ASSeT (*Arricchimento Strumentale per le Scienze e le Tecnologie*), nel senso più ampio include la scelta dei sistemi di segni adeguati a rappresentare le entità, nel loro modificarsi nei processi chimici. Scelta non neutrale rispetto alla comprensione del processo chimico che gli studenti auspicabilmente sviluppano per gradi.

L'equazione chimica, da bilanciare, con le sue formule dei reagenti, la freccia, le formule dei prodotti, i segni "+", ecc., condensa e astrae un vasto complesso di concetti e assunti convenzionali. Questi possono essere pienamente significativi solo per chi possiede un modello mentale del corrispondente processo di trasformazione chimica - coinvolgente moltitudini di entità elementari - e di almeno alcune caratteristiche essenziali del *sistema* costituito da tali mutevoli entità.

La "realtà chimica" è costituita in parte da ciò che si osserva a livello fenomenologico e si interpreta tramite concetti, come quelli di sostanza e di identità della sostanza, e, dunque, al livello macroscopico. Ma è altrettanto vero che

della stessa “realtà chimica” fanno parte entità materiali ultramicroscopiche, invisibili e costituite da atomi, numericamente invariati almeno nel contesto chimico. Il livello atomico-molecolare, in quanto non direttamente esperibile, richiede un *modello dinamico*. Quello che si introduce nel presente contributo riduce allo stretto necessario gli elementi concettuali e simbolici che permettono di raccordare, ossia interpretare, almeno le evidenze più generali, della *reazione chimica*: l'aspetto temporale, i cambiamenti associati alla formazione/scomparsa dei corpi materiali, che senza modello microscopico sarebbero interpretati come “trasmutazioni”, e gli aspetti stechiometrici, interpretabili in base all'invarianza numerica degli atomi e non alla pura algebra del bilanciamento.

Va dunque chiarito, nell'adattamento didattico della proposta, che il modello iconico serve a *spiegare* le sopraddette caratteristiche generali dei fenomeni chimici, stimolando cambiamenti a lungo tempo del modo stesso di percepire le reazioni chimiche da parte degli studenti. È evidente che, nello sviluppo didattico, gli studenti avranno innanzitutto avuto modo di osservare/realizzare e descrivere trasformazioni chimiche (e non-chimiche), *senza il fardello simbolico*, e siano stati aiutati a porsi domande, a cercare *spiegazioni* che poi si richiameranno nella successiva attività sul modello sistemico.

La stragrande maggioranza degli studenti si trova, invece, a gestire fin dall'inizio l'apparato *simbolico* dell'*equazione di reazione* (denominata impropriamente “reazione chimica”) senza avere sviluppato alcun modello mentale trasparente, cioè verbalizzabile tramite concetti, per il livello micro. Prove di questa affermazione sono costituite dal blocco che si riscontra sistematicamente, quando si legge l'equazione bilanciata per risolvere problemi sul reagente limitante, sulla resa di reazione, sulle variazioni di quantità e concentrazione nel passare allo stato di equilibrio. In assenza del modello mentale iconico lo studente affronta i problemi suddetti operando direttamente sul simbolico, analogamente a quanto già fatto nel “bilanciamento”: impara a bilanciare, ma non sa cosa significhi averlo fatto. A. H. Schoenfeld [1] ha coniato il termine “sospensione del senso” per questo fenomeno. Il docente tipico dice agli studenti che “si bilancia per ‘validare’ il principio di conservazione della massa di Lavoisier”. Purtroppo, ciò non basta a stabilire il legame di senso tra le manipolazioni simboliche e la realtà. La forma corretta della stessa legge, in cui è la quantità di *ogni singolo elemento* che si conserva, scaturisce automaticamente in modo molto chiaro lavorando con il modello iconico.

Per esempio, uno studente sa che: “3,31 g di un generico solfuro MeS, bruciando, danno 2,2 g di diossido di zolfo” e da queste sparute informazioni deve “calcolare il peso atomico dell'elemento Me”. Si blocca perché non può bilanciare l'equazione di reazione: non sa “che fine fa Me”; è aiutato dicendogli che non occorre saperlo: basta ipotizzare che tutti gli atomi di zolfo di MeS finiscono nel diossido. Ma anche questa informazione sarà processata solo dopo aver

sostituito le formule di MeS, O₂ e SO₂ con gli atomi-iconizzati, per ricavare il rapporto stechiometrico 1:1 tra il reagente e il prodotto dati dal problema. Le entità così modellizzate, a differenza dei simboli alfanumerici, sono più simili a degli oggetti concreti, perciò sono manipolati mentalmente.

Le leggi, come quella di Lavoisier, si riscontrano nei modelli, teorici o comunque mentali, che in qualche modo devono essere messi in gioco consapevolmente. Ciò non può avvenire sui codici simbolici. Per poter ragionare al livello micro, per dare pieno significato alle varie manipolazioni e usi delle equazioni, occorre rendere espliciti entità e processi invisibili. Si devono costruire rappresentazioni mentali delle moltitudini di oggetti che “vivono” nella “realtà chimica invisibile”: qualcosa di più immaginifico e dinamico dei simboli alfanumerici, cioè “oggetti simbolici” che rispettino almeno la natura discreta, qualificabile e quantificabile, degli atomi e dei loro aggregati. Da qui la scelta di utilizzare un supporto simbolico *iconico*, il più semplice possibile, quale: ⊕⊙⊕. Dunque, non molto diverso da quello che utilizzò Dalton per le “particelle ultime dei corpi omogenei” che dovevano essere necessariamente uguali per ciascun elemento costituente [2]:

Therefore we may conclude that *the ultimate particles of all homogeneous bodies are perfectly alike in weight, figure, &c.* In other words, every particle of water is like every other particle of water; every particle of hydrogen is like every other particle of hydrogen, &c.

Similmente, così scriveva Feynman all’inizio della sua prima “Physics Lecture”, chiedendosi quale fosse l’immagine complessiva del mondo più densa di verità costruita dalla scienza, 1-2 La materia è composta di atomi (Figura 1):

Se, in qualche cataclisma, tutta la conoscenza scientifica dovesse essere distrutta e si potesse trasmettere solo una frase alle successive generazioni, quale affermazione conterrebbe l’informazione più importante nel minor numero di parole? Io credo che sia *l’ipotesi atomica* (o il fatto atomico, o comunque la vogliate chiamare) *che tutte le cose sono fatte di atomi, piccole particelle che si muovono in moto perpetuo, attraendosi l’un l’altra quando sono a breve distanza, ma respingendosi quando schiacciate l’una sull’altra.*

In quell’unica frase, capirete, c’è un’enorme quantità di informazioni sul mondo, solo applicando un minimo di immaginazione e di pensiero” [3].

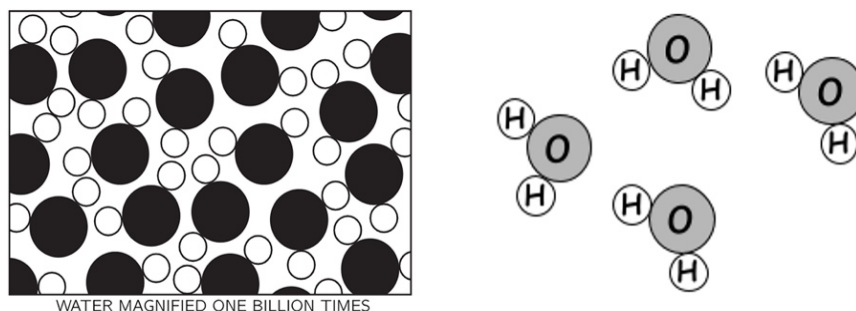


Figure 1-1

Figura 1. A sinistra, prima figura da [3]: Atoms in motion; a destra, il modello iconico del mondo atomico usato nelle nostre attività sulle reazioni chimiche

Cliccando su https://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_01.html si scopre che l'idea e l'immagine sono sviluppate per farne una vera lezione di *chimica*; un vero capolavoro. Dovremmo farlo anche tutti noi.

2. La rappresentazione usata per introdurre al concetto di sistema chimico

La rappresentazione utilizzata nelle attività consiste dunque in un piccolo gruppo di atomi-iconizzati ed etichettati con i rispettivi simboli degli elementi e aggregati in modo da rispecchiare la composizione e, molto approssimativamente, la costituzione delle sostanze da essi formate. L'invarianza del numero di atomi di ogni elemento presenti nel sistema permetterà agli alunni di completare uno dei due stati del sistema (reagenti o prodotti) con le entità mancanti (atomi, molecole, unità ripetitive). Il ridotto numero di atomi è tale da permettere di contarli facilmente, ma non è il minimo possibile, come solitamente si impone nell'equazione di reazione. I numeri interi e piccoli di unità di aggregati atomici che si "introducono" nel sistema sono arbitrari, coerentemente con la libertà di caricare un recipiente di reazione con qualsivoglia quantità di ciascuna sostanza. Si previene così la frequente confusione tra i coefficienti stechiometrici e le quantità di sostanza realmente presenti.

Il numero limitato di atomi (di tre o quattro elementi al massimo) facilita la lettura spontanea dei rapporti di combinazione, ossia in termini di quantità relative, e non impedirà di immaginare moltitudini enormi, ma finite e trasformate secondo gli stessi rapporti numerici.

Tra le *tipologie di aggregati* si distinguono solo atomi singoli, molecole semplici e strutture continue, ma non ioni. Quello proposto è, infatti, un livello

molto elementare di trattazione, in cui non entra in gioco la struttura atomica. D'altra parte, non si può rischiare la misconcezione, difficile da rimuovere, secondo cui tutte le sostanze composte sono costituite da molecole. Il modello è dunque analogo a quello di Dalton, a parte il fatto che le sostanze elementari non devono essere costituite da atomi singoli separati, come invece Dalton si ostinò a sostenere.

La seguente figura 2, utilizzata nelle istruzioni per gli alunni, rende l'idea delle azioni a loro richieste.

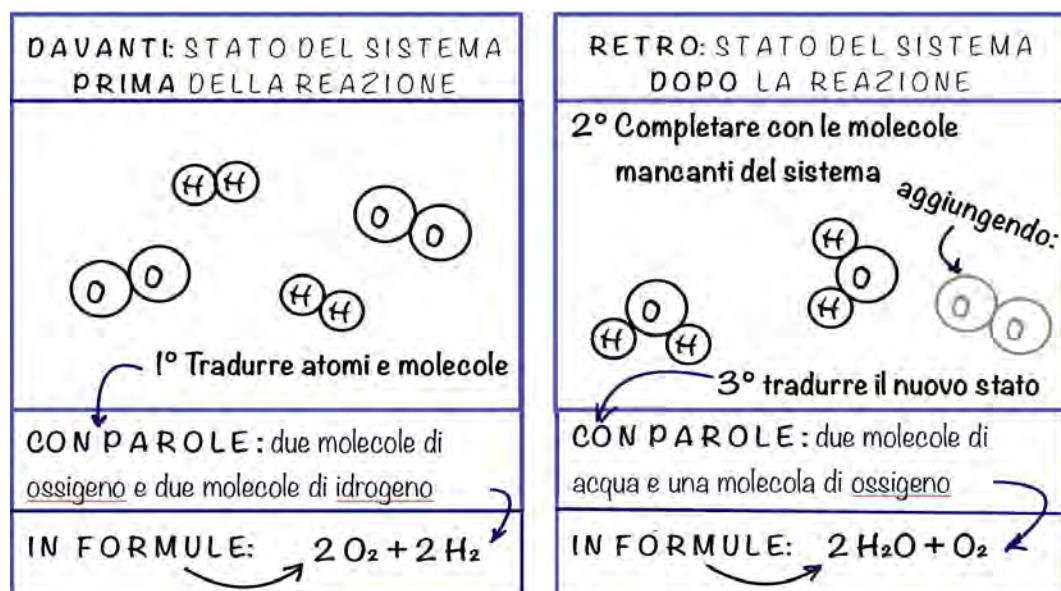


Figura 2. Schema esempio utilizzato per illustrare la prima sezione delle attività

Gli studenti, lavorando in coppia, potranno vedere solo il “prima” o il “dopo”, perché questi schemi saranno stampati avanti e dietro. Ciò li indurrà a interiorizzare gli aggregati e i loro cambiamenti, quindi a concettualizzare il processo microscopico. Saranno così predisposti ad associare o interpretare il fenomeno chimico osservato e la natura delle sostanze in gioco agli stati del sistema chimico.

Anche gli aspetti dinamici, i movimenti caotici, le unioni e le separazioni degli atomi, emergono come necessità e possono essere immaginati con la guida del docente. L'osservazione del moto browniano (praticamente dimenticata dai testi scolastici di chimica generale) potrà essere portata come evidenza di questo “motore” delle trasformazioni, da uno *stato iniziale* instabile del sistema a uno *stato finale* in cui tutte le sostanze che possono trasfor-

marsi lo faranno. Stabilizzandosi, ma senza smettere di agitarsi; continuando l'esplorazione di stati più stabili ed eventualmente raggiungibili in tempi più lunghi.

La ricostruzione della realtà, tramite questo modello mentale, richiede la *verbalizzazione* delle operazioni immaginative, di andata e ritorno tra le diverse *traduzioni da un linguaggio all'altro* (verbale, iconico, simbolico, matematico) indicate nelle attività (Figura 2) e, quando opportuno, tra la realtà fenomenica e quella atomico-molecolare; sempre con la mediazione del compagno e del docente.

Mentre il modello iconico qui presentato descrive la reazione come una *trasformazione* tra diversi stati dello *stesso* sistema, al livello macroscopico la stessa reazione "è percepita più come una «*transizione*» tra due sistemi diversi che come una «*trasformazione*» di un solo sistema" [4]. In effetti gli enti (sostanze chimiche/molecole) messi a reagire si distruggono, e dopo di essi emergono - in modalità apparentemente "magiche" - nuove entità a costituire quello che, dal punto di vista delle proprietà osservabili, appare come un "nuovo" sistema. *L'invarianza* del numero di atomi nelle reazioni chimiche e nel modello garantirà una certa equidistanza - almeno al livello molecolare - tra il punto di vista chimico-fisico, il processo dinamico che si svolge in un *unico* sistema e il punto di vista fenomenologico. Il modello iconico si presta bene a semplificare e far comprendere la descrizione sistemica e a svelare la prospettiva *trasformativa* che sta dietro le apparenti "morti" e "nascite" delle sostanze.

Si supera l'elemento magico della "trasmutazione", stimolando qualche domanda sulle possibili connessioni tra quanto si modifica nel modello iconico e quanto si osserva durante il processo dagli stati iniziale a quelli finali nel sistema chimico reale. Per esempio, nella reazione F (vedi ultima scheda nell'Appendice 3) tra ossido rameico e acido cloridrico sarà facile distinguere i casi in cui risulterà un eccesso di ossido da quelli in cui resterà un eccesso di acido e spiegarli col modello iconico.

Tutte le reazioni oggetto delle attività delle schede operative possono in effetti essere realizzate in laboratorio - con opportune precauzioni - e alcune anche dalla cattedra. Un ottimo modo per fare tutto ciò, avvicinandosi ulteriormente al movimento e alla "vitalità" del mondo ultramicroscopico, consiste nel fare "reazioni meravigliose" in una goccia e proiettarle con un microscopio USB, o anche con una semplice videocamera. I modelli sistemici delle reazioni saranno così "colorati" con dati percettivi: attraverso la microscala [5] ci si avvicina anche percettivamente alla dinamica molecolare, nella diffusione, crescita di cristalli (Figura 3) e delle bollicine, nel moto browniano, ecc.



Figura 3. Crescita di cristalli di argento su filo di rame

Il modello iconico, in una fase successiva, potrebbe rappresentare sia *situazioni intermedie* (compresenza di prodotti e reagenti non ancora trasformati ed eventuali *intermedi di reazione*), sia situazioni “finali” corrispondenti a stati d’equilibrio dinamico (coesistenza di tutte le specie reagenti e prodotte), o situazioni in cui si sviluppano reazioni collaterali. Non servono conoscenze di chimica avanzate (struttura atomica, nomenclatura, legami chimici ecc.) per rendersi conto che nell’arena del sistema chimico, una volta stabilite condizioni e concentrazioni, gli unici attori, registi e decisori di ciò che deve accadere, sono gli atomi con i loro peculiari modi di interagire; non i “bilanciamenti” o la *IUPAC*. Le attività permettono di sottolineare questo aspetto e prevenire l’idea “teleologica” che gli aggregati atomici “sappiano” fin dall’inizio ciò che dovranno diventare, perché “obbligati” tutti a seguire rigorosamente una certa equazione di reazione correttamente bilanciata. È questa la più diffusa misconcezione tra chi studia chimica di base ed è il risultato di una didattica sbilanciata sul livello formale. Molti docenti credono che solo conoscenze strutturali e concetti chimico-fisici avanzati permetteranno, e solo successivamente, di rispondere alle prime e più elementari domande di senso sulla natura delle reazioni. Per queste risposte basta invece la visione sistemica.

Il concetto di sistema chimico è ciò che fa la differenza tra l'algebra pura dei bilanciamenti e la chimica.

Un esempio banale su tutti, che si legge anche nei problemi degli esami uni-

versitari, è costituito dalla frase “quando la reazione raggiunge l'equilibrio...” Il suo significato diventa molto più comprensibile ammettendo che il soggetto che raggiunge l'equilibrio, ossia uno dei suoi possibili *stati*, è il *sistema chimico*, con tutte le sue particelle “jiggling and bouncing”, per citare ancora Feynman.

Dall'attività (sperimentata preliminarmente a fine a.s. 2022/23) ci aspettiamo dunque che gli studenti:

- a) pensino al sistema chimico e ai suoi componenti ultramicroscopici, in termini idealizzati, ma non tanto astrattamente quanto è richiesto per l'equazione di reazione;
- b) capiscano che uno stesso sistema chimico può trovarsi in diversi *stati* e che questi stati subentrano l'uno all'altro in successione temporale; non sono coesistenti come i due membri di un'equazione algebrica o i due piatti di una bilancia;
- c) codifichino con la simbologia chimica i diversi stati e al tempo stesso verbalizzino (matematizzazione e decodifica) i cambiamenti del sistema chimico al livello atomico-molecolare;
- d) capiscano che il modello sistemico iconico e i suoi atomi servono a *spiegare* le trasformazioni osservate e, almeno in qualche caso, si sforzino di mettere in corrispondenza i fenomeni chimici, osservati o immaginati, con i diversi stati del sistema chimico modellizzato.

Quattro sono i *prerequisiti non* direttamente trattati dalle attività:

1. il concetto di *identità di una sostanza*, (proprietà, struttura e composizione);
2. l'osservazione e la descrizione di evidenze o indizi della formazione/scomparsa di sostanze nelle trasformazioni (esperienza di osservazione e descrizione di trasformazioni chimiche e non);
3. i concetti di elemento chimico (diverso da quello di sostanza elementare) e di sostanza composta; gli aggregati atomici, molecole e reticoli continui (definibili contestualmente);
4. il modo di indicare la composizione (formula) con indici numerici assoluti (per le molecole) o relativi (per le strutture continue), che può essere anche sviluppato contestualmente.

Le *lacune*, da colmare con altre attività, includono:

1. il fatto che, nel modello iconico dei sistemi chimici, a differenza del sistema “vero”, le molecole del solvente sono omesse per evidenti ragioni di semplificazione;
2. per la medesima ragione gli stati di aggregazione non sono rappresentati (se non, parzialmente, quello solido), perché ciò richiederebbe l'utilizzo di numeri eccessivi di atomi-icona;

- per gli alunni con particolari difficoltà, il modo in cui gli aggregati di atomi si modificano può essere illustrato con dei cerchietti di cartoncino simili agli atomi-icona (che sarebbero realmente manipolabili), o con altri modelli solidi (come i mattoncini Lego®).

Tra i *prodotti "collaterali"* dell'attività si includono i seguenti due punti.

- Le *leggi ponderali* (sebbene si inverta il processo storico, dagli esperimenti e loro interpretazione alla teoria atomica). Per la legge di Dalton si potrebbe estendere l'attività modificando appositamente una scheda operativa, ma riteniamo che una volta raggiunti gli obiettivi principali dell'attività sarebbe più semplice trattare tutte le leggi ponderali con strategie consuete.
- La "*scaffalatura energetica*" degli stati. Il modello iconico di sistema chimico è propedeutico a concetti termodinamici, quale la stabilità energetica, che si incontra a un livello più avanzato nello studio della chimica [6]. A parità di temperatura e pressione il contenuto energetico del sistema dipende da come sono aggregati gli atomi che lo compongono. Con gli stessi atomi si possono perciò avere molti *stati* diversi e trasformazioni (eso/endotermiche) dall'uno all'altro (Figura 4).

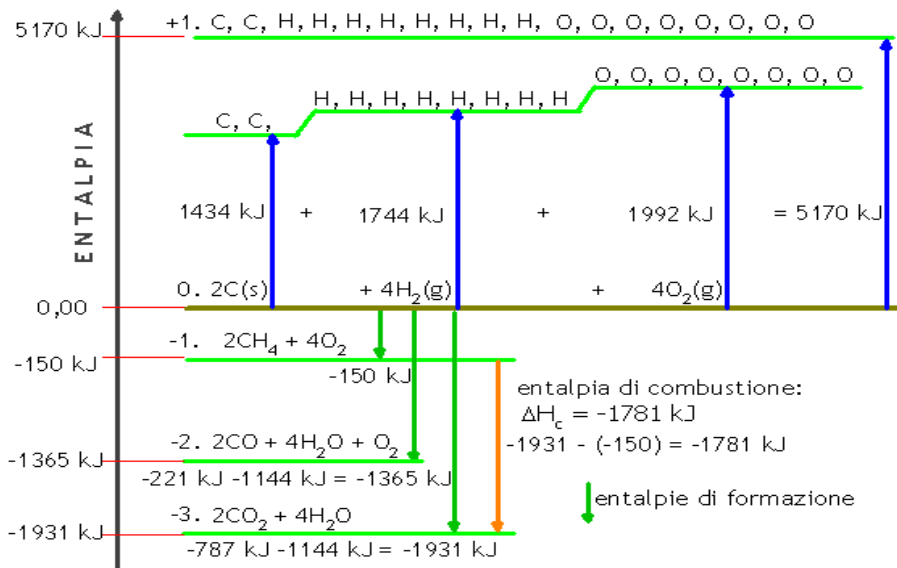


Figura 4. Lo stesso sistema può trovarsi a diverse energia ed entalpia a parità di temperatura e pressione a seconda di come sono aggregati gli atomi che lo compongono

Lo stesso sistema chimico costituito da 18 atomi, 2C, 8H, 8O, potrà trovarsi, per esempio nei seguenti stati (Figura 5).

Stato +1 "tutto atomizzato": C, C, H, H, H, H, H, H, H, H, O, O, O, O, O, O, O.

Stato 0 "elementare": $2\text{C}(\text{s})$; $4\text{H}_2(\text{g})$; $4\text{O}_2(\text{g})$, posto per convenzione al livello zero di entalpia.

Stato -1 "metano + ossigeno": $2\text{CH}_4(\text{g}) + 4\text{O}_2(\text{g})$.

Stato -2 "parzialmente combusto": $2\text{CO}(\text{g}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{O}_2(\text{g})$.

Stato -3 "completamente combusto": $2\text{CO}_2(\text{g}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l})$.

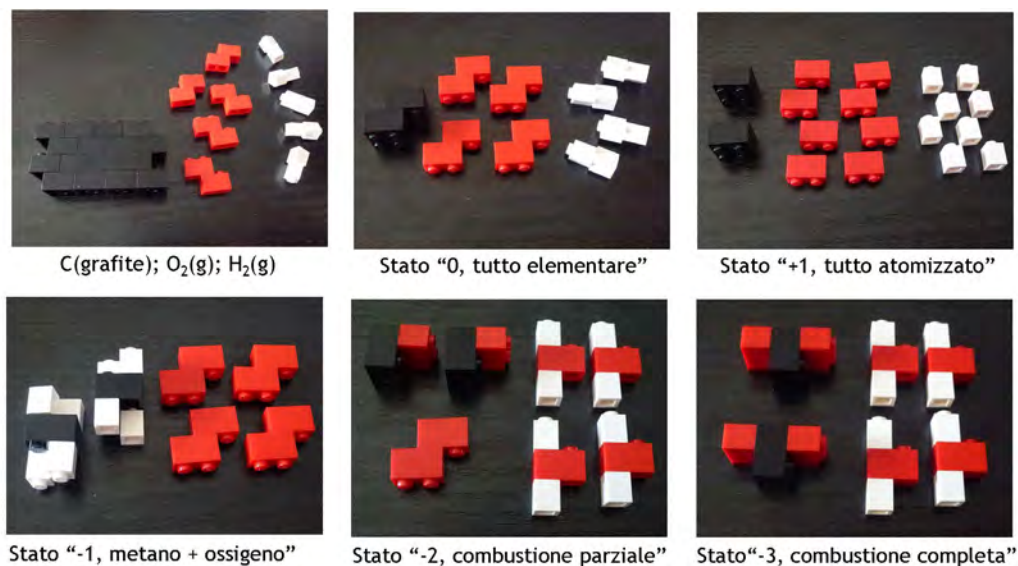


Figura 5. Le sostanze elementari C(grafite); $\text{O}_2(\text{g})$; $\text{H}_2(\text{g})$ e cinque tra gli stati possibili dello stesso sistema "2C, 8H, 8O" rappresentati con mattoncini Lego® (foto dell'autore)

3. Conclusioni

Gli *obiettivi a) e b)* sono dunque finalizzati a prevenire il *vuoto di significato* che si verifica nel primo biennio della scuola secondaria di secondo grado quando gli studenti affrontano equazioni chimiche, bilanciamenti e calcoli stechiometrici. La pratica nella codifica *c)* serve a fornire uno strumento di sintesi che potrà soppiantare gradualmente le immagini iconiche degli oggetti contenuti nei sistemi chimici, ma potrà anche tradursi, con la pratica, in strumento di *decodifica*, dalla simbologia dell'equazione di reazione al modello mentale iconico del sistema chimico; processo che normalmente non si può verificare per l'assenza di un qualsiasi modello mentale esplicito e sufficientemente praticato.

Le "normali" equazioni di reazione devono essere trattate *dopo* queste attività di arricchimento degli strumenti concettuali necessari. Chiarendo che esse *si rife-*

riscono esclusivamente al sottosistema delle specie chimiche che si trasformano, per cui non corrispondono a stati effettivi del sistema chimico. La stessa stechiometria vale in presenza di un forte eccesso di un reagente, vale per una reazione accompagnata da altre reazioni parallele, e vale in un sistema che giunge all'equilibrio.

Nel caso della scuola secondaria di primo grado, riteniamo che sia possibile adattare le stesse attività (eventualmente limitando la traduzione nel linguaggio simbolico), assieme all'osservazione di alcune trasformazioni chimiche, e che questo sia *più che sufficiente* nell'ottica di far comprendere la natura delle reazioni chimiche.

In questo modo si eviterebbero molte misconcezioni comuni. I ragazzi non dovrebbero più pensare che le equazioni di reazione servono per prevedere o "calcolare" i prodotti che devono formarsi, che i coefficienti stechiometrici corrispondano alle quantità aggiunte nel sistema, che il sistema esista solo in due stati: "solo reagenti" e "solo prodotti".

Riferimenti

- [1] A. H. Schoenfeld, On mathematics sense making: An informal attack on the unfortunate divorce of formal and informal mathematics, in J. F. Voss, D. N. Perkins, J. W. Segal, *Informal reasoning and education*, Lawrence Erlbaum Associates Inc., 1991 pp. 311-343.
- [2] J. Dalton, *A New System of Chemical Philosophy*, R. Bickerstaff, Strand, London, 1808, Chap. II, p. 142. Disponibile, in alcuni stralci, come riproduzione da HardPress, Miami (FL), dal sito di Carmen Giunta: <https://web.lemoyne.edu/~giunta/ea/daltonann.html> (ultimo accesso, novembre 2023).
- [3] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. 1, Masson ed., 1990, Cap.1, pp. 1-3.
- [4] G. Villani, *L'interpretazione chimica del vivente*, Clueb, Bologna, 2023, pp. 14-18.
- [5] B. Worley, D. Paterson, *Understanding chemistry through microscale practical work*, The Association for Science Education, Hatfield (UK), 2021.
- [6] A. Tifi, Integrating collaborative concept mapping in case based learning, *J. for Educators, Teachers and Trainers*, 2013, 4(1), 154-163: [https://www.ugr.es/~jett/pdf/vol04\(1\)_13_jett_tifi.pdf](https://www.ugr.es/~jett/pdf/vol04(1)_13_jett_tifi.pdf) (ultimo accesso: gennaio 2024).

Collegamento alle Appendici (file pdf)

Queste includono istruzioni utilizzate nelle prime sperimentazioni dell'anno scolastico 2022-2023 e le schede operative.

Appendice 1: *Sistema chimico e reazioni chimiche. Guida da leggere con gli alunni*

Appendice 2: *Sistema chimico e reazioni chimiche. Guida per il docente*

Appendice 3: *Otto schede operative pronte per la stampa, per un totale di 24 attività*

Chimica e Sostenibilità: un gioco da ragazzi!

Francesca Deganello^a, Maria Luisa Testa^a, Alberto Zanelli^b, Riccardo Lucentini^b, Andrea Ienco^c, Massimo Calamante^c, Claudia Vineis^d, Alessio Varesano^d, Armida Torreggiani^b

^aCNR - Istituto per lo Studio dei Materiali Nanostrutturati (ISMN), Palermo; ^bCNR - Istituto per la Sintesi Organica e la Fotoreattività (ISOF), Bologna; ^cCNR - Istituto di Chimica dei Composti OrganoMetallici (ICCOM), Sesto Fiorentino; ^dCNR - Istituto di Sistemi e Tecnologie Industriali Intelligenti per il Manifatturiero Avanzato (STIIMA), Biella

e-mail: francesca.deganello@cnr.it

Abstract. Thanks to a collaborative network of CNR Institutes located throughout Italy, created as part of the project *Change the Game: Playing to prepare for the challenges of a sustainable society*, a number of playful-educational activities concerning the teaching of science and sustainability at elementary school have been designed, developed and successfully tested. Indeed, it has been shown how play fosters interest in the topic addressed and develops the child's problem-solving and critical thinking aptitude. In this paper, four play-educational paths related to chemistry and sustainability are proposed entitled "Touch, Contact, Chemistry and Sustainability", "The Recycling Game", "Discovering Animal Fibers", and "The Colors of Energy".

Keywords: giochi educativi; chimica; sostenibilità; esperimenti; celle solari; biodiversità; scuola primaria

1. Premessa

Per promuovere tra i giovani le conoscenze sui temi della ricerca di frontiera collegata al Green Deal europeo e agli obiettivi dello sviluppo sostenibile (SDG) dell'Agenda ONU 2030, e indurre un cambiamento culturale della società verso comportamenti più vicini all'economia circolare, si è costituita una rete di 15 istituti CNR distribuita in 10 regioni italiane, grazie al supporto di un progetto nazionale dal titolo *Change the Game: giocare per prepararsi alle sfide di una società sostenibile-Changegame*, finanziato da progettidiricerca@CNR (<https://www.changegame.cnr.it/>). La strategia metodologica è quella di realizzare e promuovere giochi educativi per le scuole su temi come sostenibilità ed economia circolare, offrendo ai giovani un apprendimento più motivante a partire dai banchi di scuola, che mostri loro il ruolo fondamentale della scienza per lo sviluppo sostenibile. Grazie a un approccio ludico è possibile far riflettere gli studenti su sistemi complessi in quanto

gli obiettivi di apprendimento sono inclusi nell'argomento e nelle regole del gioco, dove i giocatori aumentano autonomamente le proprie conoscenze. Le tipologie di giochi educativi comprendono quiz, puzzle, giochi di ruolo e di movimento, giochi da tavolo e giochi con esperimenti. Inoltre, i serious games riproducono scenari verosimili in cui l'utente protagonista prende parte a una simulazione che ha scopi educativi e consentono un attivo coinvolgimento dei partecipanti [1-3].

Poiché l'istruzione alla scuola primaria svolge un ruolo cruciale nel costruire delle solide fondamenta del percorso della società verso la sostenibilità, parte del progetto è stato dedicato alle classi dei più piccoli. Il bambino gioca, si diverte, si sente protagonista e intanto impara. Sebbene la chimica, come disciplina in sé, non sia prevista alla scuola primaria, è centrale a molte altre discipline scientifiche e proporre un'esperienza laboratoriale di chimica, focalizzata sui concetti di base, può essere molto utile. D'altra parte, il concetto di sostenibilità è spesso ridotto al solo rispetto dell'ambiente con poco margine verso l'approccio laboratoriale, sebbene copra anche altri aspetti, come società ed economia. È, invece, fondamentale che tutti i bambini conoscano, attraverso esperienze pratiche, i fondamenti della sostenibilità. La maggior parte degli esempi in letteratura, che testimoniano l'efficacia della didattica della chimica e della sostenibilità per le scuole attraverso i serious games, si rivolge alle scuole secondarie, riguarda giochi digitali, e tratta separatamente la chimica oppure l'ambiente [4-6].

In questo lavoro si descrivono quattro percorsi ludico-educativi che riguardano sia la chimica che il suo ruolo nella sostenibilità, declinata nei suoi tre ambiti principali, quali ambiente, economia, e società. I percorsi sono *"Tatto, contatto, chimica e sostenibilità"*, *"Il Gioco del Riciclo"*, *"Alla scoperta delle fibre animali"*, e *"I colori dell'energia"*. Questi quattro percorsi, che danno indicazioni su come è possibile contribuire al raggiungimento degli SDG n. 4, 6, 7, 11, 12, 13, 14 e 17 dell'Agenda ONU 2030, sono stati testati con successo con alcune classi e vengono qui proposti come attività laboratoriali sulla chimica e sulla sostenibilità per le classi della scuola primaria, come approfondimento del programma di studi di scienze e educazione civica.

2. Percorso 1: Tatto, contatto, chimica e sostenibilità

Il primo percorso, ideato dal CNR-ISMN Palermo, è un incontro con la chimica attraverso il tatto, dove i bambini toccano gli oggetti e partecipano attivamente agli esperimenti dimostrativi, e il con-tatto, dove è in primo piano il movimento del corpo sotto forma di giochi di movimento e danze. Esso è stato realizzato per la prima volta con le seconde e terze classi primarie dell'Istituto Minutoli di Palermo nel 2017 e perfezionato in successive occasioni. La partecipazione e il coinvolgimento dei bambini agli esperimenti è fondamentale e devono essere costantemente incoraggiati.

In una prima fase del percorso gli alunni vengono guidati a fare esperienza e a riflettere su alcuni concetti base della sostenibilità, riportando gli SDG nella loro vita quotidiana. Materiali e oggetti di uso quotidiano sono l'ideale per attrarre l'attenzione dei bambini [7]. I contenuti trattati affrontano elementi della Tavola Periodica, molecole, miscugli omogenei ed eterogenei, solubilità, calore e passaggi di stato.

Nella seconda fase del percorso, oltre all'esperienza tattile dovuta alla partecipazione attiva all'esperimento, si propone al bambino anche un'esperienza che coinvolga il con-tatto con gli altri compagni riproducendo le relazioni fra atomi e molecole. La "danza delle molecole" consente al bambino di sperimentare in prima persona come si muovono le molecole in situazioni diverse in termini di ambiente e temperatura. Gli alunni e le alunne rappresentano gli stessi atomi o molecole e le loro azioni sono guidate prendendo ispirazione dalle reazioni chimiche e dal comportamento dei materiali.

La prima attività di questo percorso è intitolata "Il sale e le saline". L'esperimento di dissoluzione del sale, già proposto in letteratura, sia per la scuola primaria che per la scuola dell'infanzia in diversi contesti didattici [8,9], viene qui utilizzato come pretesto per guidare il bambino nel collegare il mondo della chimica alla sua esperienza quotidiana. Le domande, le associazioni e il confronto con i compagni lo aiutano a riflettere, elaborare e imparare. La figura 1a mostra alcuni bambini che stanno facendo diretta esperienza su come il sale viene sciolto in acqua, in riferimento anche alla sua estrazione nelle saline di Marsala (TP). Nella figura 1b, un gruppo mima la dissoluzione del sale da cucina in acqua attraverso una "danza delle molecole". Il bambino "Sodio" e il bambino "Cloro" vengono piano piano separati l'uno dall'altro per intervento dei bambini "Ossigeno" e delle bambine "Idrogeno" che formano le "molecole di acqua" e li circondano, rappresentando il sale che si comincia a sciogliere, e ricordando il momento dell'esperimento in cui il sale si riconosceva chiaramente come una polvere bianca che poi non era più visibile. Un'altra "danza delle molecole" può essere proposta per il processo inverso che accade nelle saline. Utilizzando questo stesso approccio, i bambini sono guidati a fare esperienza sulla trasmissione del calore da un corpo a un altro e a rappresentare i passaggi di stato dell'acqua. I bambini intuiscono così che dentro la materia c'è qualcosa di molto piccolo che si chiama "molecola" e che il mondo nasconde molto di più di ciò che si vede con gli occhi. Cominciano anche a capire che le molecole sono formate da entità ancora più piccole che si legano un po' come i mattoncini del Lego per le costruzioni e che il contatto è indispensabile affinché le molecole possano interagire fra loro, rompendo/formando legami per creare una materia con caratteristiche diverse.

L'altra attività del percorso si intitola "Ripuliamo il mare dal petrolio" e aiu-

ta a comprendere alcune caratteristiche dei materiali (idrofobo-idrofilo). Per introdurre il concetto di idrofobo e idrofilo si parte dal classico esperimento acqua-olio e della loro immiscibilità, dovuta a caratteristiche diversissime (composizione e densità) e quindi alla loro “incompatibilità”. Facendo analogie tra olio e petrolio, si può fare riferimento all’inquinamento, al risanamento ambientale e ai materiali per la sostenibilità. Infatti, parlare di chimica significa parlare di materiali e trasformazioni, ma anche di ambiente, di economia, di tecnologie e di società. Si chiede ai bambini di toccare la sabbia idrofoba dopo averla immersa in acqua: la sabbia risulta asciutta essendo incompatibile con l’acqua (è idrofoba, appunto) (Figura 1c). Quando, invece, viene aggiunto l’olio (“il petrolio”), la sabbia risulta bagnata perché ha affinità con l’olio e lo cattura (Figura 1d). Anche in questo caso l’esperimento può essere associato a una “danza delle molecole”.



Figura 1. a) Attività “Il sale e le saline”; i bambini partecipano al semplice esperimento sulla dissoluzione del sale messo in relazione alle Saline di Marsala, b) eseguendo una “danza delle molecole” per rappresentare la dissoluzione del cloruro di sodio, il componente più abbondante del sale da cucina, c) Attività “Ripuliamo il mare dal petrolio”: la sabbia idrofobica rimane asciutta in acqua e d) si bagna solo quando entra in contatto con l’olio

È importante sottolineare che lo scopo di questo percorso è di proporre due concetti fondamentali: i) ciò che vediamo è formato da componenti più piccoli e invisibili ad occhio nudo; ii) questi componenti sono in relazione fra loro e da questo dipendono le proprietà del materiale. Non si intende quindi introdurre la teoria atomica alla scuola primaria, affrontando il tema della struttura atomica-molecolare della materia, che è bene affrontare nelle classi successive [10]. L'attività intende aumentare l'interesse e la curiosità dei bambini verso la scienza e il desiderio di trovare risposte su come il mondo funziona e come e perché le cose accadono, tutte idee che sono alla base di una scelta futura di carriere scientifiche [11]. Vari studi, infatti, sottolineano come i bambini siano attratti da concetti astratti e complessi e quanto sia importante stimolare, attraverso il gioco, l'immaginazione creativa del bambino, incrementando la sua curiosità per il mondo che lo circonda [12, 13]. Inoltre, rappresentando in prima persona gli elementi e le molecole, i bambini capiscono che, così come fanno le molecole, la collaborazione costruttiva al servizio del bene comune è alla base della società in cui ognuno gioca un ruolo fondamentale.

3. Percorso 2: Il gioco del riciclo

Comprendere bene il valore delle materie prime e la necessità di ridurre, separare, riutilizzare e riciclare i rifiuti è fondamentale per allontanarsi dall'economia lineare e accostarsi all'economia circolare [14]. Il gioco del riciclo, pensato per un target di età compreso tra i 7 e gli 11 anni e sviluppato dall'Istituto CNR-ISOF Bologna, coinvolge gli studenti in un'attività focalizzata sulla tematica degli scarti e del riciclo, sull'importanza di riconoscere i materiali di cui sono fatti gli oggetti di uso quotidiano e la capacità di smistarli correttamente. Tramite una dinamica di gioco semplice come quella del Gioco dell'Oca, i bambini rafforzano la propria conoscenza sul corretto smistamento dei materiali e sull'importanza di queste azioni per l'ambiente. Infatti, il primo step nel processo di riciclo dei materiali è la loro corretta separazione. La raccolta differenziata si inserisce nel più ampio contesto dell'economia circolare, un modello economico che suggerisce un approccio innovativo alle materie prime, ai prodotti e ai rifiuti, con una visione rigenerativa basata sul principio delle 5 R:

1. Rifiutare quello che non serve
2. Ridurre quello che serve: ridurre la quantità di oggetti posseduti per ridurre la quantità di dispositivi che finisce nella spazzatura;
3. Riparare gli oggetti rotti, così da prolungarne il ciclo di vita;
4. Riutilizzare: trovare un nuovo scopo a un oggetto che ha terminato il compito per cui è stato progettato;
5. Riciclare quello che non si può rifiutare, ridurre, riparare o riutilizzare

Giocando al Gioco del Riciclo si può verificare quanto si sa davvero sul riciclo quotidiano e trasformare una routine “noiosa” in qualcosa di divertente. L’approccio ludico di questo strumento educativo offre un metodo divertente per rafforzare la conoscenza sul riciclo quotidiano e la sua importanza per l’economia e l’ambiente. Il materiale da gioco è stato preparato per giocare in spazi ampi (Figura 2a). È anche possibile giocare a squadre, rafforzando così la capacità di cooperazione. I bambini sono poi invitati a creare un oggetto con i materiali di scarto (Figura 2b). Il gioco è stato testato con successo con cinque classi elementari presso la scuola Mader di Bologna nel 2022-2023.



Figura 2. a) Test del Gioco del Riciclo effettuato in una scuola primaria di Bologna durante a.s. 2021-2022; b) pedina costruita dai bambini con materiali di scarto, ispirandosi a Wally-E (personaggio della Disney)

4. Percorso 3: Alla scoperta delle fibre animali

Questo percorso, ideato dal CNR-STIIMA di Biella, comprende due attività sperimentali e un gioco da tavolo e pone l’accento sull’importanza della sostenibilità ambientale, sull’impiego sostenibile di risorse naturali e sulla biodiversità.

La lana che deriva dalla tosa di ovini allevati per l’industria casearia e della carne non è utilizzabile nell’industria tessile. La tosa annuale di tali ovini produce grandi volumi di lane di bassa qualità che rappresentano un problema ambientale, in quanto la loro combustione è inquinante. I ragazzi in laboratorio hanno l’opportunità di estrarre la cheratina, proteina che costituisce le fibre animali, per un suo utilizzo come materiale innovativo. Il primo esperimento (Figura 3a) si focalizza su due aspetti principali: l’estrazione chimica della cheratina dalla lana, mediante l’utilizzo di una base forte come NaOH, e la flocculazione e precipitazione della stessa cheratina in soluzioni acide.

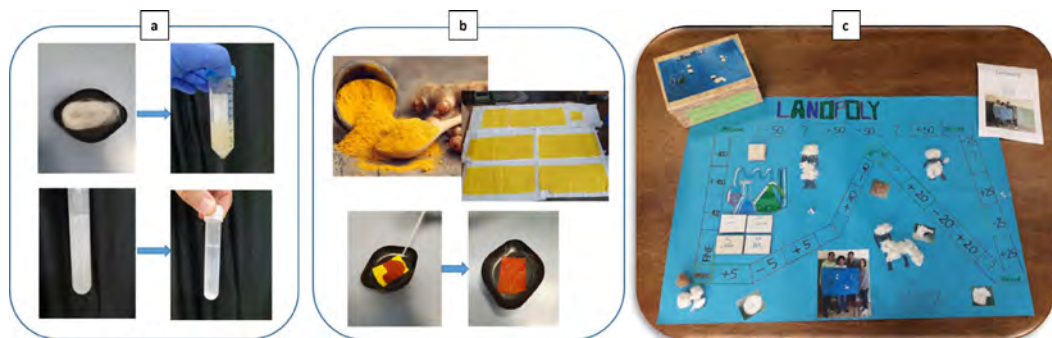


Figura 3. a) Estrazione e flocculazione della cheratina dalle fibre di lana; b) viraggio del colore al variare del pH dei tessuti tinti con curcuma; c) tabellone di gioco di Lanopoly

Il secondo esperimento (Figura 3b) prevede l'uso di coloranti naturali per la tintura in campo tessile, in quanto è di fondamentale importanza l'utilizzo di materie naturali per la sostenibilità ambientale. Tali sostanze sono sicure, non tossiche e biodegradabili. In particolare, la *Curcuma Longa* è comunemente impiegata come colorante naturale sia nell'industria tessile sia in quella alimentare in quanto ha proprietà antibatteriche, antifungine, antiossidanti e antinfiammatorie. Inoltre, ha la proprietà di cambiare colore in base al pH della soluzione con cui viene messa a contatto. I ragazzi hanno l'opportunità di tingere tessuti di cotone con polvere di Curcuma e, immergendoli in soluzioni a diverso pH, osservare immediatamente il viraggio di colore dei tessuti a seconda dell'acidità della soluzione, dal giallo al rosso scuro e viceversa (Figura 3b).

Inoltre, all'interno del Network italiano "Il linguaggio della ricerca" gli studenti della scuola secondaria di primo grado G. Pella di Valdengo (BI), dopo aver visitato i laboratori del CNR-STIIMA e aver assistito agli esperimenti proposti, hanno ideato e sviluppato un gioco da tavolo, "Lanopoly" (Figura 3c), ispirato al ben noto Monopoli, ma con l'utilizzo delle fibre animali. Il gioco rientra nell'attività di imparare giocando per distinguere le differenti specie animali e vegetali che forniscono all'uomo le principali fibre naturali alla base del mondo tessile. Avere consapevolezza dello sviluppo sostenibile attraverso la biodiversità delle specie e i prodotti da esse derivati, esclusivamente giocando e senza l'utilizzo di lezioni frontali, è lo scopo principale del gioco realizzato dai ragazzi. Attraverso domande specifiche, presenti nelle caselle Imprevisti, ci si può mettere in gioco utilizzando le proprie conoscenze sull'intera filiera tessile e il riciclo di materiali di scarto. L'utilizzo di fibre più o meno pregiate come moneta di scambio, dà al tempo stesso il valore commerciale dell'intero settore tessile e restituisce consapevolezza ai ragazzi dell'importanza di uno sviluppo sostenibile.

5. Percorso 4: I colori dell'energia

CNR-ICCOM Firenze ha sviluppato un'esperienza didattica sul tema dell'energia e sostenibilità da svolgere in classe in due ore. Lo scopo è approfondire il concetto di energia, mostrare la quantità di energia utilizzata nelle semplici azioni quotidiane e riflettere sulla dipendenza dalla combustione per le nostre necessità di energia. Viene, inoltre, sottolineata la natura interdisciplinare della ricerca sul tema energetico e il ruolo della chimica in questo campo. Il percorso è diviso in una lezione introduttiva di circa 45 minuti e un'attività sperimentale che prevede la costruzione di celle solari a coloranti (DSSC) con coloranti di origine naturale (es. mirtillo) [15]. Nella presentazione iniziale, si introducono, utilizzando un approccio colloquiale e interattivo, due concetti non banali: cos'è l'energia e come si fa a quantificarla. Dopo aver preso coscienza delle diverse forme in cui ci può apparire l'energia, si propone di quantificare l'energia utilizzata nelle azioni quotidiane introducendo la metafora dello "schiavo energetico" come misura di energia [16]. Lo schiavo ciclista produce un'energia pari a 50 Wh, cioè 50 W per ogni ora di pedalata. Questo permette di calcolare attraverso un dialogo con la classe quanto lavoro degli schiavi energetici serve per guardare un'ora di televisione, asciugarsi i capelli, essere accompagnati in auto a scuola e per il decollo di un aereo di linea. Introducendo il concetto di fonte energetica, si mostra che i nostri schiavi energetici sono il carbone, la benzina e il metano, sostanze che in poco spazio contengono un numero notevole di schiavi. Infine, parliamo del Sole come fonte energetica capace di inviare sulla Terra in meno di due ore tanti schiavi energetici quanti ne servono per il fabbisogno energetico mondiale. Dato che il problema è catturarli, mostriamo le metodologie usate dai chimici e, in particolare, il funzionamento delle celle solari a colorante. Si passa, infine, all'attività sperimentale in cui la classe è divisa in gruppi di 4/5 alunni e consta di quattro fasi: preparazione degli elettrodi, preparazione del colorante, sensibilizzazione degli elettrodi e, quindi, costruzione e verifica del funzionamento delle celle.

A ciascun gruppo vengono consegnati due quadrati di vetro conduttore. Su uno dei due vetri, quello che diventerà l'anodo, viene preparata una maschera utilizzando del nastro adesivo, lasciando una zona centrale non coperta di forma rettangolare (Figura 4a). Sulla zona centrale viene spalmata con una bacchetta di vetro una pasta precedentemente preparata dagli studenti e composta da ossido di titanio e acqua e acido nitrico diluito (Figura 4b). Dato che l'elettrodo dovrebbe essere scaldato a 500 °C, agli studenti viene consegnato un elettrodo precedentemente sinterizzato. Il catodo viene, invece, preparato colorando la faccia conduttrice del vetro con una matita, ovvero depositando uno strato di grafite (Figura 4c). L'anodo viene colorato immergendolo nel succo ottenuto dalla spremitura di mirtillo o frutti di bosco (Figure 4d e 4e). La cella finale viene quindi assemblata utilizzando l'anodo colorato, la soluzione di elettrolita I_2/I_3^- e il catodo (Figura

4f). La cella viene quindi collegata a un piccolo motore elettrico (Figure 4g e 4h). Quando la cella viene illuminata, la corrente elettrica prodotta è in grado di far girare un motore con una piccola elica, dimostrando che il dispositivo è in grado di trasformare l'energia luminosa in corrente elettrica e poi in energia meccanica.

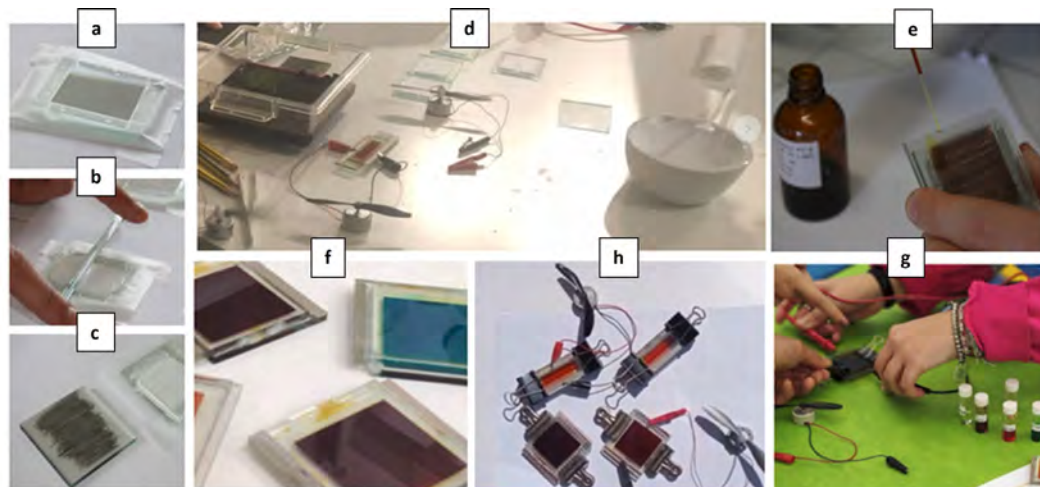


Figura 4. Varie fasi della costruzione della cella: a-b) preparazione dell'anodo per la stesura dell'ossido di titanio, c) preparazione del catodo colorato con la matita, d) vaschetta per colorazione dell'anodo, e-f) catodo e anodo vengono uniti con all'interno una soluzione di elettrolita, g-h) le celle assemblate sono usate per muovere una ventola

L'esperienza didattica nell'anno scolastico 2022/23 è stata svolta in 5 classi dell'I. C. Pirandello di Firenze, coinvolgendo circa 120 studenti di 5 elementare ed è stata proposta per attività didattiche al Museo Galileo di Firenze. Modulando il grado di approfondimento dei vari aspetti toccati, l'esperienza può essere utilizzata per differenti fasce di età, dalle elementari alle scuole secondarie.

6. Conclusioni

Sono stati descritti quattro percorsi laboratoriali sulla chimica e la sostenibilità, che possono essere svolti in presenza con gli alunni e le alunne della scuola primaria. Come visto, il connubio chimica e sostenibilità permette di osservare il mondo in un contesto più ampio, dal piccolissimo al grandissimo, dove ogni cosa e ogni persona ha il suo importante ruolo/responsabilità. Inoltre, tramite queste attività si vuole dare un contributo agli SDG, insegnando ai bambini a rispettare l'ambiente e i compagni, ad apprezzare la collaborazione, a evitare gli sprechi, e a coltivare le proprie abilità e i propri sogni a vantaggio della comunità. Il gioco attrae l'attenzione dei bambini e

li conduce verso una maggiore apertura all'apprendimento. I temi proposti rientrano bene nel programma di scuola primaria e possono essere intesi come un consolidamento/approfondimento di una parte del programma di scienze e di educazione civica. I bambini imparano che la chimica è invisibile, ma i suoi effetti si possono toccare con mano e sono stimolati a usare fantasia e creatività per immaginare ciò che non si vede. Familiarizzano con i rifiuti, la loro importanza e la loro classificazione. Esplorano il mondo degli animali e, intanto, scoprono il valore della biodiversità e le caratteristiche principali delle fibre animali. Infine, imparano a collaborare per creare qualcosa che da soli non potrebbero ideare e iniziano a capire che ognuno, nel suo piccolo, ha un ruolo importante nella società.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il progetto *Change the Game: Giocare per prepararsi alle sfide di una società sostenibile* (Progettidiricerca@CNR) e *Raw Matters Ambassadors at Schools - RM@Schools 4.0*, PA n. 20069, finanziato da EIT/EIT RawMaterials). Gli autori ringraziano inoltre C. Aliotta e M. Russo per la collaborazione all'organizzazione di alcune attività.

Riferimenti

- [1] E. Benvenuti, L. Forini, A. Torreggiani, A. Zanelli, Eco-CEO™: Understand the circular economy by playing, *Proceedings of the International Conference "The future of education 2020"*, pp. 162-167.
- [2] A. Torreggiani, A. Zanelli, M. C. Canino, A. Degli Esposti, E. Benvenuti, R. Lapinska-Viola, L. Forini, M. Turinetto, RAWsiko – Materials around us: A digital serious game to teach about raw materials' importance for the transition towards a low-carbon economy, *10th International Conference New Perspectives in Science Education 2021*, pp. 322-328.
- [3] N. Kara, A systematic review of the use of serious games in science education, *Contemporary Educational Technology*, 2021, **13**, 295.
- [4] A. Filippas, S. Xinogalos, Elementium: design and pilot evaluation of a serious game for familiarizing players with basic chemistry, *Educ. Inf. Technol. (Dordr)*, 2023, **28**, 14721.
- [5] A. M. Ochs, J. M. Dee, A. M. Arnold, K. A. Barber, E. P. Zovinka, Connecting active artwork to Chemistry: leading students in inquiry-based learning of density and viscosity, *J. Chem. Educ.*, 2023, **100**, 3703.
- [6] C. K. W. Tan, H. Nurul-Asna, Serious games for environmental education, *Integrative Conservation*, 2023, **2**, 19.
- [7] M. L. Testa, F. Deganello, M. L. Tummino, Chimica alla scuola primaria, *CnS*, 2016, **3**, 21.
- [8] K. Vernassa, F. Turco, Materiali omogenei ed eterogenei alla scuola dell'infanzia, *CnS*, 2023, **1**, 60.
- [9] L. Ricco, M. M. Carnasciali, Esperienze di successo nella formazione di

Scienza scuola primaria, *Chemistry all around network community*, 2011 (https://chemistrynetwork.pixel-online.org/files/SUE_papers/IT/IT_Success_IT.pdf).

- [10] C. Fiorentini, *Rinnovare l'insegnamento delle scienze: aspetti storici, epistemologici, psicologici, pedagogici e didattici*, Aracne Editrice, Ariccia, 2018.
- [11] G. Venville, L. Rennie, C. Hanbury, N. Longnecker, Scientists reflect on why they chose to study science, *Research in Science Education*, 2013, **43**, 2207.
- [12] C. Haeusler, J. Donovan, Challenging the science curriculum paradigm: Teaching primary children atomic-molecular theory, *Research in Science Education*, 2020, **50**, 23.
- [13] T. A. Holme, Can we envision a role for imagination in Chemistry learning? *J. Chem. Educ.*, 2021, **98**, 3615.
- [14] F. Olmi, Per realizzare la transizione ecologica è necessario puntare decisamente sull'economia circolare, *CnS*, 2022, **1**, 23.
- [15] Y. R. Smith, E. Crone, V. Subramanian, A simple photocell to demonstrate solar energy using benign household ingredients, *J. Chem. Educ.*, 2013, **90**, 1358.
- [16] N. Armaroli, V. Balzani, *Energia per l'astronave Terra: l'era delle rinnovabili*, Zanichelli, Bologna, 2017.

Pioggia e acqua

Mauro Icardi

*Tecnico del ciclo idrico, redattore e collaboratore
del blog "La chimica e la Società"
e-mail: siricarotiscali.it*

Abstract. When we reflect on water, we too often only concern ourselves with the effects that scarcity or compromised quality may have on the human community. The comments I read on articles dealing with the drought issue are totally anthropocentric. The drought problem is commented on with the idea that it is technological innovations that will solve the problem, as if personal attention and commitment take second place when it comes to having the necessary respect and care in the use of water. If we educate ourselves all together to use water carefully, without wasting a single drop, taking care of it, if we learn to know and respect it, if we know it better, we will help the only planet we have. In such a way, we will also be better people, people who, when they wake up and see that it is raining, no longer snort because there is bad weather outside, but think about how wonderful the water cycle is that quenches the thirst of our only planet.

Keywords: Acqua; biodiversità; educazione idrica

La filastrocca di Gianni Rodari che comincia "Tic e tac, la pioggia cade ..." può essere utilizzata per ricordare ai bambini che l'acqua, la pioggia che è tanto mancata in questi ultimi anni, rappresenta la vita: la vita per i campi, per tantissimi animali e per noi esseri umani. L'acqua è un composto chimico semplice e assolutamente meraviglioso. Siamo abituati a vedere l'acqua scorrere dai rubinetti dentro le nostre case e non pensiamo ai ragazzi meno fortunati di noi, ad esempio quelli dell'Africa dove le mamme devono fare chilometri a piedi per andare a procurarsi l'acqua in pozzi o sorgenti che spesso sono inquinati. Devono camminare con recipienti sulla testa e portare l'acqua nei loro villaggi. Se ci educiamo tutti insieme ad usare l'acqua con attenzione, senza sprecarne nemmeno una goccia, avendone cura, se impariamo a conoscerla e a rispettarla, se

la conosciamo meglio, faremo un favore al pianeta. E saremo anche persone migliori, persone che, quando si svegliano e vedono che piove, non sbuffano più perché fuori c'è il brutto tempo, ma pensano a quanto è meraviglioso il ciclo dell'acqua che spegne la sete del nostro unico pianeta. Anche una goccia d'acqua ha la capacità di amare quando cade su di un filo d'erba ingiallito e lo disseta.

Romano Battaglia

L'approssimarsi dell'estate si può ormai riconoscere da due fenomeni ricorrenti.

Il primo riguarda gli incendi boschivi, piaga che sembra quasi una maledizione, ma dipende invece dal disinteresse per il rispetto ambientale e che è anche causata da disturbi comportamentali. Il piromane è attirato dagli effetti del fuoco e può appiccarli per vandalismo, profitto personale o vendetta.

Il secondo fenomeno, che si sta verificando negli ultimi anni e con un peggioramento significativo, è quello della ricorrente siccità. Il modificarsi del regime delle piogge, i sempre più evidenti fenomeni estremi, sia di siccità prolungate che di scarso innevamento invernale, si ripercuotono in maniera evidente nel comparto della gestione del ciclo idrico integrato, settore nel quale lavoro da oltre trent'anni.

Già nel 2011 l'Organizzazione Mondiale della Sanità si è preoccupata di emanare linee guida per la fornitura idrica e il trattamento di potabilizzazione durante il verificarsi di eventi meteorologici estremi.¹

Eventi di questo genere mettono sotto pressione le strutture di distribuzione e di depurazione; quindi, occorre dotare le aziende di efficaci piani di intervento. Allo stesso tempo, a eventi violenti e concentrati di precipitazioni piovose, fanno spesso seguito periodi piuttosto lunghi di assenza di precipitazioni; quindi, occorre predisporre usi razionali dell'acqua. E questo non deve essere impegno solo delle aziende fornitrici, ma dovrebbe esserlo di ogni singolo utente. Per quanto attiene al settore depurativo, che patisce maggiormente le repentine variazioni dei flussi idraulici, vale comunque l'invito a non gettare nei wc materiali estranei e non biodegradabili: è una regola ancora troppo spesso sottovalutata. Interventi straordinari di manutenzione e di pulizia sono necessari per liberare le sezioni di trattamento da materiali estranei che oltrepassano la sezione di grigliatura. Spesso il trattamento di depurazione è conosciuto da non molte persone e questo porta a buttare tutto nel wc alla rinfusa.

Sento che esiste la necessità di educare all'uso dell'acqua e, allora, si può partire dalle parole.

Quali parole possiamo ancora usare, parole che facciano capire l'importanza dell'acqua? Che l'acqua sia indispensabile alla vita è un concetto molto ripetuto-

¹ WHO Guidance in water supply and sanitation in extreme weather events.

to, quasi abusato, ma forse non compreso nella sua importanza. Vivo in provincia di Varese dove le persone ricordano inverni freddi e nevosi, mentre negli ultimi anni la neve qui è stata quasi del tutto assente. Massimiliano Pasqui, climatologo del CNR, in un'intervista ha detto che servirebbero 50 giorni di pioggia per contenere il problema della siccità nel Nord Italia. Il deficit idrico del Nord Ovest ammonta a 500 mm. Le Alpi sono un territorio fragile, i ghiacciai arretrano. La consapevolezza si fa strada con fatica perché buona parte delle persone che vivono nelle località alpine sono esclusivamente preoccupate per il destino delle stazioni sciistiche. Solo chi ha maturato una maggiore consapevolezza suggerisce un nuovo modo per godere la montagna, uscendo dal pensiero unico che vuole che in montagna si vada unicamente per sciare. La riduzione di acqua nei torrenti alpini può avere effetti sulle catene alimentari e comprometterne la biodiversità. Vengono ancora ipotizzati progetti per la costruzione di impianti di innevamento artificiale nelle zone di media montagna, quando ormai lo zero termico si sta situando intorno ai 3.000 metri. Secondo uno studio del WWF ogni anno per il funzionamento di questi impianti si consumano 95 milioni di metri cubi di acqua e 600 gigawattora di energia.

Per quanto riguarda la necessità naturale e fisiologica di bere per idratare il nostro corpo, assistiamo ad un incessante martellamento pubblicitario che ci suggerisce l'acquisto di "super acque", arricchite di elettroliti e proteine. Questo di fatto significa che si sta lavorando a un potenziamento funzionale dell'acqua che non si limita alle caratteristiche che l'acqua potrebbe avere naturalmente. Vengono ancora chiamate acque, anche se ormai la parola ha perso il suo significato originario, finendo per definire una categoria di merce più che un composto.

Credo si debba lavorare sulla percezione dell'acqua. Non solo ragionando su quella che beviamo, che in Italia relativamente all'acqua potabile rappresenta il 7%, ma anche su tutto il resto che riguarda l'uso in cucina, nell'igiene personale e nel lavaggio indumenti.

Sarebbe necessario riflettere sulla nostra futura disponibilità di acqua. Il modificarsi del regime delle precipitazioni è evidente. La mancanza di innevamento sui rilievi mette a rischio la salute delle montagne e dei ghiacciai e



rischia di compromettere la fornitura di acqua per uso irriguo. Il Segretario Generale dell'Autorità Distrettuale del fiume Po, in merito allo stato idro-climatico del bacino Padano, ha dichiarato che: "La situazione è drammatica. E a preoccupare sono le falde ormai molto basse, quell'acqua che arriva dal sottosuolo è vita per la pianura".

Ritengo urgente, necessario e non rimandabile, educare e educarci ad un uso corretto, parsimonioso e rispettoso dell'acqua. L'educazione idrica deve partire dallo studio della molecola dell'acqua e dalle sue particolarità, cioè in un ambito di studio prettamente chimico, per poi allargare l'orizzonte su concetti di ecologia, biologia, idraulica. La conoscenza amplia le vedute, produce nuove idee e aiuta a combattere le distorsioni percettive e le negazioni, che purtroppo coinvolgono il tema acqua, nei suoi diversi aspetti.

Sappiamo che l'acqua non è tutta uguale, sappiamo che l'acqua per il consumo umano è diversa da quella per l'alimentazione di una caldaia. Abbiamo la possibilità di studiare, conoscere, e approfondire sempre di più quello che sappiamo su questo composto tanto umile e indispensabile.

Possiamo approcciarci all'acqua da diversi punti di vista, utilizzando diverse discipline, ma, se ne capiamo realmente l'importanza e l'unicità, l'acqua continuerà ad affascinarci e meravigliarci.

La nuova edizione del Piano Lauree Scientifiche

Ugo Cosentino

Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra,

Università Milano Bicocca

e-mail: ugo.cosentino@unimib.it

Abstract. The Piano Lauree Scientifiche has been implementing orientation actions for the continuation of university studies in the scientific field and activities aimed at the professional development of in-service teachers for more than fifteen years. These actions are carried out in close synergy with the other planned actions: the reduction of the university dropout rate, self-evaluation activities and laboratories for teaching basic sciences. These approaches offer numerous ideas also in the context of a renewal of university teaching.

Keywords: Piano Lauree Scientifiche; immatricolazioni universitarie; carriere universitarie; didattica universitaria

1. Introduzione

Con il Decreto del 4 agosto 2023 è stato approvato il nuovo finanziamento del Progetto Nazionale di Chimica del Piano Lauree Scientifiche [1]. Il progetto, al quale aderiscono tutte le 32 sedi italiane nelle quali è presente un corso di studio della Classe L-27 Scienze e Tecnologie Chimiche (per un totale di 45 corsi di studio), ha una valenza triennale e coprirà le attività svolte fino a novembre 2026.

Il Piano Lauree Scientifiche (PLS) è stato avviato dal MIUR nel 2005, con l'obiettivo di promuovere le immatricolazioni nei corsi di studio delle lauree scientifiche, ridurre gli abbandoni universitari, migliorando le carriere degli studenti universitari, e contribuire alla crescita professionale dei docenti della Scuola Secondaria in ambito STEM [2]. Da più di 15 anni il PLS realizza interventi con lo scopo di consentire agli studenti di compiere scelte consapevoli, ovvero superando stereotipi che, nell'ambito scientifico (ma forse non solo), riguardano: le discipline, le questioni di genere, le prospettive occupazionali [3].

Per realizzare questo obiettivo, il PLS ha da sempre intrecciato il tema dell'orientamento con il tema del miglioramento dell'insegnamento delle materie scientifiche, realizzando laboratori co-progettati per l'insegnamento delle scienze di base che rappresentassero, ancor prima che un luogo fisico attrezzato, uno spazio per l'apprendimento attraverso l'indagine e la discussione, nel

quale lo studente può svolgere in prima persona un ruolo attivo. E la co-progettazione delle attività, realizzata insieme dai docenti della Scuola e dell'Università, ha rappresentato per i docenti della Scuola un'occasione per la loro crescita professionale, finalizzata al miglioramento della loro didattica.

In questo contributo sarà presentata brevemente una fotografia dei CdS della Classe L-27 e a seguire le azioni che sono state previste nel Progetto Nazionale di Chimica, in accordo con quanto indicato dalle Linee Guida ministeriali [4].

2. Una “fotografia” dei CdS della classe L-27

2.1. Immatricolazioni

I dati sulle immatricolazioni nei CdS della Classe L-27 trattati dall'Anagrafe Nazionale Studenti (<https://ustat.mur.gov.it/>) mostrano (Figura 1) che dopo un picco nelle immatricolazioni registrato nel 2018/19 (4407 studenti) e la diminuzione rilevata nell'A.A. successivo (legata all'inserimento del numero programmato in una grande sede), le immatricolazioni sono rimaste stabili nel 2019/2020 e nel 2020/2021, attestandosi a un valore di circa 4050 studenti, in linea con i valori del triennio 2015-2017. Nel 2021/2022 si è registrato un calo abbastanza significativo (3772 immatricolati), probabilmente legato all'emergenza sanitaria COVID-19, mentre una leggera ripresa (3833 immatricolati) si osserva nel 2022/2023. Il 50% degli studenti immatricolati proviene da licei scientifici, il 25% da istituti tecnici e il 10% da licei classici (Figura 2). È da notare che in questi anni il numero di studenti provenienti dai licei scientifici e classici è stato in costante calo, mentre è andato progressivamente aumentando il numero di studenti provenienti dagli istituti tecnici. Tuttavia, l'articolazione “Chimica e Materiali” degli istituti tecnici a indirizzo “Chimica, Materiali e Biotecnologie”, che da sempre costituisce un bacino naturale per le immatricolazioni in Chimica, ha registrato in questi ultimi anni una sensibile diminuzione di studenti, passando dai 4086, che si erano iscritti nel triennio al percorso di Chimica e Materiali, ai 3606 dell'a.s. 2021/22.

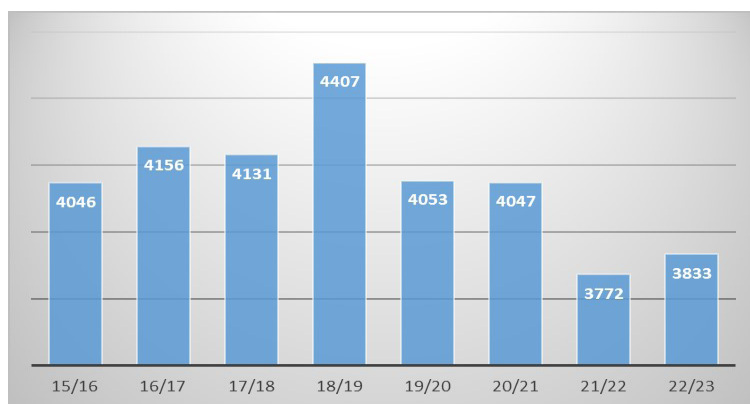


Figura 1. Immatricolati nella Classe L-27 (Fonte: Anagrafe Nazionale degli Studenti); gli immatricolati includono anche gli studenti iscritti a CdS di Scienza dei Materiali.

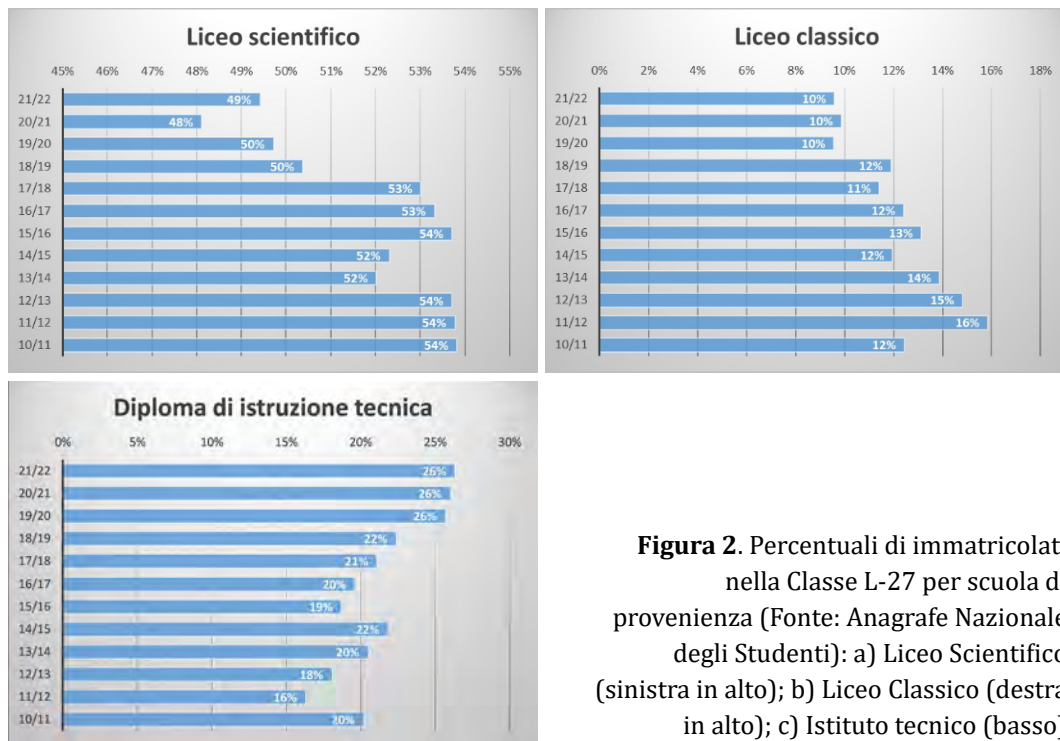


Figura 2. Percentuali di immatricolati nella Classe L-27 per scuola di provenienza (Fonte: Anagrafe Nazionale degli Studenti): a) Liceo Scientifico (sinistra in alto); b) Liceo Classico (destra in alto); c) Istituto tecnico (basso)

2.2. *Questione di genere*

In questi anni la percentuale di immatricolati di genere maschile e femminile risulta sostanzialmente costante, con una leggera prevalenza del genere femminile (51%). Rispetto al 2018, la percentuale delle laureate, che era del 45% nel triennio 2016-2018, è cresciuta costantemente nel triennio successivo, raggiungendo nel 2021 il 50%. Negli ultimi tre anni anche nella laurea magistrale (LM-54), circa 1000 laureati all'anno, si osserva una crescita nel numero di laureate, che nel 2022 hanno raggiunto il 50% dei laureati. Anche nella laurea magistrale in Scienze e Tecnologie della Chimica Industriale (LM-71), alla quale si iscrivono un numero più limitato di studenti (circa 200 all'anno), si osserva in uscita un aumento del numero di laureate che nell'ultimo triennio è passato dal 39 al 44%.

2.3. *Trasferimenti/passaggi e abbandoni*

Facendo riferimento agli indicatori ANVUR dei CdS della Classe L-27 dell'aprile 2023, la percentuale di studenti che ha proseguito nel secondo anno del CdS di Chimica ha subito una flessione negli ultimi quattro anni, passando dal 63.6% (2017) al 59.0% (2021); la percentuale di immatricolati che ha cambiato CdS è aumentata, passando dal 20.9% (2017) al 26.3% (2021); la percentuale di abbandoni è rimasta sostanzialmente stabile, attestandosi al 15.5% (2017) e al 14.7% (2021).

2.4. Carriere degli studenti

Relativamente agli indicatori delle carriere, la percentuale di studenti che ha proseguito al secondo anno avendo acquisito al primo anno almeno 40 CFU è diminuita, passando dal 33.8% (2017) al 28.5% (2021), mentre la percentuale di studenti che si è laureata in (3+1) anni è rimasta sostanzialmente costante, intorno al 76%.

Nella figura 3 è riportato il posizionamento delle diverse sedi relativamente ai due indicatori “% laureati in 3 anni” e “% studenti che acquisiscono 40 CFU al primo anno”. La dimensione del cerchio è indicativa della dimensione della sede e la colorazione indica se l’accesso al CdS è libero (rosso) o a numero programmato (blu).

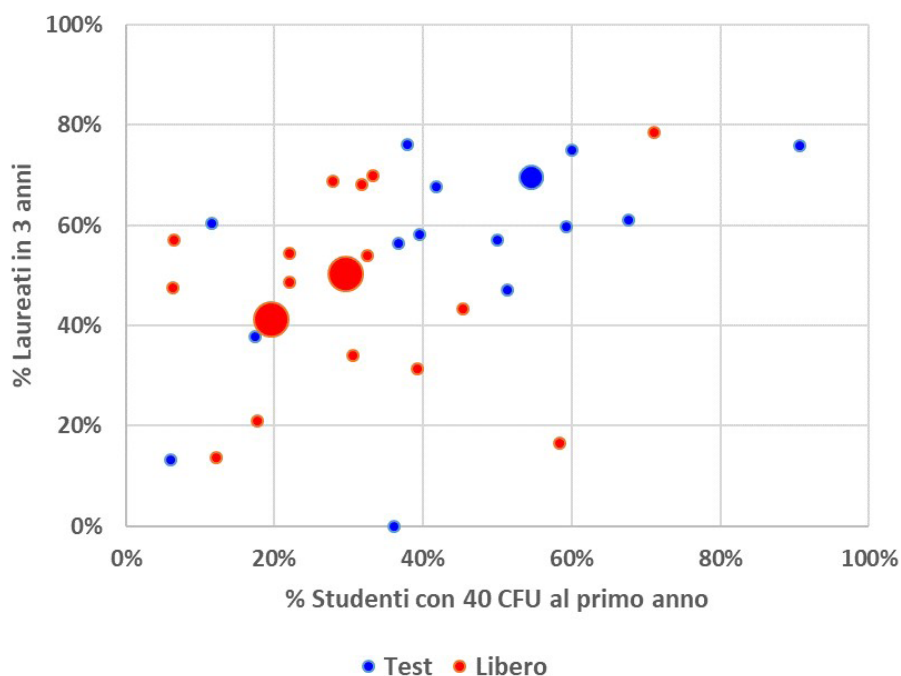


Figura 3. Posizionamento delle diverse sedi relativamente ai due indicatori “% Laureati in 3 anni” e “% Studenti che acquisiscono 40 CFU al primo anno”: la dimensione del cerchio è indicativa della dimensione della sede, il colore rosso identifica le sedi ad accesso libero, il colore blu le sedi che presentano un numero programmato

Come si può notare, i CdS differiscono anche in modo significativo nella progressione delle carriere dei loro studenti. Sicuramente il tipo di accesso (libero o programmato) influenza il posizionamento, ma molto probabilmente anche altri fattori (insegnamenti previsti al primo anno e loro sequenza, modalità realizzative delle attività di sostegno ai corsi mediante tutorato) hanno il loro peso. Poiché, il Progetto Nazionale di Chimica ha fra

i suoi obiettivi un miglioramento di questi parametri, sarà realizzata un'analisi dettagliata in collaborazione con la Conferenza dei corsi di studio in Chimica volta a individuare buone pratiche da condividere all'interno di *ConChimica*.

3. Le attività previste nel Progetto Nazionale di Chimica

Sulla base dei dati riportati, appare evidente che sia necessario proseguire l'azione di orientamento in ingresso, con modalità idonee non solo a incrementare il numero degli immatricolati, ma anche a preparare i futuri studenti ad affrontare le modalità di lavoro e di apprendimento più responsabilizzanti tipici della didattica universitaria. A tal fine, accanto alle attività di orientamento degli studenti e di crescita professionale dei docenti della Scuola Secondaria, è prevista l'organizzazione di laboratori per l'autovalutazione degli studenti e il recupero delle conoscenze per l'ingresso all'università da realizzarsi insieme ai loro insegnanti.

Sono inoltre previste azioni di supporto alla didattica degli insegnamenti universitari dei primi anni, predisponendo azioni specifiche sul tema della formazione dei tutor, sull'organizzazione del loro lavoro e sul monitoraggio delle attività di supporto fornite. La co-progettazione realizzata con i docenti della Scuola dei laboratori sperimentali e di quelli di autovalutazione, insieme agli incontri specificatamente dedicati all'insegnamento delle discipline scientifiche, offriranno ai docenti occasioni per: l'approfondimento e l'aggiornamento di tematiche disciplinari, interdisciplinari e multidisciplinari; la riflessione sul rinnovamento della propria didattica mediante l'utilizzo di metodologie e tecnologie didattiche innovative; l'individuazione, attingendo ai risultati della ricerca didattica disciplinare, delle basi epistemologiche delle diverse discipline in relazione ai nodi concettuali più impegnativi per i propri studenti, anche in funzione della loro età, ai loro stili cognitivi, al loro sviluppo cognitivo.

4. Una proposta per la didattica universitaria

Un'azione di orientamento corretta che porti a realizzare una scelta consapevole è certamente il presupposto per una riduzione degli abbandoni universitari e per il miglioramento delle carriere degli studenti. Ma è sufficiente? Le azioni del PLS coprono oramai da diversi anni anche l'intervento per il tutorato universitario a sostegno degli insegnamenti, puntando sulla formazione, il supporto e il monitoraggio delle attività dei tutor. Ma il sostegno al tutorato da solo non è sufficiente, se non accompagnato anche da un ripensamento e aggiornamento della didattica universitaria che ponga lo studente al centro del processo di apprendimento.

In questi anni il confronto diretto fra docenti dell'Università e della Scuola, ha permesso di mettere in evidenza i bisogni formativi provenienti dal

mondo della Scuola che hanno riguardato: aspetti di approfondimento e aggiornamento di tematiche disciplinari, interdisciplinari e multidisciplinari; aspetti di rinnovamento legati alle metodologie e tecnologie didattiche; aspetti della ricerca didattica disciplinare per l'individuazione delle basi epistemologiche delle diverse discipline in relazione ai nodi concettuali più impegnativi per i loro studenti, anche in funzione della loro età, ai loro stili cognitivi, al loro sviluppo cognitivo. È stato possibile realizzare occasioni di confronto fra docenti della Scuola e dell'Università in contesti collaborativi, costituendo delle Comunità di Apprendimento (Learning Communities) che hanno l'obiettivo, attraverso una riflessione condivisa su metodologie didattiche, sperimentazione metodologica, conoscenze disciplinari, risultati della ricerca nelle didattiche disciplinari, di rendere i contenuti delle discipline saperi significativi per i loro studenti.

Quanto fin qui realizzato nel PLS non è, però, solo il frutto del caso o di molte risorse e di molto lavoro. È conseguenza di scelte e di strategie meditate e consapevoli delle comunità, che sono riuscite a organizzarsi in coordinamenti nazionali e locali, a discutere e a valutarsi. Tali forme di organizzazione, sono state costruite in itinere grazie a un atteggiamento e a una pratica diffusa di ricerca sul problema dell'orientamento e delle didattiche disciplinari. L'atteggiamento critico e di ricerca deve essere sempre presente e occorre costruire delle comunità e dei progetti che ne favoriscano lo sviluppo.

Ma l'esperienza PLS può aiutare a definire anche delle strategie per lo sviluppo della qualità della didattica universitaria? Probabilmente sì, anche se Scuola e Università hanno obiettivi formativi in parte differenti. La Scuola deve formare cittadini consapevoli, indipendentemente dal successivo percorso scolastico o lavorativo, in possesso di quella "cittadinanza scientifica" che consenta loro di leggere un mondo in continuo e rapido cambiamento. L'Università deve formare laureati, in possesso delle più avanzate conoscenze nelle rispettive aree di intervento, in grado di aggiornare le proprie conoscenze lungo tutto il loro percorso professionale. Nonostante queste differenze, l'esperienza del PLS maturata nel rapporto con le scuole, può suggerire alcune modalità di intervento, valide anche in campo universitario.

I laboratori universitari dovrebbero contemplare, accanto a una componente addestrativa e dimostrativa, anche uno spazio per realizzare l'apprendimento da parte dello studente attraverso l'indagine e la discussione. L'insegnamento universitario dovrebbe superare il modello puramente trasmissivo, dove lo studente è il "contenitore" nel quale riversare le conoscenze. C'è spazio per poter descrivere non solo i risultati dello sviluppo scientifico, ma anche i processi che a quei risultati hanno portato, consentendo di rendere più significativi i saperi delle discipline.

Il modello di insegnamento trasmissivo è quello che è stato appreso negli studi universitari e, più o meno consapevolmente, questo modello viene ripro-

dotto nell'insegnamento, sia nella Scuola sia nell'Università. Senza il rinnovamento della didattica universitaria, anche la didattica nella Scuola avrà difficoltà a cambiare.

A partire dall'esperienza del PLS, la modalità attraverso la quale realizzare questi cambiamenti non può che passare attraverso il confronto fra pari, mediante la costituzione di "Learning Communities" nelle quali i docenti di una stessa area si confrontano e approfondiscono le proprie modalità e metodologie di insegnamento. E queste "Learning Communities", estese a livello nazionale, potrebbero costituire uno dei nuclei per il rinnovamento della didattica universitaria. In questo, un ruolo significativo lo possono svolgere le Società Scientifiche e le Conferenze dei Corsi di Laurea, mediante l'organizzazione di convegni e scuole sulla didattica universitaria. Questa potrebbe essere una delle strategie che consentirebbe non solo un rinnovamento della didattica, ma fornirebbe anche uno strumento per una sua eventuale valorizzazione, obiettivo che ANVUR sta promuovendo.

Riferimenti

- [1] MUR, Decreto del 4 agosto 2023: <https://www.mur.gov.it/it/atti-e-normativa/decreto-del-segretario-generale-n-1295-del-04-08-2023>
- [2] "Il Progetto Lauree Scientifiche", *Annali della Pubblica Istruzione*, 2-3, 2007.
- [3] *L'insegnamento della Matematica e delle Scienze nella società della conoscenza: Il Piano Lauree Scientifiche (PLS) dopo 10 anni di attività*, a cura di G. Anzellotti, L. M. Catena, M. Catti, U. Cosentino, J. Immè, N. Vittorio, Mondadori Education S.p.A., Milano, 2014.
- [4] MUR, Linee Guida PLS e POT 2021-2023: https://www.mur.gov.it/sites/default/files/2023-04/Linee%20guida%20PLS%20e%20POT_6.4.2023.pdf

Competenze e formazione STEM come motore della competitività: l'esperienza di Federchimica, federazione nazionale dell'industria chimica

a cura di **Federchimica**

Abstract. The chemical industry, together with the chemical science, plays a fundamental role in sustainable development and in the quality of our lives. All the chemical companies are constantly looking for young people, high school and university graduates.

For this reason, Federchimica, the Italian federation of the chemical industry, organizes every year dissemination and orientation initiatives for all school cycles, from Primary School to University, with the aim of integrating and expanding school curricula. We work in synergy with all Education stakeholders: the Ministry of education supports our projects and disseminates them, member companies open the doors of their factories describing the value of their products and showing their attention to sustainability, sector and local Associations create events dedicated to dissemination and orientation.

Keywords: competenze; orientamento; STEM; sostenibilità; industria chimica

1. 2023 anno europeo delle competenze

L'Europa deve investire molto di più nella formazione e nello sviluppo delle competenze. Dobbiamo farlo lavorando in accordo con le imprese. Nessuno meglio di loro conosce i profili professionali di cui hanno bisogno. Dobbiamo conciliare meglio queste esigenze con gli obiettivi e le aspirazioni di chi cerca un lavoro. Ma vogliamo anche attrarre verso il nostro continente le competenze necessarie per aiutare le imprese e rafforzare la crescita dell'Europa.

Con queste parole Ursula von der Leyen, presidente della Commissione Europea, ha inaugurato l'anno europeo delle competenze, da maggio 2023 a maggio 2024.

Le competenze, in particolare in ambito STEM, sono il motore fondamentale della competitività e della capacità di innovazione di un Paese.

L'Europa ha avviato riforme volte a migliorare istruzione e formazione negli Stati membri, in modo da contribuire alla ripresa dalle perturbazioni causate dalla pandemia e da renderli più resilienti a lungo termine affrontando, in particolare, gli impatti sociali negativi e la dispersione scolastica.

Nel nostro Paese stiamo assistendo al calo di iscritti negli istituti tecnici, in particolare quelli a indirizzo "Chimica e Materiali" a favore di percorsi considerati più "moderni", come le biotecnologie sanitarie o ambientali, e dei sempre amati licei.

La mancanza di diplomati tecnici è una emergenza che anche Confindustria segnala da tempo. Si stima che in 5 anni (tra il 2023 e il 2027) serviranno 500 mila tecnici specializzati.

Anche l'Italia si è, quindi, attivata per rinnovare l'offerta formativa in particolare delle Scuole Secondarie di secondo grado, viste le difficoltà di reperimento (attuali e prospettiche) di figure sia tecnico-operative (quali turnisti e addetti alla produzione) sia specializzate (con competenze quali digitale, energia, regolatorio), fenomeno purtroppo endemico, e anche l'Italia non si discosta dal resto d'Europa.

Oltre alla perdita di iscritti agli istituti tecnici, anche la denatalità e l'abbandono scolastico (al 16%) sono segnali che hanno portato l'attuale Governo ad avviare delle riforme che, ci auguriamo, possano modificare lo stato delle cose: dal prossimo anno scolastico (2024-2025) è prevista una riduzione degli anni di studio di area tecnica (da 5 a 4 nelle superiori) e una maggiore presenza di formazione da parte di esperti aziendali.

La centralità delle risorse umane nelle imprese chimiche comporta, pertanto, rapporti continui con il mondo della scuola per avere – quantitativamente e qualitativamente – giovani motivati, ben formati e consapevoli delle opportunità di lavoro.

Queste attività sono sempre state di rilievo nelle medio-grandi imprese e, negli ultimi anni, si sono diffuse anche nelle aziende più piccole con un'interazione con il territorio, e in particolare con gli istituti tecnici, sempre più elevata anche se non ancora sufficiente.

Purtroppo, nonostante la disponibilità delle imprese ad attivare stage di Alternanza scuola-lavoro (oggi Percorsi per le Competenze Trasversali e l'Orientamento-PCTO) e ad aumentare l'offerta di testimonianze aziendali nei percorsi formativi, l'orientamento non è ancora sufficientemente efficace.

Periti chimici e laureati in chimica sono il motore delle imprese chimiche e continuano a essere molto ricercati: i dati confermano che, tra il 2015 e il 2021, l'industria chimica ha generato oltre 6.000 nuovi posti di lavoro, figurando tra i settori che più hanno contribuito a creare occupazione nel Paese.

A 3 anni dalla laurea lavora il 96% dei chimici e il 97% degli ingegneri chimici, quote significativamente superiori rispetto alla generalità dei corsi di laurea.

Per questo motivo, negli ultimi anni, la Federazione ha implementato l'inte-

razione con il sistema scolastico e le iniziative dedicate all'orientamento, dalla Scuola primaria ai corsi post-universitari.

2. Il valore della collaborazione scuola-impresa

Grazie, anche, al lavoro sinergico tra Federchimica, SCI e Piano Nazionale Lauree Scientifiche, abbiamo assistito a un deciso aumento degli iscritti ai corsi di laurea in chimica, diminuiti a fine anni '90 quando ci fu un forte calo delle immatricolazioni nelle materie scientifiche "dure".

Dal 2003 al 2022 gli iscritti sono raddoppiati passando da 1.800 a oltre 4.000, ma rimane ancora molto debole la quota di studenti che arrivano alla laurea magistrale (poco più di 2.500 nel 2021, quasi il 50%), generando nuova dispersione.

Positivo, nonostante non sufficiente a rispondere alla domanda da parte delle imprese, il bilancio degli ITS (oggi ITS Academy), i corsi professionalizzanti post diploma che crescono anche incentivati dai fondi PNRR e che offrono altissimi tassi di occupazione ai diplomati, ma sono ancora poco noti nel panorama dell'offerta formativa.

La formazione professionalizzante di tecnici superiori è, infatti, strategica per soddisfare i fabbisogni formativi in relazione alla transizione digitale, all'innovazione, alla competitività, alla transizione ecologica nonché alle infrastrutture per la mobilità sostenibile.

I diplomati biennali ITS Academy trovano un impiego qualificato nell'83% dei casi, non appena terminato il percorso di studi.

Di particolare rilevanza è, anche, l'attività di *ConChimica*, l'organismo che raggruppa tutti i docenti coordinatori dei corsi laurea in discipline chimiche, con cui annualmente Federchimica organizza un seminario online per illustrare le priorità del settore e le opportunità di lavoro. L'elevata partecipazione di studenti (600 nell'ultima edizione a febbraio 2023) conferma anche quest'anno l'efficacia della partnership tra industria e accademia.

3. L'efficacia della formazione a distanza

L'impossibilità prima e la difficoltà poi di promuovere momenti di alternanza per l'emergenza COVID hanno portato nel 2021 alla definizione di un PCTO digitale (con crediti formativi) sui vari temi utili a "costruirsi un futuro nella chimica" (<https://www.educazionedigitale.it/federchimicapcto/>). Attualmente, anche dopo la fine della pandemia, sono quasi 50 mila gli studenti che hanno seguito questo percorso che può introdurre e anticipare la presenza in azienda.

Fra le tante iniziative, che confermano la credibilità dei contenuti divulgativi e formativi di Federchimica, anche da parte di soggetti esterni, è da evidenziare la partecipazione di oltre 12.000 docenti ai momenti di formazione on-line organizzati da Rizzoli Education sul sito "Le Scienze Live" (<https://www.rizzolieducation.it/ss2/eventi/live/le-scienze-live/>) con le testimonianze degli esperti della Federazione e delle Associazioni su temi attuali che riguardano i settori della chimica.

4. L'importanza degli eventi in presenza

Da segnalare, infine, il ritorno alla realizzazione degli incontri degli studenti con gli esperti, soprattutto in relazione al Premio Nazionale dedicato alle Scuole Primarie e Secondarie di primo grado che continua a rappresentare un progetto prioritario per la Federazione e le sue Associazioni di settore.

Il premio, che vede la collaborazione della SCI nelle sezioni dedicate alla Plastica e alla Chimica di Base, nasce per appassionare i ragazzi alla chimica e orientare verso percorsi tecnico-scientifici alle superiori. Sono 270 i progetti che hanno partecipato all'edizione 2022-2023 (+50% rispetto all'anno precedente), coinvolgendo circa 5.000 studenti di tutta Italia, ed è già aperto il bando per partecipare all'edizione 2023-2024 (Figura 1).



Figura 1. Sinistra: locandina dell'edizione 2023-24 del premio Federchimica giovani (per ulteriori informazioni: <https://www.federchimica.it/la-chimica-per/scuola/scuola-secondaria-di-primo-grado/premio-federchimica-giovani-2023-2024>). Destra: locandina dell'edizione 2023-24 del Premio nazionale giovani Federchimica e Società Chimica Italiana “Speciale Chimica e Sostenibilità 2023-2024” - sezioni “Chimica di Base” e della “Plastica” per le classi della Scuola Primaria e Secondaria di primo grado (per il regolamento di partecipazione: https://www.federchimica.it/docs/default-source/premio-federchimica-giovani-2023-2024/regolamento-premio-nazionale-giovani-base-plastica-23-24.pdf?sfvrsn=f4935193_6)

Incontrare gli esperti significa aprirsi al mondo e imparare a relazionarsi con esso; rielaborare le informazioni ricevute significa stimolare il pensiero critico, entrambi momenti fondamentali nell'orientamento alle discipline STEM.

Finalmente quest'anno i vincitori dell'edizione 2022-2023 del Premio sono stati anche celebrati in due momenti di festa, i primi dopo la pandemia: il 26 settembre al Museo della Scienza e Tecnologia Leonardo da Vinci di Milano e il 27 ottobre al Festival della Scienza di Genova, per le sezioni Plastica e Chimica di Base.

Due cerimonie che hanno visto circa 800 partecipanti tra studenti, insegnanti e genitori e che hanno confermato come l'incontro in presenza abbia ancora un grande valore in termini di condivisione e memoria.

Tutti gli attori della formazione riconoscono, in modo aperto e concreto, il ruolo che oggi il mondo industriale può avere e l'importanza dei risultati che si raggiungono operando insieme.

Operare insieme significa dialogare anche con le famiglie per far conoscere il ruolo della chimica e della sua industria e sfatare i falsi miti sulla formazione tecnica.

La continua collaborazione tra società, Istituzioni, scienza e industria è, e sarà, pertanto la chiave per migliorare le competenze delle nuove generazioni e un veicolo di innovazione e crescita e per tutti.

Didattica della Chimica: un'esperienza all'Università di Parma

Dominga Rogolino

*Dipartimento di Scienze Chimiche, della Vita e della Sostenibilità Ambientale,
Università di Parma*

e-mail: dominga.rogolino@unipr.it

Abstract. The birth of a chemistry education course is a complex process that requires the ability to draw ideas and teaching approaches from a vast literature and adapt them to the needs of the operating environment. This contribution describes how the chemistry education course at the University of Parma was conceived and organized. The sharing of teaching-related experiences serves as a source of enrichment and reflection in anticipation of the challenges that lie ahead in designing impactful and meaningful educational courses.

Keywords: Didattica della Chimica; percorso formativo PF24; approccio laboratoriale; formazione insegnanti; metodi e approcci didattici innovativi

L'obiettivo di questo contributo è condividere un'esperienza nata dalla necessità di rispondere a una specifica richiesta dell'Università di Parma subito dopo l'istituzione del Percorso Formativo di 24 Crediti Formativi Universitari (PF24) con il decreto DM 616/2017. Tale percorso richiedeva come requisito fondamentale per accedere al concorso nei ruoli di docente nella scuola secondaria, l'acquisizione di 24 Crediti Formativi Universitari (CFU), che comprendevano sia crediti legati all'area pedagogica, antropologica e psicologica, sia crediti legati alla didattica disciplinare. La volontà di fornire un'ampia offerta formativa ha spinto all'introduzione di un insegnamento specificatamente dedicato alla Didattica della Chimica. Nonostante alcune significative esperienze legate ai vari percorsi di formazione e accesso all'insegnamento, che si sono succeduti nel corso degli anni, e importanti momenti di aggiornamento promossi nell'ambito del Piano Lauree Scientifiche, un insegnamento completo incentrato su un'efficace formazione in Chimica, non era mai stato precedentemente realizzato a Parma. A partire dall'anno accademico 2018-2019, è stato creato dunque un nuovo insegnamento, che prevedeva un totale di 30 ore di lezione (equivalenti a 6 CFU), incardinato nel percorso PF24. Questo il contesto

in cui nasce l'insegnamento di Didattica della Chimica a Parma che, negli anni, ha subito una costante evoluzione, adattandosi alle mutevoli caratteristiche della sua platea. Inizialmente, al momento dell'istituzione, l'insegnamento aveva attirato insegnanti già attivi nel mondo della scuola, che avevano bisogno di adeguarsi alle nuove normative per accedere in modo stabile all'insegnamento. Successivamente, ha visto una predominanza di dottorandi in Scienze Chimiche e laureandi magistrali (LM54 e LM71), fino a giungere all'ultimo anno, quando è stato scelto come insegnamento a libera scelta anche da studenti della laurea triennale in Chimica (L-27), con una media di 10-15 studenti frequentanti.

Gli obiettivi formativi dell'insegnamento sono stati definiti con una visione ambiziosa: non solo formare futuri docenti, ma in generale laureati in grado di comprendere e comunicare in modo efficace i contenuti della Chimica, affrontandone i vari livelli concettuali (macroscopico, microscopico e simbolico). L'obiettivo principale è superare il tradizionale modello trasmissivo, ponendo l'accento su un approccio didattico che coinvolga attivamente gli studenti e tenga conto della complessità dei processi cognitivi, delle dinamiche di gruppo in classe, dei prerequisiti e delle concezioni errate. Lavorando nell'ambito della Chimica, si dà particolare rilevanza a un approccio laboratoriale che permetta agli studenti di diventare protagonisti del loro apprendimento. Inoltre, l'insegnamento mira a preparare gli studenti a progettare efficaci strumenti di valutazione, inclusi quelli in grado di individuare concezioni difformi. Non ultimo, si enfatizza la consapevolezza del valore culturale, etico e sociale della Chimica, temi che poco vengono affrontati negli insegnamenti curricolari, ma che non possono non essere presi in considerazione nella formazione del chimico.

L'insegnamento è stato strutturato in quattro parti distinte. La parte introduttiva (Figura 1) si apre con una riflessione sullo stato attuale dell'insegnamento della Chimica nella scuola italiana e sugli aspetti normativi, mettendo in luce come insegnare la Chimica debba essere considerata anche una scelta di valore. Successivamente, vengono presentati i principali modelli di apprendimento, da Piaget a Vygotsky, con una breve panoramica sul costruttivismo, comportamentismo e cognitivismo [1]. Questo serve come base per illustrare le metodologie didattiche derivate da tali teorie, tra cui *inquiry-based learning*, *team-based learning*, *cooperative learning*, *problem solving*, ecc.

Infine, si esaminano gli elementi chiave per la progettazione di un efficace intervento didattico [2], compresi la definizione degli obiettivi, la pianificazione dei tempi e delle modalità di verifica (Figura 1).

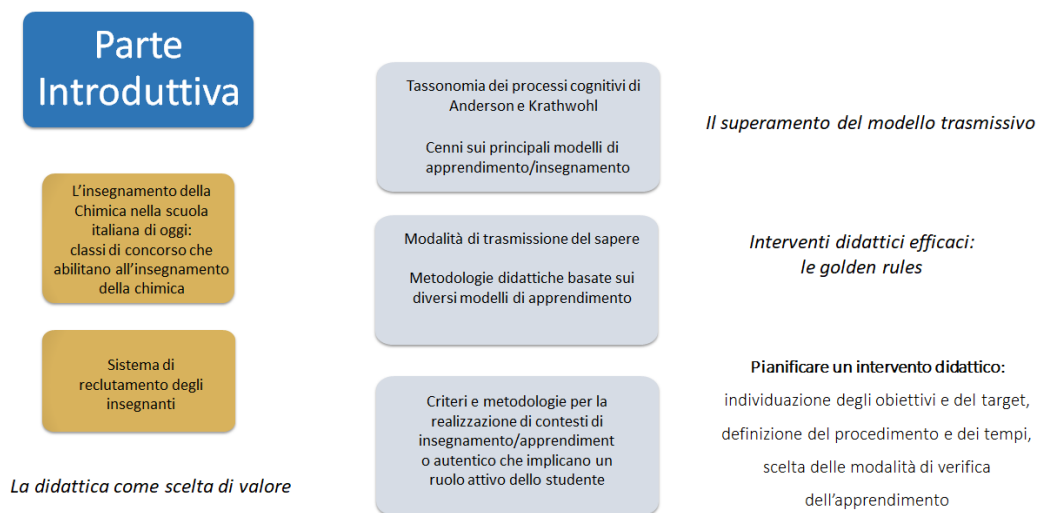


Figura 1. Parte introduttiva dell'insegnamento

Questa parte introduttiva, estremamente generale, ha lo scopo di preparare il terreno per l'approfondimento delle tematiche strettamente legate all'efficace trasposizione didattica dei principi fondamentali della Chimica.

Nel secondo segmento dell'insegnamento, viene esaminata la letteratura relativa al pensiero chimico, ovvero come i chimici percepiscono, interpretano e comunicano la realtà che li circonda. Iniziando dal pensiero pionieristico di Johnstone, ovvero il "chemical triplet" [3], si passa poi a esplorare la prospettiva "tetraedrica" di Mahaffy [4] e le reinterpretazioni di Sjostrom e Talanquer [5]. Questo permette di ampliare il nostro orizzonte, includendo aspetti sociali, culturali ed etici nella discussione (Figura 2). Nell'ambito di questo segmento didattico, è importante prendere in considerazione il ruolo della modellizzazione nell'insegnamento della Chimica. È fondamentale sottolineare la necessità di rendere gli studenti consapevoli del significato e dell'utilizzo dei modelli. In ultima analisi, l'obiettivo è fornire loro una chiave di lettura che permetta un uso consapevole dei modelli in Chimica.

In un insegnamento di Didattica della Chimica non può certo mancare una parte significativa relativa alla didattica laboratoriale. È, infatti, essenziale in questo contesto considerare il ruolo fondamentale che svolge l'attività di laboratorio. Partendo dall'analisi del modello attualmente più diffuso nelle scuole, il "modello trasmissivo", che implica la verifica di teorie o leggi attraverso un approccio basato su ricette predeterminate (cook booking style), si promuove una discussione sui possibili approcci alternativi. Questi includono il modello *inquiry-based* e la destrutturazione dei protocolli tradizionali. Ispirandosi a un

approccio “per scoperta” si prendono in considerazione alcune esperienze laboratoriali, che affrontano temi quali la trasformazione chimica, la nozione di elemento, la miscibilità, l'equilibrio chimico.

L'obiettivo principale è fornire strumenti per realizzare un insegnamento laboratoriale efficace, in cui il laboratorio diventa uno spazio di apprendimento complesso. Il laboratorio non dovrebbe essere visto semplicemente come un'appendice della teoria o come un momento dimostrativo, ma come un'opportunità in cui gli studenti diventano protagonisti attivi del loro processo di apprendimento su “come fare Chimica”. Questo processo coinvolge l'abilità di porre domande, definire problemi, sviluppare e utilizzare modelli, pianificare ed eseguire esperimenti o indagini, trarre conclusioni. Promuove, quindi, lo sviluppo di competenze personali, come abilità cognitive, manuali, decisionali e progettuali, e potenzia le capacità relazionali e organizzative degli studenti.

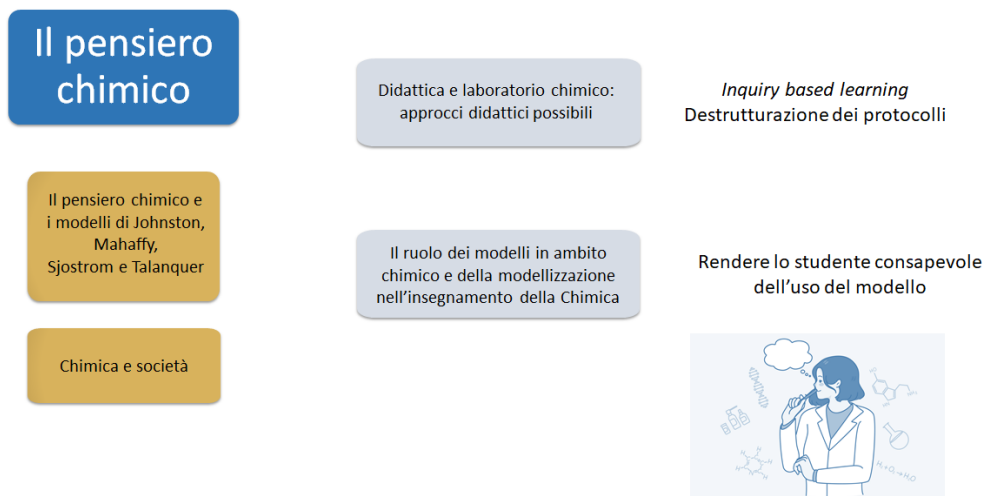


Figura 2. Seconda parte dell'insegnamento

Il nucleo centrale dell'insegnamento ruota attorno alla presentazione e discussione di una serie di percorsi didattici sviluppati principalmente sulla base dell'esperienza del gruppo SENDS (Storia ed Epistemologia per una Nuova Didattica delle Scienze) di Torino [6]. Questi percorsi hanno tratto ispirazione dalla collaborazione instaurata nel contesto di corsi di formazione per insegnanti organizzati da diversi anni nell'ambito del Piano Lauree Scientifiche presso l'Università di Parma dal collega Prof. Francesco Sansone. Grazie a tale collaborazione, è stato possibile condividere le competenze e il lavoro di questo gruppo di ricerca in didattica, il cui obiettivo è quello di creare una rete sempre più ampia di insegnanti che collaborano per migliorare la propria professionalità e sviluppare proposte didattiche innovative.

Come illustrato nella figura 3, si prendono in considerazione argomenti normalmente affrontati nel biennio della scuola secondaria di secondo grado. Introducendo il modello particellare come strumento chiave per passare dal macroscopico al microscopico, si affrontano le difficoltà cognitive, le concezioni difformi più comuni e i nodi concettuali fondamentali da trasmettere agli studenti. L'approccio è quello che prevede di osservare i fenomeni macroscopici, anche attraverso semplici attività di laboratorio, per poi collegarli ai modelli microscopici, attraverso l'uso di schede di lavoro individuali e la discussione tra pari sotto la guida dell'insegnante, in modo da arrivare a un modello condiviso dalla classe, che permetta di legare il mondo macroscopico a quello microscopico, introducendo il simbolismo chimico come strumento di sintesi tra questi due livelli della Chimica.

L'insegnamento si chiude con la verifica dell'apprendimento: si richiede la realizzazione e discussione di una unità di apprendimento inerente a un argomento di Chimica a scelta tra quelli normalmente affrontati nella scuola secondaria di secondo grado.

In questi anni, è stato possibile evidenziare alcune difficoltà che studenti con profili diversi si trovano a condividere nell'affrontare un insegnamento di Didattica della Chimica. Una delle principali difficoltà riscontrate riguarda la gestione dei tre livelli macro-micro-simbolico e del registro linguistico, specialmente quando si tratta di verbalizzare concetti complessi. Questa sfida implica il bisogno di tradurre idee astratte in parole chiare e accessibili. Inoltre, gli studenti possono avere difficoltà a inquadrare un argomento all'interno di un percorso logico e a mantenere una consequenzialità tra i vari concetti. Ciò richiede un pensiero critico e una capacità di analisi che spesso necessitano di molta pratica ed esperienza.



Figura 3. Ultima parte dell'insegnamento

Programmare percorsi trasversali, che collegano diverse materie o discipline, può risultare un'altra sfida, perché necessita di una comprensione approfondita di più ambiti di studio e una elevata capacità di sintesi. Infine, la gestione del tempo è fondamentale e difficile da realizzare senza avere una robusta esperienza alle spalle, specialmente quando si tratta di organizzare la tempistica delle esperienze laboratoriali.

D'altra parte, posso dire che anche il docente si trova ad affrontare notevoli difficoltà, a partire, ad esempio, dalla disomogeneità della platea, che raccoglie studenti di età e profili diversi (laurea triennale e magistrale in Chimica, dottorandi, studenti di corsi di laurea di Biologia e Matematica). Inoltre, dobbiamo tenere conto che le modalità di apprendimento degli studenti cambiano a un ritmo elevato, grazie anche alle tecnologie multimediali di cui dispongono. Capire e intercettare queste nuove modalità risulta, quindi, fondamentale per progettare interventi didattici efficaci.

Questa esperienza, avviata nel 2018, è stata bruscamente interrotta nell'anno accademico 2022-23 a causa della sospensione del percorso PF24. Tuttavia, durante questi anni, è cresciuta la consapevolezza dell'importanza dei temi legati alla didattica tra gli studenti e il corpo docente universitario. Tale consapevolezza ha ispirato l'ideazione di un nuovo percorso, più ampio (48 ore, 6 CFU) e specificamente progettato all'interno della laurea magistrale in Chimica, come insegnamento a libera scelta, a partire dall'attuale anno accademico 2023-24.

Oltre agli argomenti trattati nell'insegnamento previsto per il PF24, sono stati integrati ulteriori percorsi didattici, tra cui un laboratorio focalizzato su acidi e basi. Grazie alla collaborazione con una scuola del territorio, questo specifico percorso didattico verrà inizialmente realizzato e discusso dagli studenti iscritti all'insegnamento di Didattica della Chimica. Successivamente, gli studenti della laurea magistrale proporranno questo percorso agli studenti di una classe quarta di un Liceo Scientifico di Parma.

Una tale iniziativa testimonia l'impegno continuo nel promuovere e sviluppare la didattica nella Chimica e nella formazione degli insegnanti, creando opportunità di interazione e apprendimento pratico tra gli studenti universitari e quelli delle scuole superiori.

La notizia dell'istituzione, proprio in questi giorni, del nuovo percorso PF60, anche presso il nostro Ateneo, rappresenta un passo significativo nell'ambito dell'istruzione e della formazione degli insegnanti. Questo percorso prevede 16 CFU dedicati alla didattica disciplinare su un totale di 60 CFU necessari per l'abilitazione all'insegnamento.

L'attivazione di diversi percorsi mirati a classi di concorso di interesse chimico (in particolare A34, A50 e A28) è un segno di impegno nell'adattare la formazione degli insegnanti alle esigenze specifiche di queste discipline. Tale iniziativa rappresenta una nuova sfida, ma anche un'opportunità per elevare il

livello di preparazione degli insegnanti e migliorare la qualità dell'istruzione della Chimica, con la consapevolezza dell'importanza di una formazione completa che comprenda, oltre alle conoscenze disciplinari, i metodi e approcci didattici avanzati, con l'obiettivo di far percepire la Chimica non solo come un corpo di conoscenze, ma come un potente modo di pensare e, di conseguenza, interpretare e comprendere la realtà che ci circonda.

Riferimenti

- [1] A. Calvani, *Principi dell'istruzione e strategie per insegnare*, settima ristampa, Carrocci Editore, Roma, 2017.
- [2] D. Laurillard, *Insegnamento come scienza della progettazione*, terza ristampa, FrancoAngeli Editore, Milano, 2022.
- [3] A. H. Johnstone, The development of chemistry teaching: A changing response to changing demand, *J. Chem. Educ.*, 1993, **70**, 701-705.
- [4] P. Mahaffy, The future shape of chemistry education, *Chemistry Education, Research and Practice*, 2004, **5**, 229-245.
- [5] J. Sjöström, Humanizing chemistry education: from simple contextualization to multifaceted problematization, *J. Chem. Educ.*, 2014, **91**, 1125-1131.
- [6] <https://www.sends.unito.it/>

L'utilità di un approccio integrato nella didattica della chimica

Valentina Domenici

Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale, Università di Pisa

e-mail: valentina.domenici@unipi.it

Abstract. This is a brief report of my experiences as teacher of chemistry education and other chemistry-related subjects at the University of Pisa. The educational approach here described is an integrated teaching method where several active methodologies, such as the cooperative learning and project-based learning, are used together with the epistemological/historical approach in the frame of the STEAM teaching philosophy.

Keywords: didattica universitaria; metodologie di insegnamento; didattica della chimica

1. Introduzione

Questo contributo nasce dall'idea di condividere con la comunità dei docenti, che si occupano di insegnamento della Chimica in modo attivo, l'esperienza maturata negli ultimi dieci anni nel contesto universitario, in particolare in alcuni insegnamenti di Didattica della Chimica del corso di Laurea triennale in Chimica e in un insegnamento di Chimica Fisica del corso di Laurea triennale in Chimica per l'Industria e per l'Ambiente dell'Università di Pisa. Benché siano insegnamenti molto diversi per argomenti, target e obiettivi, dal punto di vista delle metodologie didattiche presentano alcuni elementi comuni che val la pena commentare.

Di seguito cercherò di descrivere la metodologia utilizzata in questi corsi, mettendo in evidenza come un approccio integrato possa essere migliore rispetto a metodologie singole per il raggiungimento degli obiettivi didattici e per un maggiore coinvolgimento e partecipazione degli studenti a tutte le attività.

Gli insegnamenti di Didattica della Chimica, che attualmente sono attivi e che sono inseriti come opzionali nel corso di Laurea triennale in Chimica [1] sono due: Fondamenti e Metodologie didattiche per l'insegnamento della Chimica,

consigliato al secondo anno, e Storia della Chimica ed Elementi di Didattica, consigliato al primo anno. Si tratta di due insegnamenti da 3 CFU che, a partire dall'anno accademico 2018-2019, sono stati inseriti nel percorso di formazione degli insegnanti cosiddetto PF24 (24 CFU).

Questi due insegnamenti sono stati per me un contesto ideale per la sperimentazione didattica e mi hanno permesso di provare modi diversi di insegnare la Chimica, adottando varie metodologie attive e testando ogni anno piccoli cambiamenti che, alla fine, hanno prodotto una struttura abbastanza definita, sia in termini di argomenti chiave da affrontare che di obiettivi didattici, ma soprattutto in termini di metodologie didattiche.

2. Fondamenti e Metodologie didattiche per l'insegnamento della Chimica

Fondamenti e Metodologie didattiche per l'insegnamento della Chimica, che inizialmente si chiamava Didattica della Chimica, è il primo insegnamento a essere stato attivato nell'anno accademico 2013-2014. In questo insegnamento, nei primi anni di sperimentazione, avevo utilizzato principalmente il metodo del *cooperative learning* e della didattica laboratoriale, dedicando diverse lezioni al ruolo degli ambiti di apprendimento e dei contesti di insegnamento, al concetto di 'life-long learning' e alla didattica museale. In seguito, per poter far sperimentare alcune metodologie attive direttamente agli studenti, fin dall'inizio dell'insegnamento ho proposto agli studenti di costruire un progetto didattico preferibilmente in ambito museale, cercando di mettere in pratica subito gli argomenti toccati durante le lezioni e, in particolare, gli aspetti principali della progettazione didattica e delle metodologie didattiche, avendo dato agli studenti alcuni elementi introduttivi sulle teorie di apprendimento e di insegnamento che stanno alla base di queste metodologie.

La possibilità di progettare un'attività didattica e di metterla in pratica, o a scuola o nel museo, è stato un ulteriore aspetto che probabilmente ha motivato e interessato molto gli studenti che, come ho riportato in precedenti lavori [2-4], hanno sempre partecipato con grande interesse, dedicando molto tempo e cura alla preparazione dei progetti.

Questa metodologia è stata poi affinata anche grazie al progetto speciale per la didattica supportato dall'Ateneo di Pisa nel 2019, intitolato "*Realizzazione di progetti di didattica con approccio STEM in ambito museale*" [5, 6]. Nell'occasione, all'inizio delle lezioni gli studenti visitarono il Museo Galileo di Firenze (Figura 1) ed ebbero l'opportunità non solo di fare una visita guidata speciale, ma anche di interagire con il curatore delle attività educative, Andrea Gori, per conoscere gli aspetti fondamentali della progettazione delle attività didattiche del museo per le scuole.



Figura 1. Foto del gruppo di studenti che ha partecipato nel 2019 alla visita del Museo Galileo di Firenze durante l'incontro di Andrea Gori

Ogni anno la visita al museo rappresenta la prima fase di un'attività strutturata in nove fasi, che ho precedentemente descritto [2-4], che accompagna gli studenti verso la progettazione di attività didattiche ispirate dalla visita del museo e messe in pratica nella maggior parte dei casi entro la fine delle lezioni. Durante questa attività strutturata le metodologie principali sono il *'project-based learning'*, il *cooperative learning* informale, la didattica laboratoriale e l'approccio STEAM [2]. Dopo la visita al museo, durante le lezioni del corso, dedico una parte delle lezioni al progetto e ai suoi avanzamenti. Spesso, gli studenti, ispirati da un oggetto o da uno strumento presente nel museo, iniziano a focalizzare l'attenzione sui concetti chiave che possono essere collegati alla Chimica e concentrano su questi concetti la progettazione di una attività didattica. In questa fase si attivano molti 'canali': alcuni studenti attingono idee dalla loro esperienza non scolastica, altri invece sono in grado di analizzare criticamente la propria esperienza scolastica e partono da lì in un processo che mette in moto le diverse intelligenze dei ragazzi e li stimola a progettare le loro attività tenendo conto del target, degli obiettivi, delle preconcenze, del procedimento e dei metodi di insegnamento da utilizzare.

Un effetto dell'impostazione data ai primi incontri, e in particolare della visita guidata presso il museo, è la partecipazione degli studenti e il loro coinvolgimento nelle lezioni successive. Di fatto, anche nelle lezioni più teoriche, dove spiego i fondamenti di alcune metodologie, gli studenti sono molto attivi e partecipano con domande e discussioni a cui lascio generalmente molto spazio, proprio perché funzionali al raggiungimento di alcuni obiettivi dell'insegnamento come, ad esempio, la consapevolezza dei processi di apprendimento, la metacognizione e l'elaborazione critica dei contenuti.

Un aspetto interessante di questo approccio è legato alla relativa libertà che gli studenti hanno nella scelta delle attività didattiche e dei metodi da utilizzare. È capitato nel periodo della pandemia di COVID-19 che gli studenti proponessero di fare attività in modalità remota, utilizzando strumenti digitali anche molto innovativi, di cui evidentemente erano già a conoscenza prima delle limitazioni dovute al periodo. Ad esempio, un gruppo di studentesse (Figura 2) ha realizzato un portale dedicato ai 'giardini chimici' dove sono stati inseriti video prodotti da loro, giochi interattivi e quiz, in una veste grafica molto accattivante per i bambini [7].



Figura 2. Le studentesse (Michela Massa, Ilaria Fordyce, Nicole Vita e Chiara Scala) che hanno realizzato l'attività sui giardini chimici, qui presso il Museo di Storia Naturale di Rosignano insieme alla sottoscritta durante un laboratorio organizzato per i bambini nel 2020

Diverse classi delle scuole hanno partecipato ad attività in remoto sui giardini chimici interamente gestite e organizzate da queste studentesse, che hanno

dimostrato una grande capacità di adattamento, oggi si direbbe di resilienza, e di saper utilizzare in modo eccellente gli strumenti digitali. Tutto il materiale da loro prodotto è stato inserito anche all'interno delle attività della Notte dei Ricercatori e delle Ricercatrici del Dipartimento di Chimica nel 2020 [8].

Infine, vorrei evidenziare uno degli effetti che l'insegnamento ha avuto a lungo termine, oltre l'esito dell'esame finale. Ad oggi l'hanno seguito durante la loro formazione triennale, sostenendo l'esame finale, circa 175 studenti, conseguendo voti mediamente più alti della media degli esami dati. Tra questi studenti, per quanto sono a conoscenza, almeno una quindicina hanno scelto di proseguire la loro formazione come insegnanti e sono attualmente insegnanti presso scuole secondarie di I o di II grado. Altri studenti, almeno una ventina, pur facendo attività diverse, hanno intrapreso attività come animatori museali, animatori in centri culturali o educatori. Degli altri continuo ad avere spesso notizie; qualcuno mi scrive che ciò che abbiamo visto insieme durante l'insegnamento gli è servito in contesti magari lontani da quello scolastico. Alcuni studenti partecipano alle attività didattiche che organizzo ogni anno nelle scuole e nei musei, anche tre o quattro anni dopo aver dato l'esame. Questo mi fa pensare che esperienze di questo tipo, sicuramente non attuabili in altri insegnamenti, sono un elemento importante della formazione di questi ragazzi, al di là di ciò che andranno poi a fare una volta laureati in Chimica.

3. Storia della Chimica ed Elementi di Didattica

L'insegnamento Storia della Chimica ed Elementi di Didattica del corso di Laurea triennale in Chimica, di cui ho riportato alcuni tratti distintivi e alcuni risultati ottenuti con gli studenti in precedenti lavori [9, 10], è iniziato nell'anno accademico 2017-2018 ed è stato inserito nel secondo semestre del primo anno della laurea triennale, ovvero dopo che gli studenti hanno seguito Chimica generale ed inorganica nel primo semestre. Il numero di studenti che lo frequentano è maggiore rispetto al precedente, tanto che ad oggi hanno sostenuto l'esame circa 180 studenti. Tra gli argomenti affrontati, i cui dettagli sono stati riportati in un precedente articolo [9], figurano: il rapporto tra Chimica e Alchimia, l'evoluzione storica ed epistemologica dei concetti di atomo, molecola ed elemento chimico, la nascita della Chimica moderna, la teoria atomico-molecolare, l'evoluzione del linguaggio e delle rappresentazioni nella storia della Chimica, i contributi alla scoperta della legge periodica degli elementi e l'evoluzione della Tavola Periodica, alcuni aspetti distintivi della Chimica nel XX secolo, in rapporto con l'industria chimica, la società e le altre scienze. Alcuni aspetti didattici legati all'utilizzo della storia per insegnare la Chimica a livello di scuola secondaria di secondo grado sono inseriti durante gli incontri e generalmente sono associati alla presentazio-

ne di percorsi didattici dove prevale l'approccio storico/epistemologico. Le lezioni prevedono la partecipazione e l'interazione degli studenti, attraverso lavori cooperativi su alcune fonti originali, discussioni collettive su materiale fornito agli studenti precedentemente e attività, prevalentemente di autovalutazione, sulla piattaforma *moodle*. Anche per questo insegnamento, ogni anno ho cercato di apportare piccoli cambiamenti finalizzati ad aumentare la partecipazione e l'interazione con gli studenti per favorire un apprendimento più significativo. Le lezioni frontali non rappresentano più del 40% complessivo, mentre le metodologie da me utilizzate durante gli incontri sono prevalentemente il *brainstorming*, le mappe concettuali, il *cooperative learning* e la *flipped classroom*, oltre all'approccio storico/epistemologico che fa un po' da sfondo all'intero insegnamento.

L'utilizzo della *flipped classroom* (o classe capovolta), che consiste nel fornire materiale da leggere prima della lezione e far preparare agli studenti delle brevi presentazioni, o impostare la lezione come una discussione collettiva sul materiale letto precedentemente dagli studenti, è, secondo me, particolarmente adatto a questo insegnamento. Il materiale che fornisco, infatti, è alla portata dei ragazzi, quasi sempre in italiano e scritto con un taglio divulgativo. I testi, come l'articolo che racconta la storia di Marie-Anne Pierrette Paulze, donna di grande cultura, nota per lo più come la moglie di Antoine Lavoisier [11], servono anche a interessare e incuriosire gli studenti, a stimolare riflessioni come la figura delle donne nella storia della scienza. La *flipped classroom* è anche un modo per far partecipare tutti gli studenti durante le lezioni e ha come ulteriore effetto quello di far sì che gli studenti seguano con maggiore continuità il corso.

Per quanto riguarda il *cooperative learning*, utilizzo questo metodo per un'attività sul libro di testo di Eric Scerri intitolato 'Un racconto di sette elementi' [12]. Quando, durante le lezioni viene affrontato il quadro conoscitivo della metà del XIX secolo, dopo il congresso di Karlsruhe e la figura di Stanislao Cannizzaro, presento questo testo per parlare della scoperta della legge periodica degli elementi. Gli studenti divisi in gruppi devono preparare una relazione o in generale un prodotto (un video, una rappresentazione, una presentazione) sulla scoperta di un elemento chimico, prendendo spunto dal libro [12]. Generalmente, dedichiamo l'ultimo incontro alla presentazione dei lavori prodotti dai vari gruppi, come è successo nel 2022, quando le lezioni erano in modalità mista e gli studenti hanno avuto la possibilità di presentare i loro lavori alla presenza dell'autore che era collegato da remoto (Figura 3).

Queste lezioni sono apprezzate dagli studenti e la qualità dei loro lavori è sempre molto buona. In alcuni casi gli studenti sono riusciti a trovare materiale originale, come fotografie e altri documenti, o ad arricchire la narrazione storica con aspetti creativi, come nel caso di un video autoprodotta dagli stu-

denti sulla scoperta del Renio, che è risultato vincitore di un concorso nazionale indetto da ConChimica nel 2020 [13].

Negli ultimi due anni, ho introdotto anche una attività facoltativa, fuori dall'orario del corso, legata agli strumenti scientifici storici presenti nella collezione del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale, che è stata oggetto di un lavoro in stampa [10]. In questo caso, sfruttando le metodologie tipiche del contesto museale, gli studenti hanno apprezzato le potenzialità didattiche degli strumenti storici e hanno maturato un atteggiamento diverso nei confronti della collezione presente in Dipartimento.



Figura 3. Un'immagine tratta da un fotogramma dell'incontro degli studenti dell'insegnamento di Storia della Chimica ed elementi di didattica con Eric Scerrì, il 10 giugno 2022, a conclusione dell'attività sul libro 'Un racconto di sette elementi' [12]

Per concludere, anche per questo insegnamento, l'utilizzo di un approccio integrato che vede l'utilizzo di più metodologie ha permesso di avere una maggiore partecipazione dei ragazzi che sono molto interessati agli aspetti storici, filosofici ed etici della Chimica che emergono da alcune vicende che normalmente non vengono trattate a scuola, ma che hanno invece dei notevoli risvolti didattici.

4. Chimica Fisica e Laboratorio

Infine, vorrei dedicare alcune considerazioni all'insegnamento di Chimica Fisica e Laboratorio, che è obbligatorio al secondo anno della Laurea triennale in Chimica per l'Industria e per l'Ambiente e che è di 6 CFU di cui 3 sono di laboratorio, concentrate nel secondo semestre. Gli argomenti riguardano la spettroscopia, dai fondamenti quantomeccanici alle applicazioni delle principali spettroscopie molecolari: spettroscopia di assorbimento UV-visibile, spettroscopia di fluorescenza, spettroscopia infrarossa e spettroscopia di risonanza magnetica nucleare. Il programma è quindi molto denso di argomenti e concetti, con alcune parti piuttosto complesse sia dal punto di vista concettuale, che della trattazione che deve necessariamente utilizzare un linguaggio matematico avanzato. Per questo insegnamento, ho scelto tuttavia di limitare la trattazione matematica ad alcuni 'casi di studio', legati alla chimica quantistica, funzionali alla comprensione dei principi delle diverse spettroscopie, lasciando uno spazio significativo alla storia delle scoperte legate alle proprietà della luce, alla nascita della spettroscopia e agli esperimenti più rilevanti che hanno confermato la meccanica quantistica. L'approccio storico ha una funzione importante per far comprendere agli studenti l'evoluzione delle idee dalla metà del XIX secolo ai primi trent'anni del XX secolo, il ruolo degli esperimenti e dell'avanzamento delle tecniche, l'evoluzione degli strumenti che, nel caso della spettroscopia, si intreccia all'evoluzione della scienza chimica nel XX secolo. Tuttavia, l'approccio storico non sarebbe così efficace se non fosse affiancato alla didattica laboratoriale e a lezioni più interattive, dove, ad esempio, osserviamo da vicino uno strumento storico, come uno spettroscopio di Kirchhoff-Bunsen o un reticolo di Rowland, e riproduciamo un esperimento storico, tipo quello delle fenditure di Young o quello sulla diffrazione di Fraunhofer.

Alcune di queste esperienze sono state rese possibili grazie a un altro progetto speciale di didattica finanziato dall'Ateneo di Pisa: *'Spettroscopi storici versus spettroscopi home-made'* finanziato nel 2020 [14].

Le esperienze laboratoriali dell'insegnamento includono una parte dedicata ai principi della luce e agli elementi ottici che sono così fondamentali negli strumenti spettroscopici. Un'attività molto apprezzata dagli studenti, ad esempio, è quella con un monocromatore storico, degli anni '60 del secolo scorso, che ha un grosso potenziale didattico per come è stato concepito e che gli studenti utilizzano interfacciandolo con i loro smartphone (Figura 4) [15].



Figura 4. Due studenti durante una delle attività laboratoriali dell'insegnamento di Chimica fisica e laboratorio in cui stanno utilizzando il proprio smartphone per analizzare la luce attraverso il monocromatore storico

Anche in questo insegnamento, quindi, nonostante l'effettiva complessità dei concetti e l'uso di una matematica avanzata come strumento necessario a comprenderne a fondo i concetti, un approccio integrato, da un lato con l'approccio storico/epistemologico e dall'altro con una didattica laboratoriale STEM, risulta più efficace e più coinvolgente per gli studenti che si avvicinano per la prima volta alla spettroscopia.

Riferimenti

- [1] Sito dell'Università di Pisa con il Piano di Studio del Corso di Laurea in Chimica del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale (L-27 SCIENZE E TECNOLOGIE CHIMICHE), <https://www.unipi.it/index.php/lauree/regolamento/10295>.
- [2] V. Domenici, STEAM project-based learning activities at the Science Museum as an effective training for future Chemistry teachers, *Education Sciences*, 2022, **12**(1), 30 (<https://doi.org/10.3390/educsci12010030>).
- [3] V. Domenici, I musei scientifici come luogo privilegiato per la progettazione e la realizzazione di attività educative STE(A)M, in *La chimica nei musei. Creatività e conoscenza* (a cura di V. Domenici e L. Campanella), Pisa University Press, Pisa, 2020.
- [4] V. Domenici, Progettazione di attività didattiche STEAM in ambito museale durante i due anni di pandemia Covid-19, *CnS*, 2022, **2**, 38-40.
- [5] V. Domenici, Training of future Chemistry teachers by a historical/STEAM approach starting from the visit to an historical Science Museum, *Substantia*, 2023, **27**, 23-34 (<https://doi.org/10.36253/Substantia-1755>).
- [6] Pagina web del progetto speciale di didattica: <https://smslab.dcci.unipi.it/progetti-stem.html>
- [7] I. Fordyce, M. Massa, C. Scala, N. Vita, I "Giardini Chimici" al Bright 2020: la divulgazione scientifica ai tempi della DAD, *CnS*, 2021, **4**, 38-44.
- [8] Risorsa on-line sui giardini chimici: <https://bright.dcci.unipi.it/bright-2020/giardini-chimici.html>
- [9] V. Domenici, A course of history of chemistry and chemical education completely delivered in distance education mode during epidemic covid-19, *J. Chem. Educ.*, 2020, **97**(9), 2905-2908.
- [10] V. Domenici, Strumenti storici scientifici e insegnamento della chimica: i risultati di una attività svolta dagli studenti universitari del corso di laurea in Chimica dell'Università di Pisa, Rendiconti dell'Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, in stampa.
- [11] P. Cardillo, Un po' di gossip: Marie-Anne Pierrette Paulze: una donna e due geni per mariti, *La Chimica e l'Industria*, 2010, **3**, 92-98.
- [12] E. Scerri, *A tale of seven elements*, Oxford University Press, London, 2013.
- [13] Pagina web sulla premiazione degli studenti per il loro video sulla scoperta del Renio: <https://www.dcci.unipi.it/743-chemistry-talent-2020.html>
- [14] Pagina del progetto speciale di didattica: <https://smslab.dcci.unipi.it/versus-spettroscopi.html>
- [15] V. Domenici, Alcune attività didattiche sulle proprietà della luce visibile propedeutiche alla spettroscopia: l'esperienza di un corso universitario di Chimica fisica e laboratorio, in *Immagini e strumenti digitali nella didattica delle scienze* (a cura di V. Domenici e S. Giudici), Pisa University Press, Pisa, 2023.

Il Sistema Periodico di Primo Levi come spunto di percorsi didattici interdisciplinari

Maria Funicello e Lucia Chiummiento

Dipartimento di Scienze, Università della Basilicata, Potenza

e-mail: maria.funicello@unibas.it

Abstract. The book “Il Sistema Periodico” written by Primo Levi represents certainly a miliar stone in his life and in the life of all the chemistry students. In this brief article it will be represent as for example the tale on the element Carbon could be used to construct educational path for students of superior school of I and II grade.

Keywords: Sistema Periodico; Carbonio; percorsi didattici; multidisciplinarietà

1. Introduzione

Il libro “Il Sistema Periodico” è stato pubblicato per la prima volta da Einaudi nel 1975 (Figura 1) ed è suddiviso in 21 capitoli ognuno dedicato a un elemento della Tavola Periodica.

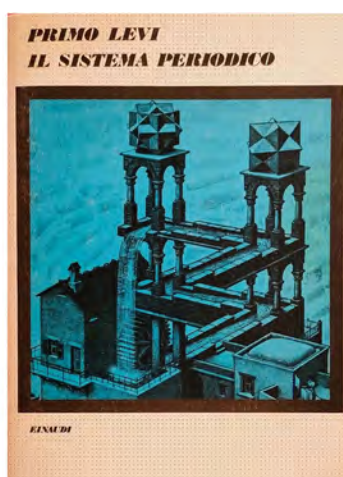


Figura 1. Foto di Primo Levi (sinistra) e copertina originale della prima edizione del suo libro “Il Sistema Periodico”

È un'opera particolare (come tutte quelle di Levi) in cui possono essere individuati più fili conduttori: innanzitutto la vita personale di Levi, poi il periodo storico che caratterizza la sua giovinezza con le leggi razziali e la deportazione e, infine, c'è anche l'aspetto del "mestiere di chimico" con tutto il fascino delle prove e degli errori.

Il libro è stato definito da Italo Calvino come "il più primoleviano di tutti", frase che ha dato il titolo a un convegno rivolto agli insegnanti di Scuola Superiore di I e II grado e organizzato in modalità a distanza nel novembre 2020, congiuntamente tra il Centro Studi Internazionale su Primo Levi e la Divisione di Didattica della Chimica. Tale convegno prevedeva nel suo programma [1] dei "laboratori", in cui sei capitoli del libro, dedicati a sei diversi elementi del sistema periodico, venivano analizzati a due voci, una per gli aspetti chimici e una per quelli di tipo umanistico, con l'idea di favorire un approccio interdisciplinare. I sei capitoli (elementi) scelti sono stati: Cerio, Vanadio, Zinco, Idrogeno, Ferro e Carbonio.

Nell'ambito del convegno io mi sono occupata del Carbonio, trattando la parte chimica, mentre la prof.ssa Valabrega ha curato la lettura, dal punto di vista umanistico, di questo stesso capitolo.

2. Discussione

Il capitolo dedicato al Carbonio è forse quello più noto e utilizzato per affrontare nelle scuole il tema del "Ciclo del Carbonio", per introdurre piccoli esperimenti [2] e per organizzare percorsi didattici coinvolgenti più discipline. A questo proposito, merita ricordare la rielaborazione del racconto, con l'utilizzo delle terzine dantesche, come hanno fatto in un progetto di qualche anno fa [3] gli studenti del Liceo Classico "Carlomanno" di Lauria (PZ).

Quindi, riprendendo un po' il percorso seguito nel convegno su Primo Levi del 2020, si è partiti dal racconto sul Carbonio per immaginare percorsi didattici interdisciplinari, ma un analogo lavoro potrebbe essere fatto utilizzando un qualsiasi altro capitolo/elemento.

Innanzitutto, si può cominciare leggendo in classe l'inizio del capitolo di cui qui di seguito sono riportati alcuni stralci molto significativi.

Il lettore, a questo punto, si sarà accorto da un pezzo che questo non è un trattato di chimica...

Non è neppure un'autobiografia, se non nei limiti parziali e simbolici in cui è un'autobiografia ogni scritto, anzi ogni opera umana: ma storia in qualche modo è pure. È, o avrebbe voluto essere, una microstoria, la storia di un mestiere e delle sue sconfitte, vittorie e miserie, quale ognuno desidera raccontare quando sente prossimo a conchiudersi l'arco della propria carriera, e l'arte cessa di essere lunga. Giunto a questo punto della vita, quale chimico, davanti alla tabella del Sistema Periodico ... non vi ravvisa sparsi i tristi brandelli

o i trofei, del proprio passato professionale?... Così avviene, dunque, che ogni elemento dica qualcosa a qualcuno (a ciascuno una cosa diversa), come le valli o le spiagge visitate in giovinezza: si deve forse fare un'eccezione per il carbonio, perché dice tutto a tutti, e cioè non è specifico, allo stesso modo che Adamo non è specifico come antenato ... Eppure, proprio verso il Carbonio ho un vecchio debito ... ecco, volevo raccontare la storia di un atomo di Carbonio ...

In queste frasi si coglie la spiegazione di quello che rappresenta il libro, non un'autobiografia, ma neanche un trattato di chimica, bensì un fare il punto, al termine della carriera, degli aspetti più rilevanti nel bene e nel male legati alla chimica.

E, siccome si parla del Carbonio, si può analizzare in aula la carta di identità del Carbonio, stimolando anche i ragazzi a riflettere sul perché questo elemento è così importante per la vita e perché la vita sulla Terra non si è, ad esempio, sviluppata sul Silicio, che pure può formare catene in cui più atomi dello stesso elemento sono legati tra loro. Può essere utile, prima di ritornare alla lettura di qualche altro passo del racconto, mostrare la Tavola Periodica dell'abbondanza (Figura 2) e far notare non solo la posizione e le differenze tra Carbonio e Silicio, ma anche il discorso dell'abbondanza dei vari elementi sulla Terra e del rischio del loro esaurimento.¹

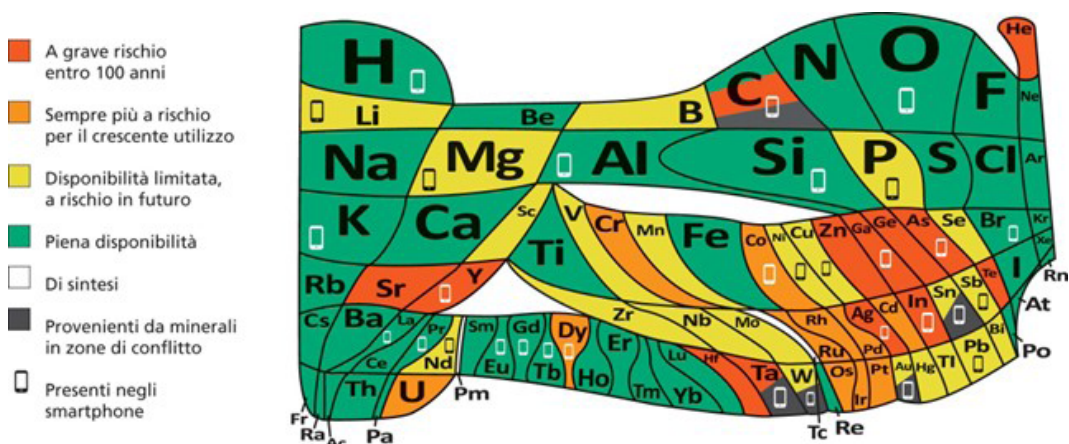


Figura 2. Tavola Periodica dell'abbondanza (Zanichelli)

Proseguendo nella lettura di altri brani del racconto e prendendo spunto dalla domanda che si fa Levi "se è lecito parlare di un certo atomo di Carbonio", si può introdurre un po' di storia della chimica, partendo dalla definizione di atomo e richiamando i concetti filosofici legati a tale definizione [4].

¹ Si suggerisce un approfondimento sull'Agenda 2030 del 2015, ora diventata 2050, e quindi un'integrazione con la sostenibilità e il programma di Educazione alla cittadinanza.

Qui si può dare ampio spazio ai concetti della teoria atomistica (contrapposta a quella del “continuum”) che, nonostante tutto, è stata sempre presente attraverso i secoli, anche se molto sottotraccia per ovvi motivi, fino a giungere a Dalton.²

E dalla definizione di Dalton si può procedere sempre con un approccio storico attraverso un rapido *excursus* degli esperimenti che hanno portato a evidenziare una strutturazione interna dell’atomo con la presenza delle particelle che lo costituiscono e che mostrano come esso *non* sia la parte indivisibile della materia, come indicava il termine greco.

A questo punto si può ritornare sulla lettura di qualche altro passo del racconto.

Il nostro personaggio giace dunque da centinaia di milioni di anni, legato a tre atomi di ossigeno e ad uno di calcio, sotto forma di roccia calcarea ... A lui, fino a questo momento, si addice il tempo presente ... è congelato in un eterno presente, appena scalfito dai fremiti moderati dell’agitazione termica. ... Il banco calcareo di cui fa parte giace in superficie ... alla portata dell’uomo e del suo piccone ... in un qualsiasi momento un colpo di piccone lo staccò e gli dette l’avvio verso il forno a calce, precipitandolo nel mondo delle cose che mutano. Venne arrostito affinché si separasse dal calcio ... lui, tuttora fermamente abbarbicato a due dei tre suoi compagni ossigeno di prima, uscì per il camino e prese la via dell’aria. La sua storia, da immobile, si fece tumultuosa ...

Si può, quindi, far notare agli alunni come dalla forma solida del carbonato il nostro atomo di carbonio si stacchi passando alla forma gassosa che gli consente un’assoluta libertà di muoversi e di vedere il mondo trasportato dal vento. Ogni parola in questi stralci di racconto fa pensare alla storia di Levi e al periodo storico particolare in cui ha vissuto, senza potersi mai sentire libero anche lui come il nostro atomo. Un approfondimento storico diventa, pertanto, assolutamente necessario.

In questo suo viaggio il nostro atomo è nelle condizioni di passare alla forma organica attraverso il fissaggio in una foglia per effetto del raggio di Sole: la trasformazione in glucosio, molecola complessa ed essenziale per la vita di tutte le specie viventi, avviene in modo silenzioso, senza costi e senza scarti, al contrario di ciò che l’uomo cerca di ripetere nei laboratori. Ancora una volta è possibile approfondire gli aspetti etici e filosofici che trapelano dai toni con cui si parla della CO₂.

... una impurezza, trenta volte meno abbondante dell’argon di cui nessuno si accorge ...

² Sarebbe utile il coinvolgimento dell’insegnante di Storia e Filosofia per approfondimenti sul tema.

Un esempio di possibile approfondimento legato al discorso della CO₂ e dell'energia può essere fatto introducendo l'Agenda 2030 con i suoi 17 obiettivi fondamentali per la salvezza dell'uomo e del pianeta (Figura 3), proprio soffermandosi sull'importanza della CO₂, dell'acqua, dell'energia e della fame nel mondo.



Figura 3. Obiettivi dell'Agenda 2030

Siccome il glucosio è importante per tutti gli esseri viventi è opportuno e semplice a questo punto introdurre (o riprendere) la chimica organica e parlare dei polisaccaridi, amido glicogeno e cellulosa, evidenziandone le caratteristiche e le differenze. Ma quel "certo" atomo di Carbonio che stiamo seguendo sarebbe potuto entrare anche a far parte di altri tipi di biomolecole, magari di un amminoacido particolare che poi va a formare una specifica proteina, occasione per trattare le caratteristiche degli amminoacidi e delle proteine, sia dal punto di vista chimico che biologico.

Si arriva così al termine di questo viaggio, seguendo il nostro atomo che, attraverso un bicchiere di latte, passa nel sangue di un uomo che sta scrivendo, proprio lui, l'autore del racconto, raggiunge il suo cervello e, attraverso una serie di impulsi dettati dal cervello, fa muovere la mano che stringe la penna e mette il punto che chiude il racconto e l'intera opera.

... È di nuovo fra noi, in un bicchiere di latte. È inserito in una lunga catena, molto complessa, tuttavia tale che quasi tutti i suoi anelli sono accettati dal corpo umano. Viene ingoiato ... E la catena pericolosamente frantumata ... Uno, quello che ci sta a cuore, varca la soglia intestinale ed entra nel torrente sanguigno: migra, bussa alla porta di una cellula nervosa, entra e soppianta un altro carbonio che ne faceva parte. Questa cellula appartiene ad un cervello, e questo è il mio cervello, di me che scrivo ... È quella che in questo istante, fuori da un labirintico in-

treccio di sé e di no, fa sì che la mia mano corra in un certo cammino sulla carta ... un doppio scatto, in su e in giù, fra due livelli di energia guida questa mia mano ad imprimere sulla carta questo punto: questo.

Al termine di questa rielaborazione del racconto di Primo Levi, finalizzata a mettere in luce aspetti che consentano proposte didattiche interdisciplinari destinate a diverse tipologie di istituti scolastici, è possibile segnalare eventuali ulteriori approfondimenti relativi allo sviluppo della chimica in questi ultimi 50 anni: nascita della plastica, abuso nel suo utilizzo, a causa della diffusa cultura dell'usa e getta (Figure 4 e 5), ricerca sulle nuove fonti di energia, uso di biomateriali in medicina ...



Figura 4. “Boom” della plastica: principali oggetti



Figura 5. Inquinamento causato dalla plastica non biodegradabile

Ma sarebbe anche stimolante per gli alunni di particolari tipologie di istituti scolastici parlare dello sviluppo di processi più ecosostenibili e di materiali riciclabili e biodegradabili (Figura 6).



Figura 6. Esempio di bottiglia di plastica in PLA (acido polilattico)

Infine, per rendere la proposta didattica utilizzabile anche nella Scuola Secondaria di I grado sarebbe utile proporre qualche semplice esperimento che evidenzi la produzione di biossido di carbonio, ad esempio, attraverso l'uso dei lieviti e altro.

Naturalmente questo è solo una piccolissima parte di tutto quello che si potrebbe fare.

3. Conclusioni

Al termine di questo contributo è importante sottolineare che la struttura del convegno organizzato dal Centro Studi Internazionale su Primo Levi e la Divisione Didattica della Chimica, in cui è stato utilizzato il duplice approccio scientifico e umanistico per una particolare tipologia di laboratorio, rappresenta un vero e proprio esempio di didattica innovativa, in cui si contaminano i settori scientifici e quelli umanistici per superare la dualità delle due culture.

Sarebbe auspicabile che tale esempio facesse da guida anche per altre “contaminazioni” di questo tipo per offrire agli studenti la capacità di lettura a 360 gradi di opere, sia filosofico-letterarie che prettamente scientifiche.

Riferimenti

- [1] <https://www.primolevi.it/it/sistema-periodico-volume-piu-primolevia-no-tutti>
- [2] M. I. Donnoli, V. Cantarelli, Viaggio di un atomo di Carbonio, *CnS*, 2022, **5**, 49-52.
- [3] L. D'Alessio, R. Galletta, G. Zaccara, *Viaggio nell'atomo di Carbonio*, Grafie, 2010.
- [4] Corso di Didattica della Chimica, *Atti X Scuola di Didattica e Ricerca Educativa "Ulderico Segre"*, Roma, 5-9 settembre 2018, pp. 28-50; scaricabile al link: https://www.soc.chim.it/sites/default/files/users/div_didattica/PDF/Corso%20di%20Didattica%20della%20Chimica_copertine.pdf

Insegnare chimica con passione tra i banchi di scuola

Alessandra De Togni^a, Lucia Giuffreda^b, Laura Orian^c

^aI.I.S. Ferraris-Fermi di Verona; ^bI.I.S. Pietro Scalcerle di Padova; ^cDipartimento di Scienze Chimiche Università degli Studi di Padova

e-mail: alessandra.detogni@gmail.com; luciagiuffreda@gmail.com;
laura.orian@unipd.it

Abstract. *Insegnare chimica con passione!* is the title of a volume published this year in the Epistemology and Didactics of Chemistry Series of Padua University Press, which collects contributions from numerous secondary school chemistry teachers in the Veneto region. The project, which came about as part of the Chemistry PLS, was a new experience for teachers who had the opportunity to disseminate some of the teaching and laboratory activities developed and implemented in the classroom through such an effective and interesting tool as the book. Organizing the content, collaborating with colleagues in writing the text and creating original images, actively participating in the editorial process, was a complex exercise through which the teacher-authors matured scientifically and personally, and saw their daily teaching efforts materialized in a product that is now available to many other teachers. It is precisely the effort to share experiences and exchange best practices that is a key aspect of teacher education whose work is valued and disseminated outside their classrooms. Giovanni Villani (ICCOM-CNR, Pisa) wrote the first chapter contributing as well as editor of the work together with Laura Orian and Marina Gobbo (University of Padua) to a deep reflection on the role of chemistry in our modern world. Eric Scerri (UCLA, California) edited the concluding chapter of the work after meeting and discussing with teachers the foundation and role of chemistry as a science and discipline. The presentation of the book and its contents are followed by elements of reflection on the significance of teaching chemistry in today's schools from the perspective of secondary school teachers.

Keywords: attività interdisciplinari; condivisione di buone pratiche; convegno degli insegnanti; cooperazione scuola-università; didattica laboratoriale; libro degli insegnanti

1. Introduzione

L'insegnamento della chimica nella scuola di oggi incontra numerose sfide. Se la chimica viene guardata con pregiudizio nella società, tra i banchi di scuola viene considerata una materia impegnativa e difficile.

La mancanza di risorse adeguate incide negativamente sulla didattica. L'assenza della pratica laboratoriale o, quando presente, l'utilizzo di una didattica laboratoriale in ambienti poco attrezzati o con materiali obsoleti, oppure non adeguatamente proposta, ostacola ulteriormente l'insegnante e la sua capacità di rendere la materia più interessante e pratica per gli studenti. Di fatto per lo studente la descrizione di fenomeni che avvengono su scala atomistica senza un solido e appropriato collegamento con l'esperienza sensoriale è difficile e poco stimolante.

Gli insegnanti devono colmare questo distacco emotivo che incide profondamente sull'apprendimento, ma spesso le ore di lezione sono poche, gli studenti sono individui con livello di formazione, esigenze e tempi diversi e trovare modalità didattiche che coinvolgano la classe intera, facilitino l'apprendimento e consentano a tutti di raggiungere gli obiettivi fissati è un compito faticoso.

Infine, c'è la pressione del risultato finale e molti docenti si ritrovano concentrati sulla preparazione all'esame a scapito di una comprensione più profonda dei concetti.

Non c'è da stupirsi se l'insegnante prova a tratti un senso di smarrimento o di frustrazione perché, pur ottemperando puntualmente ai suoi compiti, sente di non completare quella che è la sua missione educativa. In una società che evolve sempre più rapidamente e richiede cambiamenti in tutti i ruoli e fasce d'età, i bisogni formativi degli insegnanti dovrebbero essere affrontati con costanza.

Va anche sottolineato che questi bisogni sono significativamente diversi nel corso della carriera. In particolare, per un insegnante alle prime armi la gestione della classe è una sfida importante e spesso trae beneficio dal *mentoring* di colleghi più esperti, che sanno fornire consigli pratici per creare un ambiente disciplinato e positivo per l'apprendimento.

Un'altra difficoltà per i neofiti è il processo di valutazione che va portato avanti in modo efficace e costruttivo. Gli insegnanti più esperti invece, grazie alla loro riconosciuta esperienza, assumono incarichi di *leadership* all'interno della scuola, per i quali, così come il *mentoring*, servono però abilità e formazione specifiche. Diversamente dai colleghi più giovani, per loro non è immediato essere al passo con le tecnologie e le tendenze (lezioni *online*, utilizzo di nuove metodologie digitali, didattica inclusiva per citarne alcune) e potenziare le proprie capacità informatiche diventa un'esigenza irrinunciabile. Queste motivazioni spingono molti insegnanti a frequentare master, dottorati e corsi di formazione e aggiornamento.

Il convegno degli insegnanti di chimica, che da dodici anni viene organizzato presso il Dipartimento di Scienze Chimiche (DiSC) dell'Università degli Studi di Padova, è una proposta che mira a rispondere ad alcuni bisogni formativi degli insegnanti di chimica della scuola secondaria. È a tutti gli effetti un corso di formazione, ma i temi e le modalità vengono proposti e co-progettati dagli insegnanti che vi partecipano per apprendere, ma anche per condividere attivamente le loro pratiche e le loro conoscenze.

Indipendentemente dall'anzianità professionale, dalla scuola in cui insegnano, dalla provenienza geografica nella regione, dal *background* di studio individuale, i partecipanti condividono *in primis* una grande passione per l'insegnamento della chimica, che li motiva quotidianamente a entrare in classe e costruire un ambiente di apprendimento positivo e stimolante.

Questo contributo riporta l'esperienza del convegno annuale padovano e la storia di un libro nato nel corso di un'edizione "particolare" dello stesso, oltre all'esistenza di una rete di professionisti della didattica chimica che collaborano con entusiasmo [1-3].

2. Il convegno degli insegnanti

Undici anni fa la Prof.ssa Marina Gobbo del Dipartimento di Scienze Chimiche (DiSC) dell'Università degli Studi di Padova, attivamente coinvolta nell'organizzazione dei percorsi di formazione e abilitazione degli insegnanti della scuola secondaria, pensò di organizzare un piccolo convegno del tutto analogo ai convegni scientifici, nel quale i protagonisti fossero gli insegnanti di chimica della scuola secondaria. Invitati a presentare una loro lezione o esperienza pratica, in molti risposero positivamente a questa occasione di condividere buone pratiche con colleghi. Qualche anno dopo il PLS Chimica del DiSC [4] inserì questo convegno, dal titolo *Insegnare chimica con passione!* tra le attività periodiche di formazione degli insegnanti, e ne fissò la data al primo venerdì di settembre di ogni anno. Durante la pandemia, nel 2020, esso fu organizzato esclusivamente *online* e da allora si tiene in modalità duale per allargare la platea dei partecipanti.

L'organizzazione segue uno schema fisso. In apertura c'è una conferenza plenaria su tematiche di interesse e attualità (Tabella 1), cui partecipano docenti del DiSC e di altri atenei italiani e professionisti (chimici e non) provenienti dal mondo aziendale. Ad esempio, nel 2021 è intervenuto in videoconferenza il Prof. Eric Scerri [5], un autorevole esperto di storia e filosofia della chimica a livello internazionale; invece, nel 2023 il Dr. Andrea Di Lenna [6] ha trattato del *team building* e degli aspetti di relazione e interazione in ambito didattico.

Alla *lecture* iniziale seguono gli interventi degli insegnanti con la modalità presentazione seguita da domande, in presenza di un *chair* moderatore. Usualmente sono previsti momenti di discussione su temi proposti dagli insegnanti; molto importanti sono anche i momenti informali di incontro e scambio tra i partecipanti. In chiusura, il referente del PLS Chimica presenta le attività in programmazione per l'anno scolastico in avvio.

Le iscrizioni al convegno si aprono generalmente nella tarda primavera e vengono gestite attraverso il portale PLS della Scuola di Scienze dell'Università [4]. Da qualche anno le iscrizioni sono possibili anche attraverso il portale SOFIA.

Tabella 1. Relatori e conferenze di apertura in tutte le edizioni del convegno “Insegnare chimica con passione!”

Edizione 1 del 2013	
Marina Gobbo , Università di Padova Marina Scandola , ISSS Dal Cero – San Bonifacio (Verona)	<i>L'esperienza del Tirocinio Formativo Attivo nella classe A13 – Chimica e Tecnologie chimiche</i>
Edizione 2 del 2014	
Fabrizio Floris , Formazione docenti e personale ATA – Regione Veneto	<i>L'integrazione delle scienze e dei saperi e l'importanza della didattica laboratoriale</i>
Edizione 3 del 2015	
Vincenzo Balzani , Università di Bologna	<i>Accendere un fuoco</i>
Edizione 4 del 2016	
Silvano Fuso , esperto di didattica delle discipline scientifiche e divulgatore scientifico	<i>Calcinazione, combustione, respirazione. La rivoluzione chimica di Lavoisier</i>
Edizione 5 del 2017	
Giorgio Moro , Università di Padova	<i>La bellezza delle teorie chimiche</i>
Edizione 6 del 2018	
Mauro Sambi , Università di Padova	<i>Microscopie di sonda: strumenti per un'estetica molecolare</i>
Edizione 7 del 2019	
Fernando Formaggio , Università di Padova	<i>Peptidi oltre la biologia</i>
Edizione 8 del 2020	
Gianpietro Frison , UOSD Laboratorio di Igiene Ambientale e Tossicologia Forense (LIATF), Dipartimento di Direzione Medica di Presidio Ospedaliero di Mestre Azienda ULSS 3 Serenissima	<i>Dalle droghe tradizionali alle nuove sostanze psicoattive: aspetti epidemiologici e tossicologico-forensi</i>
Edizione 9 del 2021	
Eric Scerri , University of California Los Angeles (USA)	<i>A brief history of the elements and the periodic table</i>
Edizione 10 del 2022	
Valentina Domenici , Università di Pisa	<i>Dalla ricerca scientifica alla sperimentazione didattica: il caso dell'olio di oliva extravergine e dei metodi spettroscopici per rivelare alcune frodi</i>
Edizione 11 del 2023	
Andrea Di Lenna , CEO & Fondatore di Performando	<i>L'illusione è crederci. Una mattina insieme al Dr. Andrea Di Lenna</i>

3. Il libro degli insegnanti

Al fine di promuovere la condivisione di esperienze didattiche alcuni progetti di didattica della chimica presentati nel convegno del 2021 sono stati raccolti in un libro (Figura 1). Si tratta di progetti originali proposti dai docenti, o rielaborazioni creative di attività presentate nei convegni precedenti, Pur nella diversità, condividono l'idea che un buon progetto didattico, oltre agli aspetti meramente conoscitivi, deve suscitare la curiosità, favorire l'integrazione di altre discipline e, infine, promuovere l'educazione sociale.

Per molti docenti coinvolti si è trattato di un'esperienza nuova che ha contribuito alla crescita professionale e allo sviluppo di nuove competenze ed è stata vissuta con entusiasmo per l'opportunità di condividere metodi e metodologie di insegnamento con altri docenti.

Ovviamente non sono mancati gli ostacoli. La ricerca delle parole giuste, delle spiegazioni più chiare, delle attività di laboratorio più significative si è rivelata impegnativa, così come la scelta delle risorse visive che consentissero di illustrare i concetti in modo chiaro e accattivante, senza alimentare fraintendimenti o imprecisioni.



Figura 1. Copertina del libro *Insegnare chimica con passione!* [7]

Il libro presenta sette attività laboratoriali evidenziando applicazioni pratiche atte a mostrare agli studenti come la chimica possa aiutare a risolvere problemi reali, migliorare la salute, preservare l'ambiente e promuovere lo sviluppo sostenibile. L'obiettivo è contribuire a diffondere una visione più equilibrata e informata sulla chimica e consentire agli studenti di avvicinarsi ad essa senza timori e pregiudizi e di apprezzarne il valore nella nostra società.

Le esperienze riportate nel testo partono da spunti piuttosto semplici e intuitivi, ma si prestano ad essere sviluppate su diversi livelli di approfondimento.

Il libro è impreziosito dai contributi del prof. Giovanni Villani, che nel capitolo iniziale discute l'aspetto culturale della chimica, e del prof. Eric Scerri, filosofo della scienza, che nel capitolo finale discute il ruolo e la collocazione della prospettiva microscopica nell'insegnamento della chimica. Di seguito è riportata una breve sintesi delle attività proposte nelle diverse esperienze.

Capitolo 2: Limone e arancio: un botto di energia ... grazie al limonene, una molecola chirale (N. Schmidt)

Il lavoro parte da una domanda: perché il succo di limone e/o di arancio sgocciolato su un palloncino in lattice non lo fa scoppiare, mentre l'olio essenziale contenuto nella buccia dell'agrume lo fa scoppiare? I ragazzi vengono spinti a formulare una serie di ipotesi (è questione di acidità ... di solubilità ... di reattività?), a verificarle e a escluderle fino ad arrivare all'ipotesi definitiva. L'esperienza, in sé molto semplice, consente di lavorare sul metodo sperimentale ma anche di poter parlare di chiralità dei polimeri e di principi nutritivi.

Capitolo 3: Quanto hai diluito la bibita? Un approccio particolare alla taratura degli strumenti (E. Paschetta, S. Fiammetta)

Anche in questo caso si parte da domande-stimolo: come si fa a capire se una bevanda è diluita? E come si fa a capire *quanto* è stata diluita? La risposta è il colore e la sua intensità. Questa esperienza offre l'occasione per parlare di misura, misurazione e taratura di uno strumento, ma anche di metodo dei minimi quadrati, precisione/accuratezza, riproducibilità. Non vengono volutamente utilizzati strumenti analitici quali lo spettrofotometro, ma uno smartphone sul quale è presente l'app *Color Grab*. In questo modo si alimenta negli studenti non solo il sapere, ma anche il saper fare. L'elaborazione dei dati viene effettuata attraverso un foglio di calcolo.

Capitolo 4: Segnali di fumo, ovvero come far capire ai ragazzi i pericoli del tabagismo attraverso un semplice esperimento (C. Mazzucato, L. Pavanello)

Questa esperienza si inserisce in un percorso di *Educazione alla salute: lotta al tabagismo* e affronta il problema del fumo della sigaretta e dei suoi

effetti sui nostri polmoni da un punto di vista pratico. Con un dispositivo molto semplice, preparato dagli studenti, si simula l'inalazione del fumo: si raccoglie il fumo di una intera sigaretta all'interno di una bottiglia di plastica e poi lo si scarica facendolo passare attraverso un filtro precedentemente pesato. Già l'osservazione visiva consente di verificare la significatività dei residui carboniosi raccolti sul filtro. Per pesata, li si quantifica. Se la scuola è opportunamente attrezzata, sono possibili analisi spettrofotometriche e cromatografiche sui residui raccolti.

Capitolo 5: Molecole al computer: calcoli per la chimica in classe (M. Bortoli, M. Cestaro, A. De Togni, L. Gianni, E. Lion, L. Giuffreda, R. Predonzan, R. Romualdi, L. Orian)

Questa attività nasce da una co-progettazione tra università e scuole superiori. Si tratta dello studio computazionale della termodinamica della reazione di trasferimento di idrogeno da un antiossidante a un radicale. Dopo un breve corso rivolto ai docenti sulle basi della chimica computazionale, ciascun insegnante, con il supporto di un tutor universitario, ha realizzato con i propri studenti un laboratorio in aula informatica sull'attività antiossidante di sostanze naturali (polifenoli). Tale progetto ha visto la collaborazione del centro di calcolo CINECA, che ha fornito un budget significativo di ore calcolo. Il laboratorio ha ottenuto un riconoscimento dal MIUR nel 2021 come contributo verso la realizzazione della Repubblica digitale.

Capitolo 6: Oceani e clima (E. Corteggiani, P. Laveder)

Il percorso è costituito da quattro esperienze nelle quali si utilizzano conoscenze e competenze di chimica di diverso livello per studiare fenomeni complessi relativi alla chimica degli oceani, in particolare collegati al cambiamento climatico. Si va quindi a valutare l'effetto dei gas atmosferici sul pH, la solubilità della CO_2 al variare della temperatura, l'effetto della concentrazione di CO_2 sugli esoscheletri e l'efficienza fotosintetica al variare della concentrazione di CO_2 e del pH. Le esperienze sono intuitive e consentono di lavorare sul modello sperimentale.

Per ogni attività è prevista anche una fase di ricerca in rete di dati affidabili, sui quali fare valutazioni critiche e considerazioni generali.

Capitolo 7: Alginato nei sistemi di somministrazione dei farmaci (M. Cestaro, G. Kennedy)

In questo laboratorio, svolto originariamente secondo modalità CLIL, si vanno a produrre e studiare capsule di alginato come possibile veicolo edibile per la somministrazione dei farmaci per via orale, eventualmente ricoperte da chitosano per favorire il rilascio graduale del principio attivo, simulato da opportuni coloranti. Le perle di alginato vengono prodotte a diversi valori di pH, per tenere conto dei diversi ambienti del corpo. Il rilascio viene seguito per

via spettrofotometrica, mediante retta di taratura opportunamente costruita. I dati vengono rielaborati con foglio di calcolo.

Capitolo 8: Alla scoperta del suolo ... presentazione di un ciclo di attività sperimentali per studenti delle scuole secondarie (E. Regni, M. Laveder, S. Nardi, G. Concheri, M. C. Della Lucia, G. Concheri)

L'ultimo progetto presenta sei attività sperimentali di particolare efficacia per lo studio di un sistema complesso quale il suolo. Si comincia dalle forme di *humus*, per poi proseguire con la misura di acqua e aria nel terreno, con l'analisi fisico-meccanica (permeabilità e tessitura), con la ricerca degli abitanti del suolo, con la misura del pH e dei carbonati. Lo studio proposto ha come finalità ultima il rafforzamento della consapevolezza che il suolo è un bene prezioso per l'umanità da proteggere e salvaguardare.

Tabella 2. Sintesi delle diverse attività presentate nel libro *Insegnare chimica con passione!* in termini di prerequisiti, obiettivi, collegamenti interdisciplinari e educazione civica

Titolo	Prerequisiti	Obiettivi	Collegamenti interdisciplinari	Educazione civica
<i>Limone e arancio: un botto di energia ... grazie al limonene, una molecola chirale</i>	Legami chimici Acidi e basi Composti organici di base	Applicare le fasi del metodo sperimentale Comprendere i concetti fondamentali delle reazioni chimiche Riconoscere la chiralità negli oggetti/ molecole	Chimica generale Chimica organica Biologia	Educazione al benessere e alla salute: educazione alimentare
<i>Quanto hai diluito la bibita? Un approccio particolare alla taratura degli strumenti.</i>	Soluzioni e loro concentrazione Diluizione Piano cartesiano Equazione della retta	Distinguere tra grandezza, misura e misurazione Comprendere il significato di taratura Sviluppare capacità di osservazione	Chimica generale Chimica analitica Fisica Matematica TIC	Educazione al benessere e alla salute: educazione alimentare Educazione digitale e uso delle tecnologie

<i>Segnali di fumo, ovvero come far capire ai ragazzi i pericoli del tabagismo attraverso un semplice esperimento</i>	Miscugli omogenei ed eterogenei Tecniche di separazione Pressione dei gas	Applicare il metodo scientifico Sviluppare abilità sperimentali Comprendere gli effetti del fumo sulla salute umana	Chimica generale Biologia Igiene e Anatomia Fisica	Educazione al benessere e alla salute: lotta alle dipendenze (tabagismo)
<i>Molecole al Computer: calcoli per la chimica in classe</i>	Legami chimici Formule molecolari e formule di struttura Principi di termodinamica	Saper utilizzare software di editing molecolare Comprendere la capacità predittiva della chimica computazionale Collaborare con un centro di calcolo internazionale	Chimica Biologia Informatica Matematica	Educazione digitale e uso delle tecnologie Educazione alla salute e al benessere: educazione alimentare
<i>Oceani e clima</i>	Solubilità dei gas Equilibrio acido-base Equilibri di solubilità Fotosintesi	Applicare il metodo sperimentale Comprendere la complessità degli equilibri Saper cercare dati affidabili	Chimica Biologia Matematica	Educazione ambientale: conoscenza e tutela del territorio Agenda 2030
<i>Alginato nei sistemi di somministrazione dei farmaci</i>	Legami primari e secondari Acidi, basi e pH Polimeri Principi di spettrofotometria	Applicare il metodo sperimentale Sviluppare capacità di sperimentazione Stimolare l'analisi critica dei risultati	Chimica organica Chimica analitica Biologia	Educazione alla salute e al benessere: farmaci e salute

Alla scoperta del suolo...	Densità Equilibrio chimico Equilibrio acido-base e pH Idrolisi e tamponi Solubilità	Comprendere e utilizzare il metodo sperimentale Sviluppare la capacità di osservazione specifica Potenziare la capacità di raccogliere e analizzare dati	Chimica Biologia Scienza della Terra	Educazione ambientale: sviluppo ecosostenibile e tutela del patrimonio ambientale Agenda 2030
----------------------------	---	--	--	--

4. La rete degli insegnanti

Riunire insegnanti di chimica provenienti da scuole e province diverse per parlare di chimica ed esperienza didattica è stata una scelta lungimirante. Ripetere l'esperienza annualmente con continuità ha portato alla nascita di un gruppo in continua espansione, anche grazie al passaparola tra insegnanti che ha portato all'inclusione di insegnanti sia esperti sia giovani, dalla regione Veneto, ma anche dal Trentino, dalle Marche e dal Piemonte. Lo scambio di idee e risorse didattiche e il supporto professionale sono elementi centrali nella rete. L'organizzazione è decisiva: il canale di comunicazione utilizzato è la newsletter del PLS Chimica, che viene inviata ogni venti giorni e mantiene il gruppo coinvolto.

Inoltre, durante l'anno vengono organizzati workshop tematici che sono occasione di incontro, e vengono proposte attività che incentivano la collaborazione, come il laboratorio intitolato *Mettiamoci in gioco*, nel corso del quale 25 insegnanti della scuola secondaria hanno collaborato per costruire un gioco, successivamente realizzato in versione da tavolo e digitale e, recentemente, pubblicato in lingua italiana e inglese [8]. A tutto ciò si devono aggiungere le conferenze svolte presso le scuole, tenute da vari docenti del DiSC con finalità di orientamento degli studenti del penultimo e ultimo anno di scuola, e proposte in modalità cluster (classi di scuole diverse riunite in una stessa sede).

5. Conclusioni

L'organizzazione annuale del convegno degli insegnanti di chimica da parte del DiSC ha portato alla creazione di una rete regionale capace di realizzare obiettivi ambiziosi, tra i quali la scrittura di un volume che raccoglie esperienze didattiche. Il successo di *Insegnare chimica con passione!* sta nel rispondere all'esigenza di fare rete tra insegnanti, per un confronto e uno scambio di buone pratiche, e per una riflessione collettiva e in piccoli grup-

pi sulla professione e sull'adattamento della didattica alle nuove esigenze dell'utenza scolastica.

È, inoltre, fondamentale che i docenti di chimica realizzino che dispongono di molti spazi nei quali portare il proprio contributo e arricchire la propria professionalità: a livello nazionale, la Divisione Didattica della Società Chimica Italiana, a livello internazionale, i molti workshop e i convegni sulla didattica della chimica.

Riferimenti

- [1] K. Vangrieken, F. Dochy, E. Raes, E. Kynndt, Teacher collaboration: A systematic review, *Educational Research Review*, 2015, **15**, 17-40.
- [2] T. Levine, A. Marcus, How the structure and focus of teachers' collaborative activities facilitate and constrain teacher learning, *Teaching and Teacher Education*, 2010, **26**, 389-398.
- [3] P. Reeves, W. Pun, K. Chung, Influence of teacher collaboration on job satisfaction and student achievement, *Teaching and Teacher Education*, 2017, **67**, 227-236.
- [4] PLS Chimica, Dipartimento di Scienze Chimiche, Università di Padova: <https://pls.scienze.unipd.it/chimica> (ultimo accesso: novembre 2023).
- [5] E. Scerri, Lezione di Eric Scerri all'Università di Padova: <https://www.youtube.com/watch?v=3Kh1gOjLIUk> (ultimo accesso: novembre 2023).
- [6] "Insegnare chimica con passione!" è possibile. L'evento con l'Università degli Studi di Padova: <https://www.performando.it/insegnare-chimica-con-passione-e-possibile-levento-con-luniversita-degli-studi-di-padova/> (ultimo accesso: novembre 2023).
- [7] L. Orian, M. Gobbo, G. Villani (a cura di), *Insegnare Chimica con Passione!*, Padova University Press, 2023: <https://www.padovauniversitypress.it/it/publications/9788869383304> (ultimo accesso: novembre 2023).
- [8] M. Bortoli, A. Balasso, G. Carta, M. Cestaro, V. Colla, A. De Togni, G. Gallani, C. Giacometti, L. Gianni, L. Giuffreda, M. Granella, M. Iarabek, E. Lion, G. Mazzi, C. Migale, S. Milan, P. Molesini, M. Moretto, R. Predonzan, O. Priolisi, R. Romualdi, C. Rubini, S. Scarfi, E. Tobaldini, M. Dalla Tiezza, E. Nale, M. Bellanda, G. Kennedy, G. Sella, A. Lanza, L. Orian, Chemical Quest: general knowledge and popular culture quizzes about the elements in a board game for the class, *Chemistry Teacher International*, 2023, **5**(4), 471-480: <https://doi.org/10.1515/cti-2023-0045> (ultimo accesso: novembre 2023).

La formazione degli insegnanti come motore dell'innovazione

Mariano Venanzi

Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche,

Università di Roma "Tor Vergata"

e-mail: venanzi@uniroma2.it

Abstract. In this work, we briefly introduce the different levels of training (initial, in-service) of school teachers and academic staff in view of the new law approved in June 2022. The state of art of the organization of the different teacher training programs has been described and briefly commented, focusing on their priorities and critical issues.

Keywords: Formazione iniziale docenti; formazione in servizio docenti; formazione docenti universitari

1. Introduzione

Credo che l'introduzione migliore a questo mio contributo siano due citazioni autorevoli. La prima proviene dall'Agenda 2030 dell'ONU e recita testualmente: 'L'educazione è la premessa essenziale per accelerare il raggiungimento di tutti gli obiettivi di sviluppo sostenibile'. Che insieme a questa seconda citazione: 'Lo sviluppo delle competenze dei docenti è l'iniziativa politica che presenta la maggiore probabilità di miglioramento della qualità dell'istruzione' (OECD, Organizzazione per la Cooperazione Economica e lo Sviluppo, 2009), rende conto perfettamente di come la formazione dei docenti a tutti i livelli di istruzione rappresenti il vero motore di ogni reale innovazione e uno dei pochi modi, se non il solo, di sedimentare risultati non effimeri.

In questo contributo vorrei toccare brevemente tre aspetti: a) la formazione iniziale degli insegnanti della scuola; b) la loro formazione in servizio; c) la formazione dei docenti universitari, facendo il punto sulla situazione attuale e mettendone in luce le criticità.

2. La formazione iniziale degli insegnanti della scuola

C'è una sostanziale asimmetria tra la formazione iniziale dei docenti dell'infanzia, della scuola primaria e delle istituzioni AFAM (Alta Formazione Artistica, Musical e Coreutica) e quella dei docenti della scuola secondaria di primo e secondo grado. Per i primi esistono percorsi di laurea strutturati specifici per l'insegnamento (Laurea in Scienze della Formazione Primaria, una laurea magistrale a ciclo unico di durata quinquennale), mentre per i docenti AFAM l'offerta formativa si articola su tre livelli in analogia alla formazione universitaria.

Al contrario, la formazione iniziale degli insegnanti della scuola secondaria ha avuto nell'ultimo quindicennio un percorso piuttosto accidentato, che dalla chiusura delle scuole di specializzazione (SISS), avvenuto nel 2009, è passata attraverso il Tirocinio Formativo Attivo (TFA), attivato per due cicli, i percorsi abilitanti speciali (PAS), per finire ai percorsi 24 CFU, forma abortita dei percorsi FIT 'Buona Scuola', di cui sono stati attivati ben cinque cicli prima della definitiva chiusura (31 ottobre 2022).

Finalmente, il decreto-legge 36/2022, seguito a più di un anno di distanza dal decreto attuativo del 25 settembre 2023, ha dato attuazione alla riforma della formazione dei docenti prevista nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, introducendo un percorso formativo universitario e accademico di formazione iniziale e abilitazione dei docenti delle scuole secondarie di primo e secondo grado, compresi gli insegnanti tecnico-pratici. Il percorso è basato su un modello formativo strutturato tra l'Università e la Scuola, e prevede 60 crediti formativi (CFU), la cui acquisizione abilita ad accedere ad un concorso nazionale che si terrà su base regionale o interregionale. A seguito del superamento di tale concorso, il futuro docente accede a un periodo di prova in servizio di un anno. La formazione riguarda l'ambito psicologico, che si occupa della dimensione cognitiva e affettiva dello studente, l'ambito sociologico, che affronta la questione del rapporto scuola-società, l'ambito metodologico-didattico, che tratta i mezzi, i metodi e gli strumenti dell'insegnamento, e l'ambito dei contenuti, proprio dei saperi disciplinari.

Il decreto attuativo del settembre 2023 specifica i crediti assegnati a ogni ambito. In particolare, sono previsti 10 CFU di ambito pedagogico, 3 relativi alle disabilità e disturbi evolutivi specifici, 3 di area linguistica digitale, 4 per le discipline psico-socio-antropologiche, 2 dedicati alle metodologie didattiche, 2 agli aspetti legislativi della scuola e della professione, 16 di ambito disciplinare, 20 di tirocinio diretto e indiretto.

Significativamente, la frequenza delle attività è obbligatoria, con i corsi erogati per il 70% in presenza, riservando alle attività in telematica un massimo del 20%, e con l'ulteriore condizione che le attività di tirocinio e di laboratorio didattico vengano effettuate in presenza. L'esame finale prevede una prova scritta (analisi critica relativa al tirocinio diretto) e una lezione simulata.

Mi preme sottolineare un aspetto di questa formazione che giudico molto

positivamente: la collaborazione strutturata tra università e scuola, che si realizza attraverso il coinvolgimento di docenti tutor, provenienti dalla scuola secondaria di primo e secondo grado, che dovranno sovrintendere alle attività di tirocinio diretto e indiretto. Sottolineo l'importanza di queste attività di formazione, sia per quanto riguarda il tirocinio diretto, che prevede attività di osservazione, analisi e progettazione, sia di quello indiretto, che comporta la realizzazione di attività funzionali all'insegnamento. I ruoli del tutor coordinatore e del tutor scolastico sono, a questo riguardo, fondamentali, a garanzia del raggiungimento degli obiettivi formativi proposti.

Nel regime transitorio sono previsti percorsi di formazione abbreviati per coloro che hanno maturato precedenti esperienze formative (24 CFU, docenza nella scuola, vincitori di concorso senza abilitazione), sui quali per brevità non mi dilungo, rinviando alla lettura del decreto attuativo.

Mi interessa invece sottolineare le competenze che dovranno acquisire i futuri docenti a conclusione del periodo di formazione:

- a) competenze *culturali, disciplinari, pedagogiche, psicopedagogiche, didattiche e metodologiche*, in relazione ai nuclei fondanti dei saperi e ai traguardi di competenza fissati per gli studenti;
- b) competenze proprie della *professione e della funzione docente* (pedagogiche, psicopedagogiche, relazionali, orientative, valutative, organizzative, didattiche, tecnologiche e giuridiche) integrate con i saperi disciplinari, nonché con le competenze giuridiche relative alla legislazione scolastica.

Queste competenze dovrebbero essere seguite dalle capacità:

- di progettare, tramite attività di programmazione di gruppo e tutoraggio tra pari, percorsi didattici flessibili e adeguati alle capacità e ai talenti degli studenti. Tali attività, da promuovere nel contesto scolastico, in sinergia con il territorio e la comunità educante, devono favorire l'apprendimento critico e consapevole, l'orientamento, nonché l'acquisizione delle competenze trasversali da parte degli studenti, tenendo conto delle soggettività e dei bisogni educativi specifici di ciascuno di essi. Particolare attenzione è riservata al benessere psicofisico ed educativo degli allievi con disabilità e bisogni educativi speciali;
- di svolgere con consapevolezza i compiti connessi con la funzione docente e con l'organizzazione scolastica.

In definitiva, ai docenti è richiesto di saper gestire un processo multidimensionale e multilivello che necessita della combinazione di competenze disciplinari, metodologiche-didattiche, comunicativo-relazionali, organizzative, riflessive e di ricerca.

Su tutto questo pesa la revisione e l'aggiornamento della tipologia delle classi di concorso per l'accesso ai ruoli del personale docente della scuola secondaria

di primo e secondo grado, che si pone l'obiettivo, *attraverso la loro razionalizzazione e il loro accorpamento*, di promuovere dei profili professionali. Il provvedimento è a tutt'oggi allo studio nelle sedi ministeriali preposte.

3. La formazione in servizio dei docenti della scuola

Il decreto-legge del giugno 2022 regola anche la formazione in servizio dei docenti della scuola, rendendola obbligatoria per tutti i docenti a decorrere dall'anno scolastico 2023-2024. La formazione continua prosegue e completa la formazione iniziale dei docenti secondo un sistema integrato, volto a introdurre metodologie didattiche innovative e a migliorare le competenze linguistiche, digitali, pedagogiche e psicopedagogiche, nonché le competenze volte a favorire la partecipazione degli studenti.

Il percorso di durata triennale prevede attività di progettazione, tutoraggio, accompagnamento e guida allo sviluppo delle potenzialità degli studenti, con lo scopo di favorire il raggiungimento di obiettivi scolastici specifici e la sperimentazione di nuove modalità didattiche. L'obiettivo è quello di rafforzare le competenze digitali e l'uso critico e responsabile degli strumenti digitali, anche con riferimento al benessere psicofisico degli allievi con disabilità e ai bisogni educativi speciali, nonché alle pratiche laboratoriali e di inclusione. Significativamente, la partecipazione alle attività formative dei percorsi dovrà essere svolta al di fuori dell'orario di insegnamento.

L'elenco dei contenuti dei percorsi di formazione continua è ben lungo, e prevede:

- c) l'aggiornamento delle competenze negli ambiti della pedagogia e delle metodologie e tecnologie didattiche;
- d) l'approfondimento dei contenuti specifici della disciplina di insegnamento;
- e) l'utilizzo di strumenti e tecniche di progettazione-partecipazione a bandi nazionali ed europei;
- f) lo studio dei processi di *governance* della scuola, finalizzato al miglioramento dell'offerta formativa dell'istituzione scolastica mediante la formazione tecnico-metodologica e socio-relazionale dello staff e delle figure di sistema;
- g) l'acquisizione di metodologie atte ad aumentare la leadership educativa;
- h) l'acquisizione di tecniche che favoriscano l'inclusione scolastica nella classe con alunni disabili;
- i) la messa a punto di strategie di orientamento formativo e lavorativo;
- j) il potenziamento delle competenze in ordine alla valutazione degli alunni secondo i profili applicativi del sistema nazionale di valutazione delle istituzioni scolastiche;
- k) il potenziamento delle tecniche della didattica digitale.

A questo scopo verrà istituita una Scuola di Alta Formazione dell'Istruzione, posta sotto la vigilanza del Ministero dell'Istruzione e del Merito. La Scuola dovrà promuovere e coordinare la formazione in servizio dei docenti di ruolo, coordinare e indirizzare le attività formative dei dirigenti scolastici, dei direttori dei servizi amministrativi generali, del personale amministrativo, tecnico e ausiliario e favorire la partecipazione dei docenti alla formazione e alla ricerca educativa.

Tra i compiti della Scuola ci sono quelli di definire gli obiettivi formativi dei percorsi di formazione, di procedere all'accreditamento delle istituzioni deputate a erogare la formazione continua e di curare il raccordo tra formazione iniziale e formazione in servizio dei docenti.

Per lo svolgimento delle sue attività istituzionali, la Scuola si avvarrà dell'Istituto Nazionale di Documentazione, Innovazione e Ricerca Educativa (INDIRE) e dell'Istituto Nazionale per la Valutazione del Sistema educativo di Istruzione e di formazione (INVALSI). Potrà, inoltre, stipulare convenzioni con le Università, con le istituzioni AFAM e con soggetti pubblici e privati, fornitori di servizi certificati di formazione.

Uno degli aspetti più significativi delle attività formative previste è che la ricerca in didattica è riconosciuta come una dimensione portante della funzione docente. Al docente viene richiesto di sperimentare nuove modalità didattico-formative che connettano riflessività teorica con la pratica didattica. La ricerca in didattica diventa, dunque, uno strumento per comprendere e intervenire nelle realtà educative, mediante processi iterativi di azione e riflessione scanditi dai momenti di *interazione-osservazione-riflessione-progettazione*.

Il docente-ricercatore dovrà essere in grado di riflettere in maniera sistematica sulle proprie pratiche didattiche, di valutare le esigenze di formazione, di intraprendere ricerche, di incorporare nell'insegnamento le ricerche effettuate e di saper valutare l'efficacia delle strategie di insegnamento adottate, tenendo conto che il contesto ambientale e le dinamiche sociali diventano parte inscindibile dell'oggetto di studio.

La didattica contemporanea è una didattica che procede per problemi. È stato scritto che *'rispetto alla necessità di assumere continuamente decisioni, di compiere valutazioni ex ante, in itinere, ex post dei progetti formativi, delle risorse didattiche, dei processi e dei prodotti della formazione è indispensabile non tanto la conoscenza di tutta l'enciclopedia dei saperi pedagogici, quanto il possesso di tecniche di indagine scientifica che possano aiutare i docenti a trovare una soluzione ai tanti problemi che emergono nei contesti formativi'* [1].

Già nel 1978 Visalberghi scriveva che le istituzioni di preparazione degli insegnanti dovrebbero operare come centri di ricerca scientifici ad alto livello [2]. Istanza recepita da un decreto presidenziale del 1999 secondo il quale *'Le istituzioni scolastiche, singolarmente o tra loro associate, esercitano l'autonomia di ricerca, sperimentazione e sviluppo, tenendo conto delle esigenze del contesto culturale, sociale ed economico delle realtà locali'* [3].

Questi centri avrebbero dovuto occuparsi della progettazione formativa e della ricerca valutativa, della formazione e aggiornamento culturale e professionale del personale, della innovazione metodologica e disciplinare delle pratiche didattiche, della ricerca didattica, della documentazione educativa, degli scambi di informazione e dell'integrazione tra le diverse articolazioni del sistema scolastico.

Un altro fronte sul quale è richiesto al docente un impegno notevole è quello dell'inclusione, sia dal punto di vista dell'inclusione scolastica, adottando strategie atte a rimuovere le barriere all'apprendimento e alla partecipazione, sia dal punto di vista dell'inclusione sociale, che vede l'insegnante come motore di relazione e mediazione. È l'UNESCO a riconoscere che 'gli insegnanti sono gli agenti strategici dei processi di inclusione scolastica e sociale' [4].

Entrambi questi aspetti rimandano alla qualità dell'ambiente di apprendimento. L'insegnante inclusivo, oltre a essere capace di riflettere sul proprio ruolo e sul proprio operato, deve valorizzare le diversità, sostenere lo studente, essere in grado di lavorare in gruppo, farsi promotore dello sviluppo e dell'aggiornamento continuo delle metodologie didattiche e disciplinari.

Non si può, a questo riguardo, sottovalutare il contributo delle neuroscienze cognitive alla innovazione delle metodologie didattiche in un approccio che metta lo studente al centro delle pratiche di apprendimento. È ormai ben riconosciuto che il processo di insegnamento-apprendimento coinvolge tutte assieme le dimensioni intellettiva, corporea, affettiva e relazionale della persona.

Il docente è, dunque, chiamato a conoscere e comprendere i meccanismi cognitivi che sovrintendono allo sviluppo delle abilità di apprendimento. La cognizione non è il risultato di un'azione deterministica, ma è un processo complesso che evolve grazie alle interazioni del sistema, attraverso le varie fasi della *comprensione/interpretazione/ragionamento/pianificazione/comunicazione (inter-soggettività)*.

La scuola è pertanto uno spazio-tempo, in cui l'interazione tra docente e studente modifica i reciproci saperi e la loro organizzazione e struttura interna, e richiede da parte di docenti e discenti attenzione, pianificazione, autocontrollo cognitivo e comportamentale, memoria di lavoro e motivazione.

“L'ideale punto di convergenza tra teoria e pratica diventa quindi un insegnante ricercatore capace di un atteggiamento riflessivo verso la propria pratica professionale, in grado di scegliere tra alternative formalmente equivalenti, di mettere in atto la sua scelta, di controllarne i risultati e di rivederne eventualmente il significato” [5].

Insegnare vuol dire spesso agire nell'urgenza, decidere nell'incertezza.

4. La formazione dei docenti universitari

Il decreto-legge del giugno 2022 presenta un ulteriore aspetto fortemente innovativo. Nel quadro dell'autonomia universitaria, dà la possibilità a ogni ateneo di strutturare dei centri di insegnamento di ateneo che, oltre a occu-

parsi della formazione iniziale dei docenti della scuola, si occupi anche della formazione dei docenti universitari.

Al momento la valutazione dei docenti universitari è centrata essenzialmente sulle competenze disciplinari in termini di attività di ricerca (pubblicazioni) e di gestione di progetti. In particolare, non c'è nessun parametro di valutazione della qualità della didattica, al di là delle schede di valutazione degli studenti, o della valutazione sulla sostenibilità dei corsi in numerosità della docenza. La valutazione dell'attività didattica è meramente quantitativa e tiene conto esclusivamente del numero di CFU impartiti, del numero di esami verbalizzati e del numero di tesisti seguiti come relatore.

Il confronto con la situazione di altri paesi europei è impietoso.

In Svezia la formazione iniziale dei docenti universitari alla didattica è obbligatoria, mentre in Olanda la formazione iniziale dei docenti universitari dura un anno, e prevede nel suo syllabus la capacità di elaborazione di programmi di studi, l'applicazione di metodologie didattiche innovative, l'uso delle piattaforme tecnologiche e l'approfondimento di pratiche di valutazione.

In Francia operano i CIES (*Centres d'Initiation à l'Enseignement Universitaire*), che prevedono per gli studenti di dottorato percorsi di formazione docente.

In Finlandia esiste un sistema di formazione articolato su tre livelli coordinati dal *Centre for Research and Development of Higher Education*: i) un corso introduttivo di 10-12 CFU; ii) un corso di formazione iniziale di 30 CFU; iii) un corso avanzato di 70 CFU biennale. I docenti in servizio, inoltre, sono incoraggiati a condurre ricerche sulla didattica universitaria.

In Gran Bretagna gli standard professionali della docenza universitaria sono fissati lungo la carriera accademica da *principal fellow* a professore associato. Esistono anche delle certificazioni post-graduate delle pratiche didattiche acquisite (PGCAP: Post-Graduate Certificate in Academic Practice).

Al di qua delle Alpi la formazione dei docenti universitari ha visto, fino a ora, solo tentativi sporadici, come il progetto PRODID (*Preparazione alla Professionalità Docente e Innovazione Didattica*) dell'Università di Padova [6], il progetto IRIDI (*Incubatore di Ricerca Didattica per l'Innovazione*) presso l'Università di Torino, il progetto MENTOR dell'Università di Palermo.

Occasione di discussione importante è stato il recente congresso 'Faculty development: la via italiana' tenutosi a Genova nel 2021 e di cui sono stati appena pubblicati gli atti congressuali [7].

Alla domanda se la conoscenza specialistica di una disciplina sia condizione necessaria e sufficiente per garantire una didattica di qualità, la risposta scontata è che è certo necessaria, ma sicuramente non sufficiente. Una didattica efficace deve promuovere apprendimenti in profondità e intendere l'apprendimento come costruzione attiva del sapere, incoraggiare pratiche di valutazione e di autovalutazione dei docenti e degli studenti e sviluppare competenze trasversali con particolare attenzione alle *soft skills*: la gestione del sé, la gestione del

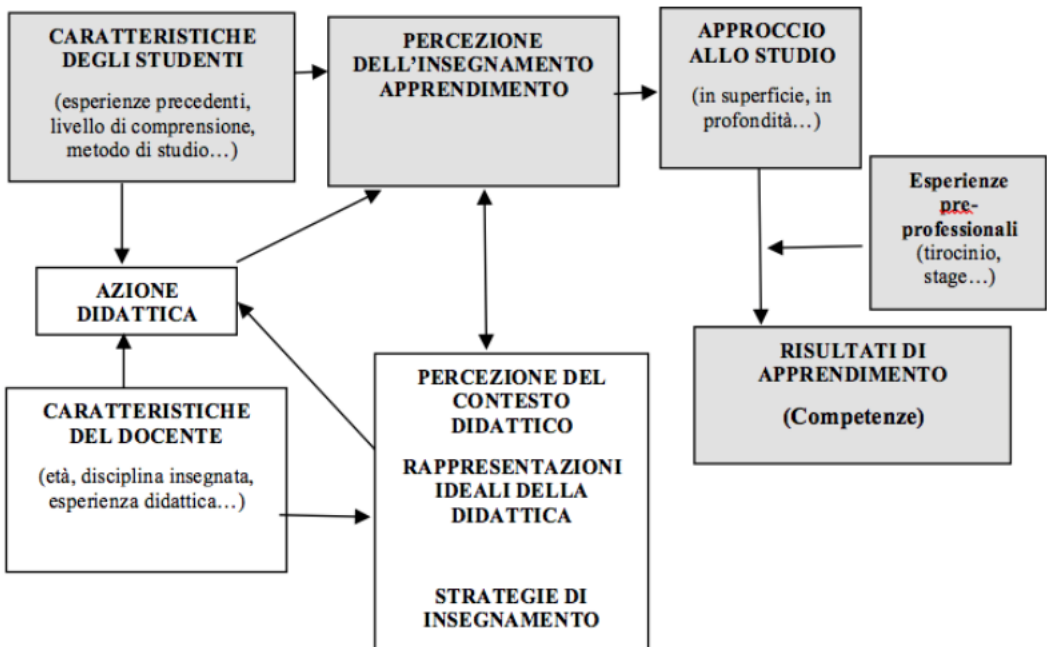
compito, l'interazione con gli altri, la gestione delle informazioni, la capacità di comunicazione.

È necessario per questo saper valutare l'efficacia dei percorsi di formazione e il loro impatto sui docenti (rappresentazione, strategie, percezione, motivazione, coinvolgimento), sull'apprendimento degli studenti e sull'istituzione.

Qualche passo nella giusta direzione è stato fatto. Il processo di Bologna individua 'l'università come insostituibile fattore di crescita sociale e umana e come elemento indispensabile per consolidare e arricchire la cittadinanza europea' (Dichiarazione di Bologna, 1999). L'articolazione dei percorsi formativi secondo i descrittori di Dublino, l'accreditamento dei corsi di laurea (ANVUR), la riflessione su queste tematiche condotta dall'Osservatorio Fondazione CRUI sono ulteriori esempi di una attenzione nuova verso la qualità e l'efficacia delle pratiche didattiche universitarie.

5. Conclusioni

Lo schema 1 rappresenta bene lo spazio-tempo a molte dimensioni in cui si collocano i processi di apprendimento, in relazione, quindi, non solo al rapporto docente-discente, ma anche rispetto al più generale contesto socio-istituzionale in cui le pratiche didattiche si inseriscono [8].



Schema 1. Struttura e dinamica dell'interazione docente-discente [8]

La domanda non vuole essere retorica: è davvero necessario elevare il livello della qualità della pratica didattica?

Cito solo questi dati relativi agli iscritti alle lauree triennali di classe Chimica della coorte 2018-2019. Su 3772 immatricolati, ne sono passati al II anno 2716 (72%). Di questi solo 960 (25%) si sono iscritti al II anno con almeno 40 CFU. I laureati in corso sono stati 1021 (1952 totali, 51,7%). Certamente le ragioni dell'abbandono universitario e della elevata durata media dei percorsi di laurea (4,6 anni per la laurea triennale) sono molteplici, ma l'obbligo di aumentare l'efficacia delle pratiche didattiche a tutti i livelli è fuori di dubbio.

Che fare? Se siamo convinti che il miglioramento di ogni didattica parta dalla formazione dei docenti a tutti i livelli della filiera educativa, dalla scuola primaria all'istruzione superiore, allora i tre aspetti che abbiamo brevemente discusso in questo contributo, e cioè la formazione iniziale e in servizio dei docenti della scuola e la formazione dei docenti universitari, devono intrecciarsi e costituire un percorso organizzato che segue la crescita della figura docente nelle diverse fasi. È stato detto che per formare un docente esperto siano necessari almeno dieci anni di attività didattica professionale.

I centri universitari per l'insegnamento possono essere il luogo fisico in cui queste diverse esperienze si incontrano e si mettono alla prova. L'obiettivo è quello di costruire comunità di pratica nelle quali l'innovazione delle metodologie didattiche e l'aggiornamento disciplinare si intrecciano e si completano.

Non mi nascondo le difficoltà, le resistenze e i ritardi che ostacolano questo percorso, che giudico l'unico praticabile negli anni a venire se si vogliono ottenere risultati non effimeri. La Divisione Didattica della Società Chimica Italiana può rivestire un ruolo importante in questi frangenti: ruolo di promozione, di riflessione, di messa a punto di esperienze guida e di studi di caso, di raccordo tra mondo della scuola e accademia. *Hic Rhodus, hic salta.*

Riferimenti

- [1] A. M. Ciraci, Ricerca educativa e formazione degli insegnanti. Il docente "ricercatore", in *Atteggimento scientifico e formazione dei docenti* (a cura di V. Blasi e G. Domenici), FrancoAngeli, Milano, 2019, pp. 199-202.
- [2] A. Visalberghi, *Pedagogia e scienze dell'educazione*, Arnoldo Mondadori Editore, Milano, 1978.
- [3] Decreto presidenziale n. 275, 8 marzo 1999.
- [4] UNESCO, *Policy Guidelines on Inclusion in Education*, 2009.
- [5] L. Chiappetta Cajola, A. M. Ciraci, Dal profilo professionale alle modalità formative efficaci. Nuove prospettive per la formazione degli insegnanti, in *La formazione degli insegnanti. Ricerca, didattica, competenze* (a cura di L. Chiappetta Cajola e A. M. Ciraci), Aracne Editrice, Roma, 2019, pp. 153-173.

- [6] E. Felisatti, A. Serbati, Professionalità docente e innovazione didattica. Una proposta dell'Università di Padova per lo sviluppo professionale dei docenti universitari, *Formazione & Insegnamento*, 2014, **12**, 137-153.
- [7] *Faculty development: la via italiana*, Proceedings, 28-29 Ottobre, 2021, Genova University Press, 2023.
- [8] M. Prosser, S. C. Barrie, Using a student-focused learning perspective to align academic development with institutional quality assurance, in *Towards Strategic Staff Development in Higher Education* (R. Blackwell & P. Blackmore, Eds.), 2003, pp. 191-221.

Processi cognitivi e apprendimento della chimica: uno studio pilota sulla popolazione universitaria a sviluppo tipico

**Francesca De Vita^a, Stefania Bufalino^b, Elena Ghibaudi^c, Renato Lombardo^d,
Antonella Maria Maggio^d, Anna Maria Re^e, Barbara Sini^e**

^aDipartimento di Chimica e Fisica, Università di Palermo; ^bDipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia, Politecnico di Torino; ^cDipartimento di Chimica, Università di Torino; ^dDipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche Chimiche e Farmaceutiche, Università di Palermo; ^eDipartimento di Psicologia, Università di Torino
e-mail: francesca.devita@unipa.it

Abstract. The national surveys have observed that Italian students perform significantly worst in the science field compared to their international peers. This is also true when we consider a particular subject, such as chemistry. This is partially explained by teaching practice since the Italian school context rarely allows the possibility to organise and implement interactive teaching strategies. Consequently, most of students learn chemistry by memorizing definitions without reaching a full understanding.

Moreover, professors do not have the opportunity to acquire knowledge about the cognitive processes involved in chemistry learning and the teaching strategies that might be used to overcome the conceptual difficulties of the discipline. In addition, they are not aware of the peculiar difficulties of students with Specific Learning Disorder (SLD) and the compensatory measures that could be carried out to improve their learning performance in the science field.

Therefore, the present project has the main goal of extending the knowledge on cognitive processes involved in chemistry learning of undergraduates' students, to design effective strategies and compensative measure that will improve students' chemistry learning ability. The present paper reports the results of a pilot investigation, which tested the adequacy of a chemistry learning test on a small sample of Italian undergraduate students.

Keywords: apprendimento della chimica; memoria di lavoro; università

1. Introduzione

Apprendere vuol dire integrare nuove informazioni con quelle pregresse (immagazzinate nella nostra mente nella memoria a lungo termine). Nelle discipline scientifiche ci sono ulteriori difficoltà:

- l'uso di molteplici canali di comunicazione sia uditivo-verbale (per esempio, una spiegazione) sia visivo-spaziale (per esempio, grafici, schematizzazioni o tabelle).

- l'aumentare del grado di scolarizzazione si associa ad un parallelo incremento del grado di astrazione.
- il muoversi con flessibilità tra il teorico-astratto e il reale-concreto.

La chimica nello specifico ha un'altra peculiarità: richiede di sapersi muovere tra tre livelli: macroscopico, sub-microscopico e simbolico [1]. Il suo apprendimento chiama in campo sia di processi cognitivi specifici (linguaggio, capacità di calcolo, procedure, conoscenze di natura teorica, etc.) sia processi di dominio-generale come la capacità di *problem-solving*,¹ l'attenzione, l'inibizione² e la memoria di lavoro [4-6]. Questi ultimi, anche nei gradi più alti di scolarizzazione, spiegano una quota minore, ma significativa, di varianza nella prestazione [7, 8]. Tra questi processi quello maggiormente indagato è la memoria di lavoro (ML):³ un sistema a capacità limitata che garantisce il mantenimento e la manipolazione di informazioni verbali e visuo-spaziali [9]. Quello spazio mentale in cui numeri, simboli e diagrammi vengono mantenuti, processati e manipolati nell'esecuzione di un problema [8]. Questo grazie a due sistemi di elaborazione dominio-specifico il *loop* fonologico (informazioni uditive-verbali) e il taccuino visuo-spaziale (informazioni visive e/o spaziali), che sono interconnessi attraverso il lavoro del *buffer* episodico e coordinati da una componente dominio-generale: l'esecutivo centrale, un sistema di controllo attento a capacità limitata che media il fluire delle informazioni [9].

Gli studi sulla chimica evidenziano il ruolo rilevante della ML visuo-spaziale [10] nel predire il livello di apprendimento di un argomento di chimica. Altri autori [11-14], invece, hanno indagato più in generale, il ruolo del ragionamento visuo-spaziale e della capacità di visualizzazione, cioè un complesso di processi di formulazione, codifica e manipolazione mentale di forme tridimensionali [15]. Per esempio, Pribyl e Bodner [12] osservano su un campione di universitari/e che coloro che hanno maggiori abilità di ragionamento visuo-spaziale tendono a fare meglio nella prova di chimica, avendo una comprensione organica del problema e utilizzando la rappresentazione grafica per risolvere il problema (individuare il prodotto di una reazione chimica). Risultati analoghi sono stati recentemente confermati dallo studio di Sorby et al. [13], su un campione di universitari/e di ingegneria chimica.

In conclusione, la disamina della letteratura mostra che gli studi che investigano il ruolo dei processi cognitivi in gioco nell'apprendimento della chimica sono pochi nel panorama internazionale e, addirittura, nulli nel panorama uni-

¹ Processo cognitivo che permette all'individuo di superare una difficoltà o di raggiungere un obiettivo grazie all'intervento di ulteriori processi cognitivi di ordine superiore come il ragionamento e il pensiero creativo [2].

² Processo cognitivo che garantisce alla persona la possibilità di ritardare e/o di sopprimere una risposta o un comportamento, in funzione di determinate richieste ambientali/contextuali [3].

³ All'interno della cornice teorica di riferimento della psicologia cognitiva.

versitario italiano. Pertanto, questo studio pilota rappresenta un primo tentativo di indagare i processi cognitivi che entrano in gioco nell'apprendimento della chimica nella popolazione universitaria. Attraverso un'analisi di correlazione, abbiamo esplorato la relazione tra le diverse componenti della ML e la prestazione di studenti/studentesse impegnati/e in una prova di chimica, costruita *ad hoc* per questa sperimentazione.

2. Metodo

2.1. Partecipanti

L'indagine ha coinvolto un campione composto da 39 universitari/e iscritti/e a un corso triennale di area scientifica presso il Politecnico di Torino o l'Università degli Studi di Palermo, che hanno partecipato alla prova di chimica. Di questi il 51.28% (21 persone) hanno aderito anche al momento di approfondimento sui processi cognitivi. Pertanto, il campione su cui è stata condotta l'analisi di correlazione è composto da 20 persone (15 maschi e 5 femmine) di età media 20,98 anni ($DS= 2.74$).

I partecipanti sono tutti/e iscritti/e a corsi di laurea scientifici, in cui la chimica è un insegnamento di servizio. Hanno aderito alla sperimentazione su base volontaria e senza ricevere alcun compenso.

2.2. Procedura

La sperimentazione era suddivisa in due momenti svolti in presenza e in modalità collettiva:

- un incontro (1 ora circa), in cui veniva somministrata una prova di apprendimento di chimica e un breve questionario per la raccolta delle informazioni anagrafiche (età, genere, corso di laurea frequentato);
- un incontro di valutazione dei processi cognitivi (2 ore circa) in cui sono state presentate prove di ML verbale e visuo-spaziale e un breve questionario per valutare gli stili cognitivi.

La video-lezione e il test per valutare il livello di apprendimento sono state costruite *ad hoc* per la sperimentazione, richiedendo un importante sforzo collettivo. L'obiettivo era quello di creare uno strumento ripetibile per le diverse somministrazioni e il più oggettivo possibile (per questo la scelta di registrarlo prima della somministrazione).

2.3. Strumenti

2.3.1. ML verbale

- a) Prova di span di parole [16], in cui il/la partecipante ascolta delle liste, a lunghezza crescente, di parole che deve ricordare nel corretto ordine di presentazione. La prova si articola in otto livelli a difficoltà crescente a partire dal livello 2 (due parole per ogni lista) fino al livello 9 (nove

parole per ogni lista); ogni livello prevedeva due trial. Per questa prova è stato attribuito un punteggio complessivo dato dalla somma delle parole correttamente riportate per ogni lista.

- b) Listening Span Task (LST) [17] che consiste nell'ascoltare blocchi con un numero di frasi crescente (da livello 2, due frasi a livello 6, sei frasi), giudicando di volta in volta la veridicità dei singoli enunciati e nel rievocare, al termine del blocco di frasi, l'ultima parola di ciascun enunciato nel corretto ordine di presentazione. Anche in questa prova è stato attribuito un punteggio in relazione al numero complessivo di parole correttamente ricordate.

Le due prove si differenziano in quanto la prima richiede solo il mantenimento dell'informazione, mentre la seconda richiede anche una manipolazione dell'informazione.

2.3.2. *ML visuo-spaziale*

- c) Prova Matrici [17] che consiste nell'osservare una matrice composta da celle bianche e grigie per un tempo limitato. Successivamente al/alla partecipante viene presentata la medesima matrice con il compito di indicare/rievocare le celle grigie osservate. All'aumentare del grado di difficoltà, aumenta il numero di celle grigie (da livello 2, due celle grigie, fino al livello 11, undici celle grigie) e ciascun livello prevede tre prove. Il punteggio complessivo è ottenuto sommando il numero del livello delle tre matrici con maggiore complessità completati correttamente.
- d) Prova Puzzle [17] che si articola in nove livelli, ciascuno composto da tre prove. Il/la partecipante osserva per un paio di secondi un oggetto e successivamente lo vede scomposto in più pezzi numerati (il numero dipende dal livello di difficoltà). Il compito è ricomporre la figura all'interno di una matrice, riportando il numero corrispondente nella casella corretta. Il punteggio è dato dalla somma dei tre tentativi, con il maggiore livello di difficoltà, correttamente svolti.

Le due prove differiscono in quanto la prima richiede esclusivamente il mantenimento dell'informazione, mentre la seconda richiede una manipolazione.

2.3.3. *Questionario sugli stili cognitivi*

Si tratta di un questionario auto-somministrato composto da nove affermazioni [18]. Il/la partecipante esprime il grado di accordo o la frequenza di un comportamento su una scala Likert (da 1 "per niente/mai" a 5 "moltissimo/sempré"). Il punteggio complessivo del questionario si ottiene facendo la media aritmetica dei singoli quesiti. Il numero ottenuto viene poi standardizzato in punteggio z ($M = 0$, $DS = 1$), consultando media e deviazione standard riportate nel manuale. La conversione in punteggi z serve per l'individuazione dello

stile cognitivo prevalente, infatti: $z < -0,50$ è tendenzialmente visuo-spaziale, mentre $z > +0.50$ è tendenzialmente verbale.

2.3.4. Prova di chimica

Questa prova è stata costruita *ad hoc* per la presente sperimentazione, seguendo la struttura che viene utilizzata nella Prova di Apprendimento [18] per la valutazione della popolazione universitaria. Abbiamo scelto di utilizzare una video-lezione perché più simile a quello che gli/le studenti/studentesse esperiscono nel contesto universitario nell'apprendimento di questa disciplina. Si è scelto il tema dei cristalli liquidi, perché si presta a una rapida esposizione e non richiede un bagaglio di conoscenze concettuali altamente specifico. Inoltre, è un argomento che non rientra nei programmi dei corsi di chimica generale che gli/le partecipanti si sono trovati ad affrontare durante il loro percorso di studi: ciò consente di evitare che una precedente spiegazione possa influire sull'esito della prova. Ciascuno assiste alla video-lezione, avendo a disposizione le *slide* e potendo prendere appunti. Appunti e *slide* restano a disposizione nella fase di studio individuale (10 minuti), ma non durante il quiz finale. Il test si compone di 10 domande a risposta multipla: 5 verbali (con domande e alternative di risposta fornite in forma verbale) e 5 visive (con domande poste in modalità verbale e alternative di risposta poste in modalità visiva).

3. Analisi dei dati

In primo luogo, è stata condotta un'analisi qualitativa sulla prova di apprendimento di chimica, per valutare il grado di correttezza di ciascuna risposta e il corretto bilanciamento delle risposte rispetto al grado di difficoltà. Successivamente è stata condotta un'analisi di correlazione tra le prove standardizzate e l'esito nella prova di apprendimento di chimica.

4. Risultati

4.1. Analisi qualitativa della prova di apprendimento di chimica

Sono state calcolate le statistiche descrittive della prestazione complessiva alla prova e della prestazione nelle domande verbali e quelle visuo-spaziali (Tabella 1). In seguito, è stata fatta un'analisi qualitativa delle risposte date alle singole domande: le domande sono ben bilanciate per grado di complessità e per nessuna domanda si osservano effetto pavimento (= nessuno è in grado di dare la risposta corretta) o effetto tetto (= tutti rispondono correttamente). Infatti, mediamente le domande hanno una percentuale di correttezza del 50% circa (Tabella 1). Alcune domande presentano un minor grado di difficoltà e ottengono una percentuale di risposte corrette superiore alla media (quesiti 2 e 4 verbali e questo 3 visuo-spaziale). Analogamente alcune domande sono caratterizzate da un livello di complessità superiore alla media (quesito 5 verbale, e quesiti 1 e la 4 visuo-spaziali).

Tabella 1. Descrittive delle risposte corrette alla prova di chimica

	Risposte corrette	
	<i>M</i>	<i>DS</i>
Punteggio totale	5,41	2,11
Domande Verbali	3,15	1,20
Domande visive	2,26	1,29

4.2. Analisi di correlazione tra la prova di apprendimento di chimica e i test standardizzati

L'analisi di correlazione tra la prova di apprendimento e i test standardizzati è stata condotta solo sul campione di 20 studenti/studentesse e viene riportata in Tabella 2.

Tabella 2. Correlazioni tra i test standardizzati e la prova di apprendimento di chimica (N= 20)

	1	2	3	4	5	6	7
1. Span di parole (parole rievocate)	1						
2. LST (parole rievocate)	0,33	1					
3. Matrici	0,53*	0,23	1				
4. Puzzle	0,00	0,10	-0,31	1			
5. Prova di chimica Totale	0,43	0,46*	0,23	0,46*	1		
6. Prova di chimica Dom. Verbali	0,59*	0,30	0,16	0,45	0,81**	1	
7. Prova di chimica Dom. Visive	0,10	0,37	0,31	0,21	0,76**	0,30	1

Nota: * $p < 0,05$; ** $p < 0,001$

Infine, la prestazione nella prova di chimica è stata messa in correlazione con il punteggio ottenuto nel questionario sulla valutazione degli stili cognitivi. Le correlazioni riscontrate risultano buone, seppur non statisticamente significative in quanto il campione considerato è molto piccolo e la significatività è legata alla numerosità campionaria. Tuttavia, il valore della correlazione che è

stato osservato è rilevante: in particolare, la prestazione nelle domande verbali correla positivamente ($r = 0,32$) con il punteggio al questionario, mentre quella nelle domande visuo-spaziali correla negativamente ($r = -0,37$).

5. Discussione

Questa prima indagine pilota ha permesso di testare l'adeguatezza di una prova costruita *ad hoc* per valutare l'apprendimento di un argomento di chimica da parte di un campione di universitari/e e di esplorare – sia pure su un piccolo campione – la relazione tra la prestazione in tale prova e quella in alcuni test standardizzati per la valutazione della ML.

La prova risulta adeguatamente strutturata in quanto non si rilevano effetto tetto né pavimento. Le domande che hanno fatto registrare un più alto numero di risposte corrette comportano la mera rievocazione dell'informazione o sono connesse al bagaglio di conoscenze della geometria vettoriale (concetto di direttore e normale del piano). Invece, i quesiti sbagliati con maggiore frequenza presuppongono una comprensione profonda della spiegazione, che garantisce non solo il recupero delle nozioni, ma anche la loro manipolazione. Tale dato è coerente con l'osservazione che i compiti che richiedono mantenimento e manipolazione dell'informazione sono cognitivamente più complessi [19]. In altri termini, questa operazione comporta un carico maggiore sulle risorse della ML specialmente quelle dell'esecutivo centrale.⁴ Questi risultati sono confermati anche dalle analisi di correlazione che evidenziano come la prestazione complessiva della prova correla positivamente e significativamente con le prove LST e Puzzle (entrambe prove che hanno un carico maggiore sull'esecutivo centrale). Inoltre, tali risultati confermano quanto precedentemente osservato negli studi che hanno coinvolto gli adolescenti [10] e aiutano a comprendere meglio il ruolo giocato della ML nell'apprendimento della chimica nella popolazione universitaria. Infine, l'analisi di correlazione tra la tipologia di domanda nella prova di chimica e il punteggio nel questionario di valutazione dello stile cognitivo, sembra suggerire che coloro che hanno uno stile tendenzialmente verbale ottengono migliori risultati nelle domande verbali, mentre quelli che hanno uno stile tendenzialmente visuo-spaziale tendono a prestare meglio nelle domande visuo-spaziali. Questi primi risultati, sebbene non generalizzabili, sono rilevanti in quanto rappresentano un primo tentativo di colmare una lacuna di ricerca e confermano la necessità di proseguire questa indagine. Il limite rappresentato dalla scarsa numerosità del campione è parzialmente attribuibile al fatto che la raccolta dati è avvenuta interamente in presenza, al di fuori dell'orario scolastico e su base volontaria.

In conclusione, questo lavoro è un tentativo di aprire un varco verso l'approfondimento degli specifici processi cognitivi che entrano in gioco nell'appren-

⁴ Componente di tipo dominio-generale della memoria di lavoro, ovvero un sistema di controllo attentivo (a capacità limitata) che media il flusso di informazioni verbali e visuo-spaziali [9].

dimento della chimica. L'obiettivo a lungo termine è la sperimentazione di strategie didattiche e l'individuazione di strumenti compensativi che appellandosi a questi processi cognitivi possano facilitare l'apprendimento della chimica.

Riferimenti

- [1] A. H. Johnstone, Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem, *J. Comput. Assist. Learn.*, 1991, **7**(2), 75–83 (<https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x>).
- [2] American Psychological Association: Problem-Solving, *APA Dictionary of Psychology*.
- [3] American Psychological Association: Inhibition, *APA Dictionary of Psychology*.
- [4] R. Bull, G. Scerif, Executive functioning as a predictor of children's mathematics ability: inhibition, switching, and working memory, *Dev. Neuropsychol.*, 2001, **19**(3), 273–293 (https://doi.org/10.1207/S15326942DN1903_3).
- [5] R. D. Latzman, N. Elkovitch, J. Young, L. A. Clark, The contribution of executive functioning to academic achievement among male adolescents, *J. Clin. Exp. Neuropsychol.*, 2010, **32**(5), 455–462 (<https://doi.org/10.1080/13803390903164363>).
- [6] H. L. St Clair-Thompson, S. E. Gathercole, Executive functions and achievements in school: shifting, updating, inhibition, and working memory, *Q. J. Exp. Psychol.*, 2006, **59**(4), 745–759 (<https://doi.org/10.1080/17470210500162854>).
- [7] M. Berkowitz, E. Stern, Which cognitive abilities make the difference? Predicting academic achievements in advanced STEM studies, *J. Intell.*, 2018, **6**(4), 48 (<https://doi.org/10.3390/jintelligence6040048>).
- [8] D. H. Uttal, C. A. Cohen, Chapter Four - Spatial thinking and STEM education: when, why, and how?, in *The Psychology of Learning and Motivation* (B. H. Ross, Ed.), Academic Press, 2012; Vol. 57, pp 147–181 (<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394293-7.00004-2>).
- [9] A. D. Baddeley, The episodic buffer: a new component of working memory?, *Trends Cogn. Sci.*, 2000, **4**(11), 417–423 ([https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01538-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01538-2)).
- [10] S. M. Rhodes, J. N. Booth, L. E. Palmer, R. A. Blythe, M. Delibegovic, N. J. Wheate, Executive functions predict conceptual learning of science, *Br. J. Dev. Psychol.*, 2016, **34**(2), 261–275 (<https://doi.org/10.1111/bjdp.12129>).
- [11] C. S. Carter, M. A. Larussa, G. M. Bodner, A study of two measures of spatial ability as predictors of success in different levels of General Chemistry, *J. Res. Sci. Teach.*, 1987, **24**(7), 645–657 (<https://doi.org/10.1002/tea.3660240705>).
- [12] J. R. Pribyl, G. M. Bodner, Spatial ability and its role in Organic Chemistry:

- a study of four organic courses, *J. Res. Sci. Teach.*, 1987, **24**(3), 229–240 (<https://doi.org/10.1002/tea.3660240304>).
- [13] S. A. Sorby, G. Duffy, N. Loney, An examination of the role of spatial ability in the process of problem solving in Chemical Engineering, *Australas. J. Eng. Educ.*, 2020, **25**(1), 55–65 (<https://doi.org/10.1080/22054952.2020.1785653>).
- [14] H.-K. Wu, P. Shah, Exploring visuospatial thinking in chemistry learning, *Sci. Educ.*, 2004, **88**(3), 465–492 (<https://doi.org/10.1002/sce.10126>).
- [15] J. B. Carroll, *Human cognitive abilities: a survey of factor-analytic studies*, Cambridge University Press, 1993 (<https://doi.org/10.1017/CBO9780511571312>).
- [16] H. Spinnler, G. Tognoni, Standardizzazione e taratura italiana dei test neuropsicologici, *Italy J. Neurol. Sci.*, 1987, **6**, 1–120.
- [17] R. De Beni, E. Borella, B. Carretti, C. Marigo, L. A. Nava, *BAC. Portfolio per la valutazione del benessere e delle abilità cognitive nell'età adulta e avanzata*, Giunti OS, 2008.
- [18] R. De Beni, C. Zamperlin, C. Meneghetti, C. Cornoldi, M. Fabris, G. D. M. Tona, A. Moè, *Test AMOS-abilità e motivazione allo studio: prove di valutazione e orientamento per la scuola secondaria di secondo grado e l'università: Nuova Edizione*, Edizioni Centro Studi Erickson, 2014.
- [19] E. A. Crone, C. Wendelken, S. Donohue, L. van Leijenhorst, S. A. Bunge, Neurocognitive development of the ability to manipulate information in working memory, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2006, **103**(24), 9315–9320 (<https://doi.org/10.1073/pnas.0510088103>).

Insegnare chimica fisica con *dashboard* sviluppate in Python

Renato Lombardo

*Dipartimento di Scienze e Tecnologie Biologiche, Chimiche e Farmaceutiche,
Università di Palermo*

e-mail: renato.lombardo@unipa.it

Abstract. Mathematical models and graphs are essential in chemistry and other scientific disciplines, but their complexity can hinder student understanding. Interactive applications, such as dashboards, can simplify complex data and enhance comprehension. Python and Plotly Dash are effective tools for creating custom dashboards tailored to specific teaching needs. These dashboards proved useful for students with limited mathematical background, and they can also support active learning strategies and develop cross-cutting skills like programming. However, their effectiveness depends on integration into the teaching process and teacher guidance.

Keywords: Chimica fisica; didattica digitale; modelli; matematica; grafici; applicazioni interattive

1. Introduzione

I modelli matematici svolgono un ruolo cruciale nelle discipline STEM (scienza, tecnologia, ingegneria e matematica) permettendo di descrivere e prevedere il comportamento di un sistema in modo quantitativo e preciso. Di conseguenza, essi sono presenti in ogni ramo della chimica e sono di fondamentale importanza nella chimica fisica. L'uso di modelli matematici è strettamente interconnesso con le loro controparti grafiche, tipicamente sotto forma di grafici. Essi forniscono una rappresentazione visiva delle relazioni tra diverse variabili e quantità fisiche, rendendo più facile comprendere i principi generali e i modelli sottostanti.

Sebbene indubbiamente i modelli matematici e le loro rappresentazioni grafiche possano essere di grande aiuto nell'apprendimento della chimica, molti studenti faticano a impiegarli in modo efficace [1]. Spesso, la mancanza di un adeguato background matematico è uno dei motivi principali [2]. Di conseguenza, alcuni studenti affrontano lo studio di questi modelli con un approccio mnemonico, piuttosto che cercare di capire i fenomeni che essi descrivono.

2. Applicazioni Interattive

Tipicamente, i libri di testo utilizzano grafici statici per presentare le informazioni, spesso facendo affidamento su esempi specifici con parametri ottimali. Ciò può rendere difficile per gli studenti comprendere appieno il materiale e valutare come i cambiamenti in diversi parametri influenzino il comportamento del modello. Potrebbe essere possibile superare alcuni di questi limiti e allo stesso tempo promuovere l'apprendimento attivo, utilizzando applicazioni interattive che possono essere uno strumento efficace per lo sviluppo delle corrette competenze e che possono essere utilizzate per una varietà di attività didattiche. Infatti, si è osservato che, in alcuni casi, le simulazioni al computer e metodi di insegnamento visivo sono più efficaci dei metodi di insegnamento tradizionali nel trasmettere la conoscenza in modo diretto, concreto e conveniente [3, 4].

Negli ultimi decenni, si è registrato un significativo sviluppo nell'uso di applicazioni web interattive per l'insegnamento delle STEM. Con l'avvento di Internet e la diffusione di computer e dispositivi mobili, educatori e sviluppatori hanno trovato modi innovativi per creare esperienze di apprendimento interattive per gli studenti e, infatti, su Internet esistono molte piattaforme che forniscono contenuti interattivi per la didattica nelle discipline STEM come PhET Interactive Simulations [5], Khan Academy [6] e molte altre.

3. Motivazioni e scopo

Sebbene esista una vasta gamma di applicazioni interattive, in alcuni casi potrebbe essere preferibile sviluppare un'applicazione personalizzata che sia più adatta a un uso specifico.

Spesso è difficile trovare applicazioni esistenti che si adattino adeguatamente al proprio programma e stile di insegnamento. Inoltre, l'utilizzo di app provenienti da fonti diverse può essere scomodo e può introdurre incongruenze nell'interfaccia, nella notazione e nell'esperienza utente complessiva.

Al contrario, le applicazioni personalizzate consentono agli insegnanti di garantire che i contenuti siano adattati al loro specifico programma, permettendo così un'esperienza di apprendimento più coerente e completa. Inoltre, sviluppando applicazioni personalizzate è possibile mantenere un'interfaccia utente, un design e una notazione coerenti per tutti i materiali didattici.

Idealmente, lo sviluppo e la manutenzione di tali applicazioni dovrebbero essere il più semplici e diretti possibile. L'obiettivo è fornire agli educatori strumenti e *framework* intuitivi che richiedono una conoscenza di programmazione minima, consentendo loro di creare applicazioni personalizzate, pur non possedendo eccessive competenze tecniche. Semplificando il processo di sviluppo, gli insegnanti possono concentrarsi maggiormente sul design didattico e sulla creazione di contenuti, assicurando che l'applicazione sia in linea con il loro approccio pedagogico.

In aggiunta, l'impiego da parte degli utenti finali (gli studenti) non dovrebbe esse-

re troppo complesso e dovrebbe essere facilmente adattabile a diversi dispositivi, come computer, tablet e smartphone, e in modo indipendente dal sistema operativo sottostante. Ciò garantisce accessibilità e pari opportunità a tutti gli studenti.

4. Dashboard web

Lo sviluppo di applicazioni personalizzate potrebbe passare dall'impiego di *dashboard* interattive.

Le *dashboard* sono applicazioni che presentano più visualizzazioni e controlli in una singola pagina web, consentendo la visualizzazione di dati e modelli anche complessi in modo semplice e comprensibile. I dati possono essere presentati in una gamma di formati, inclusi grafici, tabelle e diagrammi collegati tra loro, per creare un'esperienza coerente e interattiva rendendo più facile per gli studenti comprenderli e analizzarli.

In molti casi, le *dashboard* sono preferibili a un programma che risiede su un computer specifico, dato che sono accessibili da qualsiasi dispositivo con una connessione a Internet, e generalmente sono progettate per funzionare su più piattaforme, inclusi desktop, laptop, tablet e smartphone, adattando il loro aspetto a diversi dispositivi e dimensioni dello schermo.

Infine, gli aggiornamenti e i miglioramenti possono essere eseguiti facilmente e rapidamente dallo sviluppatore. Gli studenti avranno sempre accesso alla versione più aggiornata della *dashboard* senza dover scaricare e installare nulla sui propri computer.

5. Python e Plotly Dash

A seconda dell'applicazione e del livello di complessità desiderato, lo sviluppo e l'implementazione di un'applicazione interattiva può essere un compito impegnativo che potrebbe richiedere competenze di programmazione non banali. In linea di principio, esistono molti linguaggi di programmazione, framework di sviluppo e strumenti adeguati allo scopo. Non tutti, però, sono adatti per via della complessità di impiego (ad es., C, Fortran) o delle limitazioni in ambito scientifico (ad es., PHP, Javascript). Un possibile modo per superare i limiti sopra menzionati è utilizzare il linguaggio di programmazione Python [7].

Python è un linguaggio di programmazione ad alto livello, noto per la sua sintassi semplice e leggibile e la vasta gamma di librerie e *framework* disponibili. Essendo *software libero* il suo impiego è del tutto gratuito, come pure quello della maggior parte delle librerie disponibili.

Python offre funzionalità avanzate per l'elaborazione numerica e scientifica, l'analisi dei dati, la visualizzazione e la creazione di applicazioni interattive. Inoltre, esso si appoggia a un'ampia e attiva comunità di sviluppatori che fornisce supporto, documentazione, tutorial e risorse di apprendimento. Ciò rende questo linguaggio un'ottima scelta per gli educatori e gli sviluppatori che cercano di creare applicazioni interattive per l'insegnamento e l'appren-

dimento delle STEM. Infatti, Python è spesso il linguaggio di scelta per i corsi introduttivi di programmazione a scuola [8, 9] o nell'istruzione superiore [10], specialmente per gli studenti in discipline STEM come la chimica [11].

Plotly Dash [12] è un *framework* Python, basato sul web, per creare *dashboard*; sfrutta la popolare libreria Plotly [13], utilizzata per ottenere visualizzazioni interattive di dati, e il *framework* di sviluppo web Flask [14]. Questo *framework* fornisce una varietà di opzioni di personalizzazione nella visualizzazione. Sebbene sia possibile (e abbastanza facile) distribuire un'applicazione Plotly Dash su un server privato (come un computer personale, un server scolastico o universitario), esistono numerosi servizi pubblici di hosting che eliminano la necessità di mantenere il proprio server. Alcuni di questi servizi offrono un livello gratuito per un periodo limitato o una larghezza di banda adatta alla maggior parte delle esigenze.

6. Implementazione

Per testare la fattibilità di questo approccio, sono state sviluppate alcune *dashboard* nell'ambito di un insegnamento introduttivo di Chimica Fisica per studenti del primo anno di Scienze Biologiche dell'Università di Palermo. Sebbene ci sia un corso introduttivo di matematica al primo semestre, gli studenti spesso mancano di competenze sufficienti in questo campo e, di conseguenza, trovano la chimica fisica una materia molto impegnativa.

L'obiettivo era quello di utilizzare *dashboard* interattive per consentire agli studenti di sperimentare alcuni dei modelli che trovavano più complessi, rispetto alla rappresentazione matematica, e per i quali tendono ad affidarsi più alla memoria che al ragionamento. Questo è il caso della distribuzione di Maxwell-Boltzmann.

La distribuzione di Maxwell-Boltzmann, $F(v)$, è una distribuzione di densità di probabilità che descrive la distribuzione delle velocità delle particelle, v , in un gas perfetto di molecole di massa m alla temperatura, T . Può essere scritta come:

$$F(v) = \sqrt{\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^3} 4\pi v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad (1)$$

dove k è la *costante di Boltzmann*. La distribuzione è solitamente rappresentata come un grafico di $F(v)$ contro v .

Essendo $F(v)$ la densità di probabilità, la probabilità di trovare una molecola con una velocità compresa tra v e $v + dv$ corrisponde all'integrale:

$$P = \int_v^{v+dv} F(v) dv = \int_v^{v+dv} \sqrt{\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^3} 4\pi v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv \quad (2)$$

che può essere rappresentato come l'area sotto la curva nel grafico. A ogni distribuzione corrispondono delle velocità caratteristiche: la velocità più probabile, v_p , la velocità media, v_{avg} , e la radice della velocità quadratica media, v_{rms} .

Gli studenti spesso trovano difficile concettualizzare come la curva di distribuzione cambia al cambiare dei suoi parametri, m e T , e visualizzare il risultato dell'integrale nell'equazione (2). Pertanto, è stata sviluppata una *dashboard* con le capacità di:

- modificare istantaneamente il grafico risultante dall'equazione (1), al cambiare dei valori dei parametri;
- calcolare l'integrale corrispondente dell'equazione (2) in un intervallo specifico di velocità e mostrarlo sul grafico come una area ombreggiata sotto la curva;
- calcolare le velocità caratteristiche corrispondenti e mostrarle sul grafico;
- tracciare più distribuzioni sullo stesso grafico, per confrontare le curve, le aree integrali e le velocità caratteristiche;
- modificare la visualizzazione (zoom, pan, ecc.) e permettere di scaricare il grafico come file di immagine per un uso futuro.

L'implementazione del modello è piuttosto semplice in quanto consiste semplicemente in quattro funzioni: "MB", che viene utilizzata per calcolare l'equazione (1) in un intervallo v specificato, a una temperatura T specificata, per una massa molecolare specificata M , e "v_p", "v_avg" e "v_rms" che sono le funzioni utilizzate per calcolare le velocità caratteristiche a specifici valori di M e T . Il codice per il funzionamento della *dashboard* è un po' più complesso, ma in grande parte può essere riutilizzato, in caso se ne vogliono costruire altre.

La figura 1 mostra l'aspetto tipico della *dashboard* su un monitor come quello di un personal computer o di un tablet. Nella parte superiore della pagina è presente un'intestazione contenente il titolo e il sottotitolo. Selezionando il pulsante "più informazioni", viene visualizzata una breve descrizione del modello, inclusa la sua equazione principale.

Distribuzione di Maxwell-Boltzmann

esplora come ogni curva cambia al variare dei parametri

più informazioni

aggiungi grafico

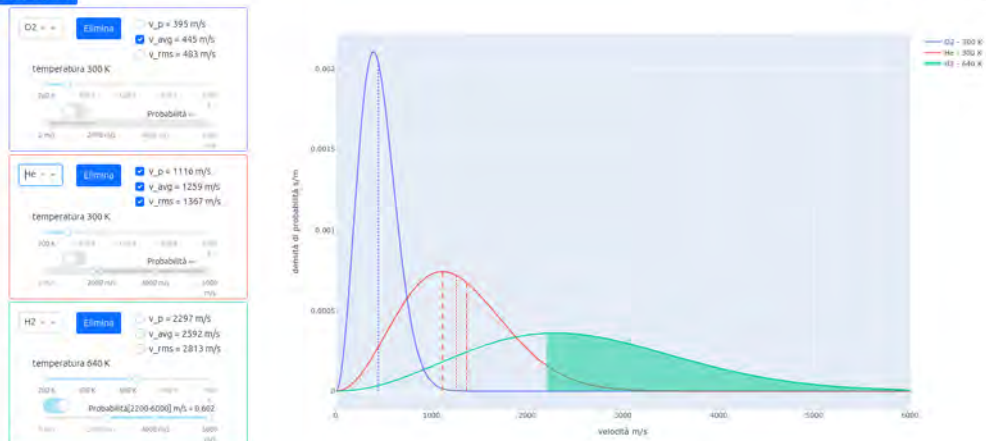


Figura 1. La dashboard sulla distribuzione di Maxwell-Boltzmann; vengono mostrate tre curve con differenti parametri e diverse impostazioni di visualizzazione

Plotly Dash supporta la sintassi LaTeX per mostrare formule matematiche. In linea di principio, questa area potrebbe anche presentare altre risorse come immagini, collegamenti esterni, ecc.

La parte inferiore della finestra è divisa in due aree: a sinistra si trovano i controlli, mentre a destra c'è il grafico. Ogni volta che si fa clic sul pulsante "Aggiungi grafico", viene aggiunto un nuovo insieme di controlli a sinistra e un nuovo grafico sull'area a destra. Il grafico viene immediatamente aggiornato ogni volta che uno o più parametri vengono modificati, o se viene eliminato un grafico, facendo clic sul pulsante "Elimina". I valori delle velocità caratteristiche per ogni grafico vengono aggiornati dinamicamente e, se si vuole, sono tracciati come linee tratteggiate sul grafico, come nel caso di He nella figura 1. È possibile calcolare la probabilità per un intervallo di velocità specifico e mostrare il suo valore mentre l'area corrispondente viene riportata sotto il relativo grafico.

Questo è il caso, nella figura 1, per la probabilità di trovare un atomo di He con velocità superiore a 2000 m s^{-1} .

7. Impiego in classe

La *dashboard* è fornita agli studenti dopo la lezione che spiegava l'argomento, per consentire loro di esplorare il modello e creare nuove visualizzazioni, aiutandoli a sviluppare capacità di pensiero critico e a ottenere una comprensione più profonda di quanto discusso in classe.

Dopo che a lezione il modello è stato descritto sia da un punto di vista fisico che matematico, gli studenti trovavano sulla piattaforma Moodle le relative note della lezione e un link alla *dashboard*.

Sono stati anche assegnati alcuni semplici quesiti che potevano essere risolti con l'aiuto della *dashboard*:

- Qual è il rapporto tra la velocità media per H_2 e O_2 a 300 K?
- A quale temperatura metà delle molecole in un campione di He ha una velocità inferiore a 2000 m s^{-1} ?
- A quale temperatura la distribuzione di Maxwell-Boltzmann per un campione di Cl_2 ha la stessa forma di quella di un campione di O_2 a 300 K?

Tali domande sono state progettate per incoraggiare gli studenti a usare la *dashboard*, modificare alcuni parametri ed esplorare come il risultato cambia (qual è la dipendenza dalla temperatura delle velocità caratteristiche?) e per stimolare la loro riflessione sul modello fisico (come si differenzia un campione di Cl_2 da uno di O_2 ?).

La maggior parte degli studenti ha usato la *dashboard* durante lo studio individuale a casa per cercare di rispondere ai quesiti proposti. Le domande e le risposte sono state poi impiegate come punti di partenza per un *brainstorming* in classe, guidato dal docente.

Gli studenti non hanno avuto problemi a rispondere ai quesiti dal punto di vista numerico. Era, però, importante impiegare questi risultati per stimolare le loro osservazioni e la discussione sul significato fisico del modello. Così, rispetto al primo quesito, si è potuto osservare che a 300 K la velocità media in un campione di He è quattro volte quella di un campione di O_2 , nonostante il rapporto fra le loro masse sia 1/16, e che tale rapporto è indipendente dalla temperatura considerata. Questo è verificabile anche per le altre velocità caratteristiche e ha permesso di rivedere le loro relative espressioni notando come tutte dipendano dall'inverso della radice quadrata della massa e che il resto dell'espressione è una costante (a T costante). Il secondo quesito è stata una occasione per riflettere sul significato dell'integrale come area sottesa alla curva e di discutere come essa si modifichi al variare della temperatura. Questo ha portato a proporre come ulteriore attività quella di riportare in grafico la probabilità $P(v < 2000 \text{ ms}^{-1})$ contro T . Si è osservato così che l'effetto diventa sempre meno importante all'aumentare della temperatura, per via dello schiacciamento del picco e dello spostamento del massimo. Infine, l'ultimo quesito ha fornito la possibilità di riflettere sulla relazione fra velocità ed energia cinetica media (e quindi temperatura) in un campione. Inoltre, a parità di temperatura, un campione di Cl_2 ha una distribuzione più "stretta" di un campione di O_2 e, quindi, la probabilità si concentra in un intervallo più ristretto di velocità. La conclusione è stata pertanto che è più difficile trovare molecole con velocità molto diverse fra loro: da questo punto di vista Cl_2 è un campione più omogeneo di O_2 .

Al di là delle specifiche osservazioni, tale attività è risultata molto utile per

aiutare gli studenti a riconoscere la connessione fra la descrizione matematica e il modello fisico. Tuttavia, essa ha richiesto un tempo non indifferente, sia come impegno singolo degli studenti a casa che come impegno in classe.

8. Conclusioni e futuri sviluppi

Plotly Dash si è rivelato uno strumento comodo ed efficace per creare *dashboard* su misura per specifici ambienti di insegnamento e apprendimento. Sono state sviluppate alcune altre *dashboard* che descrivono altri modelli, quali il legame chimico, la miscibilità delle sostanze o l'entropia statistica secondo il modello di Ehrenfest. Altre sono in corso di sviluppo o modifica.

Da un breve questionario e alcuni colloqui informali, si evince che la maggior parte degli studenti ha trovato la *dashboard* abbastanza facile da usare e utile per lo studio. Essi ritengono che questi strumenti potrebbero essere anche uno strumento utile da impiegare in modo sincrono in classe, durante l'illustrazione del modello per la prima volta. Tuttavia, la maggior parte degli studenti non crede che sarebbe utile impiegarli senza aver prima ricevuto una descrizione del modello dall'insegnante. Ciò suggerisce che l'efficacia delle *dashboard* come strumento di apprendimento può dipendere dal modo in cui vengono integrate nel processo di insegnamento e dal livello di guida fornito dall'insegnante.

Nel presente caso, ci si è limitati all'impiego asincrono da parte degli studenti. Tuttavia, le *dashboard* si prestano facilmente ad altri approcci, come il supporto alla spiegazione in classe o strategie di apprendimento attivo più complesse, come flipped classroom, problem-based learning (PBL) o team-based learning (TBL), ecc., e possono anche essere utilizzate per sviluppare competenze trasversali a cominciare dall'ambito della programmazione e la matematica.

Riferimenti

- [1] S. Van den Eynde, M. Goedhart, J. Deprez, M. De Cock, Role of graphs in blending physical and mathematical meaning of partial derivatives in the context of the heat equation, *Int. J. of Sci. and Math. Educ.*, 2023, **21**, 25-47 (<https://doi.org/10.1007/s10763-021-10237-3>).
- [2] C. Rasmussen, K. Marrongelle, M. C. Borba, Research on calculus: What do we know and where do we need to go? *ZDM Mathematics Education*, 2014, **46**(4), 507-515 (<https://doi.org/10.1007/s11858-014-0615-x>).
- [3] L. Liu, Y. Ling, J. Yu, Q. Fu, Developing and evaluating an inquiry-based online course with a simulation program of complexometric titration, *J. Chem. Educ.*, 2021, **98**(5), 1636-1644 (<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c01229>).
- [4] M. Ben Ouahi, M. Ait Hou, A. Bliya, T. Hassouni, E. M. Al Ibrahmi, The effect of using computer simulation on students' performance in teaching and learning physics: Are there any gender and area gaps? *Edu-*

- cation Research International*, 2021, **2021**, ID 6646017 (<https://doi.org/10.1155/2021/6646017>).
- [5] University of Colorado Boulder, *PhET: Free online physics, chemistry, biology, earth science and math simulations*, PhET Interactive Simulations (<https://phet.colorado.edu/>).
 - [6] Khan Academy, *Khan Academy - Free online courses, lessons & practice* (<https://www.khanacademy.org/>).
 - [7] L. Vaughan, *Python tools for scientists: An introduction to using Anaconda, JupyterLab, and Python's Scientific Libraries*, No Starch Press, San Francisco, 2023.
 - [8] L. Grandell, M. Peltomäki, R.-J. Back, T. Salakoski, Why complicate things? Introducing programming in high school using Python, in *Proceedings of the 8th Australasian Conference on Computing Education - Volume 52; ACE '06*; Australian Computer Society, Inc., AUS, 2006, pp 71–80.
 - [9] D. B. Jordaan, Board games in the computer science class to improve students' knowledge of the Python programming language, in *2018 International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications (ICONIC)*; 2018; pp 1–5 (<https://doi.org/10.1109/ICONIC.2018.8601207>).
 - [10] A. Jayal, S. Lauria, A. Tucker, S. Swift, Python for teaching introductory programming: A quantitative evaluation, *Innovation in Teaching and Learning in Information and Computer Sciences*, 2011, **10**(1), 86–90 (<https://doi.org/10.11120/ital.2011.10010086>).
 - [11] C. J. Weiss, A creative commons textbook for teaching scientific computing to chemistry students with Python and Jupyter Notebooks, *J. Chem. Educ.*, 2021, **98**(2), 489–494 (<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c01071>).
 - [12] S. Hossain, Visualization of bioinformatics data with dash bio, *Proceedings of the 18th Python in Science Conference*, 2019, 126–133 (<https://doi.org/10.25080/Majora-7ddc1dd1-012>).
 - [13] Plotly technologies, *Collaborative data science* (<https://plot.ly>).
 - [14] M. Grinberg, *Flask web development: Developing web applications with Python*, 2° Edizione, O'Reilly & Associates Inc, Sebastopol, California, 2018.

Un corso innovativo in cui Chimica e Scienza della Complessità preparano le nuove generazioni ad affrontare le sfide globali del XXI secolo

Pier Luigi Gentili

Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie,

Università degli Studi di Perugia

e-mail: pierluigi.gentili@unipg.it

Abstract. In the 21st century, humanity is spurred to face global challenges. Global challenges can be won if we prepare the new generations to deal with Complex Systems. Therefore, it is urgent that chemistry is integrated with the Science of Complexity and interdisciplinary courses on Complex Systems are proposed at the University and in Schools.

Keywords: Interdisciplinarietà; sistemi complessi; dinamica non-lineare; termodinamica fuori dall'equilibrio; reti; epistemologia della complessità

1. Introduzione

Uno dei principali obiettivi della ricerca scientifica è quello di risolvere problemi pratici e migliorare il benessere psicofisico dei singoli esseri umani [1]. Al giorno d'oggi ci sono più di otto miliardi di persone che vivono sulla Terra. Naturalmente, ogni persona "lotta" per raggiungere il proprio benessere psicofisico ogni giorno affrontando i propri problemi personali. Tuttavia, al di là delle necessità personali, il nostro mondo contemporaneo è particolare perché dobbiamo anche occuparci di sfide "globali". Lo sviluppo di mezzi trasporto sempre più veloci e delle tecnologie dell'informazione e delle comunicazioni sempre più pervasive ha trasformato radicalmente l'umanità. Gli esseri umani sono oggi molto più interconnessi di quanto non lo fossero nel passato. L'umanità nel suo insieme origina sulla Terra una vasta e dinamica rete. Ogni essere umano che appartiene a questa rete deve affrontare sfide che riguardano la rete nel suo insieme. Queste sfide sono dette "globali", anche perché sono multisetoriali. Infatti, coinvolgono l'umanità sotto diversi punti di vista, come quello ambientale, economico, sociale ed etico [2-4].

Le sfide globali devono essere affrontate con programmi mondiali. Per esempio, nel 2015, le Nazioni Unite hanno redatto un piano di azione, la famosa "Agenda 2030", che include 17 obiettivi che garantiscono lo sviluppo

sostenibile se perseguiti su scala mondiale [5]. Al cuore dei 17 obiettivi ci sono gli esseri umani, le loro società, l'economia mondiale, le aree urbane, gli ecosistemi naturali e tutte le forme di vita che includono e il clima. Questi sono esempi di sistemi complessi [1]. All'apparenza sono diversi e, infatti, sono tradizionalmente indagati da discipline ben distinte, come la Medicina, la Biologia, la Psicologia, le Scienze Sociali, l'Economia, l'Ecologia, la Fisica, la Chimica, etc. Queste materie sono spesso mantenute ben distinte e insegnate separatamente, a parte poche eccezioni (eccezioni che si incontrano soprattutto nel mondo anglosassone). La conseguenza di una didattica mono-disciplinare è che formiamo "specialisti" che non hanno le conoscenze e le competenze per affrontare le sfide globali di questo secolo. Oggigiorno abbiamo bisogno di formare non solo "specialisti", ma anche un altro tipo di figura che può essere chiamata "ibrida" o "generalista" o "eclettica". Tale figura può essere formata insegnandole la Scienza della Complessità [4, 6, 7].

2. La Scienza della Complessità

La Scienza della Complessità affronta la descrizione dei sistemi complessi da un punto di vista sia ontologico (individuando le caratteristiche che accomunano i vari sistemi complessi) che epistemologico (individuando i limiti conoscitivi che incontriamo nel descriverli e nel prevedere il loro comportamento). La Scienza della Complessità fornisce le conoscenze e le metodologie richieste per affrontare le sfide globali [6]. Essa richiede non la semplice multi-disciplinarietà, dove gli specialisti delle varie discipline offrono, ciascuno, la propria descrizione. Piuttosto, essa richiede l'inter-disciplinarietà, cioè il dialogo tra discipline per trovare metodologie di indagine e modelli comuni. Essa, infine, mira alla trans-disciplinarietà, cioè all'abbattimento delle barriere disciplinari e alla formulazione di una descrizione omogenea ed esaustiva dei diversi sistemi complessi [6, 7].

3. Proprietà dei sistemi complessi

L'indagine dei sistemi complessi, sin qui svolta, ha evidenziato che almeno tre (Figura 1) sono le caratteristiche che li accomunano [1, 4, 6, 8].



Figura 1. Le tre proprietà che accomunano i diversi esempi di sistemi complessi

Prima caratteristica

I sistemi complessi possono essere descritti come reti, costituiti da nodi e relazioni. Del resto, l'aggettivo "complesso" deriva etimologicamente dal verbo latino "plectere" che significa intrecciare. Se pensiamo a una cellula, i nodi sono le molecole e le relazioni sono le reazioni chimiche. Nel cervello, i nodi sono i neuroni e le relazioni sono le connessioni tra dendriti e sinapsi appartenenti a diversi neuroni. In un ecosistema, i nodi sono le specie biologiche e le relazioni trofiche e simbiotiche sono ciò che li lega. I diversi sistemi complessi hanno, in genere, differenti architetture delle reti e, per la maggior parte di essi, nodi e relazioni sono diversi tra di loro e dal comportamento variabile. Le relazioni tra nodi sono generalmente reciproche: si hanno, cioè, azioni di feedback e, quindi, elevati gradi di non-linearità. La Scienza delle Reti è una delle teorie fondamentali per descrivere i sistemi complessi [7, 8].

Seconda caratteristica

I sistemi complessi sono "fuori dall'equilibrio" in senso termodinamico. Se il sistema complesso coinvolge solo materia inanimata, il suo comportamento è guidato da campi di forze. Se, invece, il sistema complesso coinvolge esseri viventi, il suo comportamento dipende anche dalla variabile "informazione" che ogni essere vivente codifica, raccoglie, memorizza, elabora

e invia per perseguire i propri scopi. La termodinamica fuori dall'equilibrio è un'altra teoria rilevante da insegnare per comprendere i sistemi complessi [7, 9, 10].

Terza caratteristica

I sistemi complessi esibiscono proprietà emergenti. Una proprietà è detta emergente quando è attribuibile alla rete nel suo complesso e non può essere interpretata come semplice somma delle proprietà di tutti i nodi e relazioni che costituiscono il sistema stesso. Per far comprendere il concetto di proprietà emergente, si possono fare numerosi esempi quali i fenomeni di auto-organizzazione nel tempo (processi periodici) e nello spazio (onde chimiche, strutture di Turing, convezione, etc.) e il caos deterministico [1]. Queste proprietà emergenti sono comprese ricorrendo ai principi della dinamica non-lineare, che è un'altra teoria fondamentale da insegnare per la conoscenza dei sistemi complessi [7]. Tuttavia, è bene evidenziare che esistono proprietà emergenti che non sono completamente razionalizzate e, quindi, tanto meno predicibili. Un esempio è il fenomeno vita. Gli esseri viventi hanno degli attributi che li distinguono nettamente dalla materia inanimata. Tuttavia, non sappiamo ancora come la vita si è originata sulla Terra. Inoltre, non siamo in grado di ottenere la vita da materia inanimata e non siamo in grado di predire l'evoluzione delle attuali forme biologiche [9, 10]. Un altro esempio di proprietà emergente non ancora ben compresa è l'intelligenza umana. Nonostante il termine intelligenza venga utilizzato in diversi ambiti disciplinari, come in filosofia, psicologia, neuroscienze e informatica, manchiamo ancora di una definizione universalmente valida e accettata di intelligenza, oltre al fatto che non siamo in grado di riprodurre qualunque prestazione dell'intelligenza umana. E ancora non sappiamo se l'intelligenza sia riconducibile unicamente all'attività del sistema nervoso. Perché ci sono proprietà emergenti non ancora ben comprese e che non possono essere predette? Ci sono almeno tre principali ragioni che delineano la cosiddetta "Complessità epistemologica" [1, 4, 6].

4. Complessità epistemologica

Il primo contributo alla Complessità epistemologica è la Complessità descrittiva [6] che rappresenta le difficoltà che si incontrano nel descrivere certi sistemi complessi utilizzando un approccio riduzionistico. Le difficoltà possono derivare da:

- l'elevato numero di nodi, la loro diversità e variabilità di comportamento;
- l'elevato numero di relazioni, la loro diversità e variabilità;
- la sensibilità delle caratteristiche appena menzionate nei confronti del contesto.

In altre parole, certi sistemi complessi e certe loro proprietà emergenti hanno le caratteristiche delle “forme variabili” che sono entità o eventi il cui riconoscimento è reso difficile dalle loro molteplici caratteristiche, dalla loro variabilità e dall’estrema sensibilità nei confronti del contesto [11]. Esempi di “forme variabili” sono le specie biologiche, le serie temporali aperiodiche caotiche, i sintomi e le forme in diagnosi medica, le relazioni non-lineari ignote tra variabili, gli eventi politici, sociali ed economici. Nonostante l’attività di ricerca volta al riconoscimento di “forme variabili” sia particolarmente attiva, manchiamo ancora di algoritmi universalmente validi ed efficaci per riconoscere qualunque “forma variabile”. La mancanza di una descrizione completa di certi sistemi complessi, li rende non-deterministici e, quindi, presentano un comportamento casuale. In queste situazioni la Complessità ontologica ed epistemologica si mescolano.

Il secondo contributo alla Complessità epistemologica deriva dalla Complessità computazionale [12]. Molti dei problemi computazionali che coinvolgono sistemi complessi sono risolvibili, ma intrattabili. Esempi sono problemi pratici come la pianificazione di azioni, il problema del “commesso viaggiatore”, ma anche l’equazione di Schrödinger, il protein folding e il machine learning. Secondo la teoria della Complessità computazionale, tutti i problemi risolvibili possono essere polinomiali (quando il numero di passaggi computazionali è una funzione polinomiale della dimensione del problema) o esponenziali (quando il numero di passaggi computazionali è una funzione esponenziale della dimensione del problema). Tutti i problemi polinomiali (P) sono trattabili, perché è possibile determinare la loro soluzione esatta in un intervallo di tempo ragionevole, qualunque sia la dimensione del problema. D’altro canto, i problemi esponenziali, che hanno grandi dimensioni, sono intrattabili perché è impossibile determinare la loro soluzione esatta in un tempo ragionevole, anche se si utilizzano i supercomputer più veloci al mondo. I problemi esponenziali intrattabili sono trasformati in problemi polinomiali non-deterministici (NP): si fissa un criterio arbitrario di accettabilità per una soluzione e, attraverso algoritmi euristici, si generano soluzioni che sono testate se essere accettabili o meno, il tutto in tempi ragionevoli. Nel frattempo, molti scienziati, anche attratti dal milione di dollari messo in palio dal “Clay Mathematics Institute”, che ha proclamato il “P versus NP” come uno dei problemi matematici del millennio, stanno cercando di verificare, in maniera rigorosa, l’esistenza di algoritmi che possano trasformare i problemi NP in P, o l’impossibilità di attuare questa trasformazione. Se, un giorno, qualcuno riuscisse a dimostrare che i problemi NP sono riducibili a problemi P, la Complessità computazionale si scioglierebbe come neve al Sole: tutto diverrebbe più efficiente e la nostra vita non sarebbe più la stessa [1, 6]. Tuttavia, se anche un giorno si dovesse dimostrare che tutti i problemi NP sono riducibili a problemi P e se anche si dovessero formulare algoritmi universalmente validi ed efficaci per riconoscere qualunque forma variabile, certe limitazioni intrinseche del potere predittivo della Scienza rimarrebbero. Per quanto riguarda il mondo microscopico, sappiamo che vale il principio

di Indeterminazione di Heisenberg. Secondo tale principio (formulato nella prima metà del XX secolo), non è possibile determinare accuratamente e contemporaneamente due proprietà rilevanti, come la posizione e la quantità di moto, per fare previsioni del comportamento dinamico di ogni singola particella. Pertanto, il sogno deterministico di Laplace di poter predire la dinamica dell'universo, a partire dalla descrizione dei suoi elementi microscopici, andò completamente in frantumi. Allora potremmo pensare di limitare la descrizione dei sistemi complessi su scala macroscopica. Tuttavia, certi sistemi complessi possono esibire ordine mediante fluttuazione e dinamiche caotiche. I fenomeni di rottura della simmetria, che sono generati da fluttuazioni microscopiche, sono razionalizzati, ma non riproducibili e predicibili nei loro dettagli. D'altro canto, ogni dinamica deterministica caotica è aperiodica ed estremamente sensibile alle condizioni iniziali. Poiché la determinazione delle condizioni iniziali è sempre affetta da inevitabili errori (quelli strumentali), ne deriva che le dinamiche caotiche siano imprevedibili a lungo termine per definizione.

5. Complessità bioetica

Nonostante la Scienza sia consapevole delle limitazioni (Figura 2) che si incontrano nel comprendere e predire il comportamento di certi sistemi complessi, l'umanità sta sviluppando delle tecnologie che sono in grado di modificare i sistemi complessi naturali.

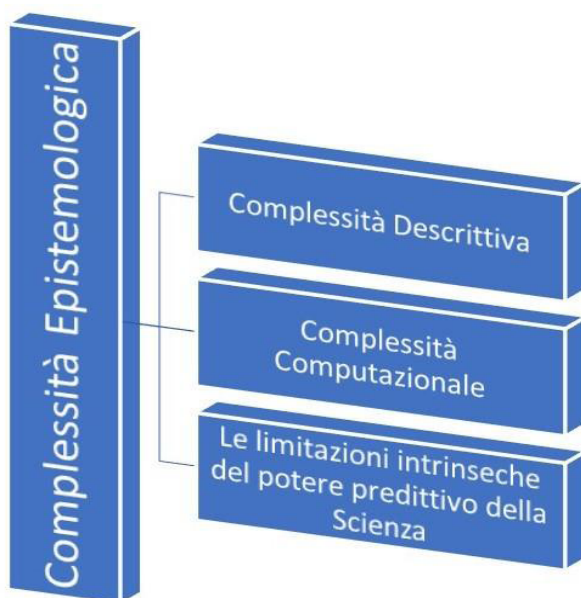


Figura 2. Contributi alla Complessità epistemologica

Basti pensare alle Biotecnologie, alle Nanotecnologie, all'Intelligenza Artificiale e alla Robotica. Sorge, allora, spontanea una domanda: "È sempre opportuno e giusto realizzare tutto ciò che la tecnologia rende fattibile?" [13]. Rispondere a questa domanda non è affatto semplice perché significa affrontare quella che può essere definita la Complessità bioetica [6, 13]. Come possiamo affrontarla? Come possiamo affrontare tutte le sfide globali del XXI secolo? Come possiamo raggiungere gli obiettivi dell'Agenda 2030? Alcune promettenti strategie sono di seguito riportate.

6. Strategie per il futuro

Abbiamo bisogno di preparare le nuove generazioni alle sfide globali di questo secolo con una didattica innovativa i cui due punti rilevanti sono di seguito riportati.

- È indispensabile l'interdisciplinarietà. Un corso interdisciplinare sui sistemi complessi è sicuramente essenziale per preparare le nuove generazioni a saper affrontare le sfide globali di questo secolo. In questo corso dovrebbero essere presentate le proprietà che accomunano i sistemi complessi, insieme alla Complessità epistemologica e a come affrontarla. Un esempio di questo tipo di corso [7] è tenuto per gli studenti universitari della Laurea Magistrale in Scienze Chimiche, indirizzo Chimico-Fisico, e per gli studenti universitari della Laurea Magistrale in Biotecnologie Molecolari ed Industriali dell'Università degli Studi di Perugia.
- È importante insegnare non solo l'approccio riduzionistico, che cerca di caratterizzare tutti i nodi e le relazioni che costituiscono il sistema complesso, ma anche l'approccio sistemico, che si focalizza sul comportamento del sistema nel suo insieme, tralasciando gli elementi costitutivi. Alternativamente si può ricorrere all'approccio mesoscopico che cerca di interpretare il comportamento del sistema complesso, caratterizzando quello di gruppi ("clusters") di nodi e relazioni che lo costituiscono.

Le sfide globali richiedono anche dei cambiamenti nella ricerca, come indicato sotto.

- È sicuramente indispensabile favorire lo sviluppo di gruppi di ricerca interdisciplinari.
- Dal momento che il comportamento dei sistemi complessi è alquanto dinamico, è necessario monitorarli costantemente, raccogliendo, memorizzando ed elaborando grandi quantità di dati, cioè i cosiddetti Big Data.
- Un modo alternativo e promettente per eseguire esperimenti è attraverso simulazioni computazionali, basate su modelli plausibili dei sistemi complessi.

- Per rendere la seconda e terza strategia della ricerca veramente promettenti, è necessario (a) migliorare le prestazioni delle nostre macchine computazionali, aumentandone la velocità ed estendendone lo spazio di memoria, (b) formulare nuovi e più efficienti algoritmi e (c) sviluppare modelli sempre più attendibili dei sistemi complessi.
- Gli attuali computer elettronici sono basati sull'architettura di von Neumann, il cui principale difetto è quello di avere la memoria e il processore separati fisicamente, per cui le informazioni devono costantemente fluire dalla memoria al processore e viceversa, rallentando i calcoli. La legge empirica di Moore ha descritto la loro costante evoluzione negli ultimi decenni: il numero di transistor per chip è raddoppiato ogni due anni. Miniaturizzando i transistor, cioè gli interruttori base per codificare ed elaborare informazione binaria, le prestazioni dei computer sono state migliorate costantemente. Tuttavia la legge di Moore cesserà di valere presto, perché i transistor saranno costituiti da pochi atomi. Ecco, allora, che le compagnie delle Tecnologie dell'Informazione e delle Comunicazioni stanno investendo miliardi di dollari per escogitare nuove architetture che possano andare oltre la legge di Moore. A tale riguardo delle idee possono provenire dalla linea di ricerca della Computazione Naturale ("Natural Computing") [1, 6].
- Nella linea di ricerca interdisciplinare del Natural Computing, scienziati, provenienti da diversi ambiti disciplinari, collaborano e traggono ispirazione dalla natura per proporre: (a) nuovi algoritmi, (b) nuovi materiali ed architetture per calcolare e memorizzare e (c) nuovi metodi e modelli per comprendere più a fondo i sistemi complessi. L'idea di base è che ogni stato distinguibile della materia e dell'energia può essere utilizzato per codificare informazione e ogni trasformazione naturale di questi stati è un tipo di computazione.

7. Conclusioni

È urgente che la didattica si rinnovi e prepari non solo "specialisti", ma anche "generalisti" (dette anche figure "eclettiche" o "ibride") che abbiano "gli strumenti" e le conoscenze per affrontare le sfide globali dell'attuale secolo. Queste nuove figure possono essere preparate insegnando loro la Scienza della Complessità. Passerà del tempo prima che in Italia vengano istituiti corsi di laurea interdisciplinari incentrati sulla Complessità. È, pertanto, opportuno proporre singoli insegnamenti interdisciplinari sui sistemi complessi all'interno dei tradizionali corsi di laurea mono-disciplinari presenti nei diversi Atenei, come, per esempio, sta avvenendo presso l'Uni-

versità degli Studi di Perugia, dove un tale tipo di insegnamento è previsto sia nella Laurea Magistrale in Scienze Chimiche che nella Laurea Magistrale in Biotecnologie Molecolari ed Industriali e per i quali è anche stato scritto un libro di testo [1]. Questi insegnamenti dovrebbero essere organizzati e proposti anche nelle scuole italiane. Infatti, la multidisciplinarietà è intrinseca al sistema scolastico italiano. Ciò che si richiede è un proficuo dialogo interdisciplinare tra i professori, i quali, guidati dal desiderio di preparare le nuove generazioni alle sfide globali, possano organizzare lezioni trans-disciplinari sui sistemi complessi.

Riferimenti

- [1] P. L. Gentili, *Untangling complex systems: A grand challenge for Science*, CRC Press, Boca Raton (FL), 2018.
- [2] Y. N. Harari, *21 lessons for the 21st century*, Penguin Random House, London (UK), 2018.
- [3] J. Martin, *The meaning of the 21st century: a vital blueprint for ensuring our future*, Riverhead Books, New York (NY, USA) 2007.
- [4] P. L. Gentili, G. Cardinali, P. Dominici, D. Grohmann, M. E. Menconi, C. Santi, The science of complex systems for preparing the new generation to tackle global challenges, *8th International Conference on Higher Education Advances (HEAd'22)*, 2022, 959-966.
- [5] General Assembly of the United Nations (2015): Transforming our world: the 2030 Agenda for sustainable development; <https://www.refworld.org/docid/57b6e3e44.html> (Accessed November 14, 2023).
- [6] P. L. Gentili, Why is complexity science valuable for reaching the goals of the UN 2030 Agenda? *Rend. Fis. Acc. Lincei*, 2021, **32**, 117–134.
- [7] P. L. Gentili, Designing and teaching a novel interdisciplinary course on complex systems to prepare new generations to address 21st-century challenges, *J. Chem. Edu.*, 2019, **96**, 2704–2709.
- [8] M. E. J. Newman, Complex systems: A survey, *Am. J. Phys.*, 2011, **79**, 800–810.
- [9] S. I. Walker, P. C. W. Davies, G. F. R. Ellis, *From matter to life*. Cambridge University Press, Cambridge (UK), 2017.
- [10] M. P. Banchetti-Robino, G. Villani, *From the atom to living systems: A chemical and philosophical journey into modern and contemporary Science* Oxford Academic, New York (NY, USA) 2023.
- [11] C. M. Bishop, *Pattern recognition and machine learning*, Springer, Singapore, 2006.
- [12] O. Goldreich, *Computational complexity. A conceptual perspective*. Cambridge University Press, Cambridge (UK), 2008.
- [13] P. L. Gentili, *The winged science to face bioethical complexity*. Gemma Ed., Ceccano (FR) Italia, 2023.

Perché gli studenti universitari decidono di abbandonare gli studi?

Italo Testa^a, Silvia Galano^a, Oreste Tarallo^b

^a*Dipartimento di Fisica "E. Pancini", Università di Napoli Federico II;*

^b*Dipartimento di Scienze Chimiche, Università di Napoli Federico II*

e-mail: oreste.tarallo@unina.it

Abstract. In this paper, we investigated the self-assessment ability of first-year students in the Biology and Engineering degree programs engaged in chemistry and physics teaching, respectively, courses that students usually encounter in the first semester of their first year. Specifically, we investigated the correlations between students' self-assessment ability and the likelihood that they would pass the final exam for the course. Our study shows that students who are more likely to pass the exam are the most calibrated while students who are less likely to pass the exam turn out to be typically over-confident. It also turns out that boys are on average more over-confident than girls.

Keywords: Abbandono degli studi; confidenza; autoefficacia; autovalutazione; metacognizione

1. Introduzione

Le istituzioni di istruzione secondaria e terziaria si trovano con sempre maggior frequenza a dover affrontare il fenomeno del "*drop-out*", cioè l'abbandono degli studi da parte degli studenti prima di aver conseguito il diploma o la laurea [1]. Ad esempio, secondo le stime dell'Organizzazione per la cooperazione e per lo sviluppo economico [2], in media il 33% degli studenti termina il percorso di studi prima di conseguire il diploma. Inoltre, diversi studi hanno dimostrato che il fenomeno del *drop-out* universitario è legato ai voti scolastici, al tipo di scuola superiore frequentata, all'età, al contesto economico e familiare, al genere e alla nazionalità degli studenti che abbandonano gli studi [3-5].

In Italia, a livello universitario, il fenomeno del *drop-out* coinvolge prevalentemente le matricole e gli studenti cosiddetti "fuori corso". Secondo le stime dell'ANVUR [3], ad abbandonare gli studi sono in media il 12% degli iscritti al primo anno e il 30% degli studenti iscritti all'università da almeno sei anni.¹ Questi dati [3], così

¹ Il dato ANVUR si riferisce a studenti iscritti ad un dato corso di laurea che, per qualsiasi motivo, non si iscrivono dal primo al secondo anno. Il dato include anche studenti lavoratori in ritardo con gli studi, o studenti che scelgono di iscriversi ad altro corso di laurea.

come quelli riportati da diversi autori [4], suggeriscono che il monitoraggio delle prestazioni degli studenti nel corso del primo anno di università può risultare cruciale per prevenire il *drop-out* [5]. Tale monitoraggio è particolarmente importante per i corsi di area Scienze-Tecnologia-Ingegneria-Matematica (STEM), per i quali le competenze pregresse, ad esempio in Matematica, Fisica e Chimica, influiscono significativamente sul percorso accademico [6].

Monitorare il rendimento degli studenti durante il primo anno universitario e supportarli con *tutor* che li seguano per quanto riguarda l'apprendimento delle conoscenze disciplinari non è, però, sufficiente. Per poter progettare e implementare strategie efficaci di contrasto agli abbandoni è necessario monitorare anche gli aspetti metacognitivi e psicologici che riguardano gli studenti. Infatti, a influire sul rendimento degli studenti, spesso è proprio questa tipologia di variabili, in combinazione con variabili di tipo sociologico e demografico.

Recenti studi in didattica della chimica e della fisica hanno dimostrato, ad esempio, che i risultati accademici in queste discipline possono essere in qualche modo correlati e in qualche modo "previsti" in base al rendimento scolastico, ma anche dalla percezione che lo studente o la studentessa hanno del proprio livello di competenza, autoefficacia e genere. Ad esempio, Vincent-Ruz [7] ha dimostrato che il voto di matematica al termine della scuola superiore (Scholastic Assessment Test, SAT, prova equivalente ai test del consorzio CISIA che si svolge nei paesi anglosassoni) è il più robusto predittore del rendimento all'esame di Chimica Generale. Inoltre, ha riscontrato che questa relazione è mediata dalla percezione di competenza in chimica, ossia dalla percezione che gli studenti hanno della propria capacità di risolvere con successo esercizi e compiti legati alla chimica. Il genere, invece, funge da mediatore tra il voto di matematica e la percezione di competenza: le donne con punteggi SAT di matematica più bassi avevano anche convinzioni di competenza chimica più basse [8]. Dalgety [6] riporta inoltre che l'autoefficacia in chimica risulta essere un predittore statisticamente significativo dell'intenzione degli studenti universitari del primo anno di iscriversi a un corso di chimica del secondo semestre o del secondo anno.

Va sottolineato però che variabili, come le competenze pregresse nelle discipline di base, l'autoefficacia, o la votazione di diploma, o di ammissione all'università (ad esempio il SAT o i test CISIA in Italia), non tengono conto di un possibile disallineamento tra le performance reali di un individuo e la percezione che l'individuo può avere di tali variabili. Partendo da tale considerazione, in questo contributo ci siamo focalizzati sullo studio della fiducia ("*confidenza*") nella propria performance e di come una errata autovalutazione delle proprie conoscenze e competenze possano influire sul rendimento accademico delle matricole di corsi di laurea di area STEM.

2. Confidenza e accuratezza dell'autovalutazione in chimica e fisica

La *confidenza* può essere definita come la convinzione di essere riusciti ad avere successo nello svolgere uno specifico compito assegnato quale, ad esempio, un questionario [9]. La confidenza non deve essere confusa con l'*autoefficacia*: la prima si riferisce a un giudizio metacognitivo retrospettivo, la seconda, invece, si riferisce a un giudizio prospettico sulle proprie capacità [10]. La ricerca ha dimostrato che la confidenza ha una relazione statisticamente significativa con la motivazione, l'interesse e il processo decisionale [11]. Inoltre, la confidenza è positivamente correlata con i risultati accademici e la perseveranza nel portare avanti compiti legati allo studio e all'apprendimento [12].

Un aspetto rilevante delle misure di confidenza è l'accuratezza con cui la si stima. Tale accuratezza misura quanto un individuo sia capace di autovalutare la propria *performance* in maniera accurata, cioè senza sovra- o sotto-stimarla. Studi precedenti hanno mostrato che migliori prestazioni in un determinato compito sono correlate positivamente con un'accurata autovalutazione della confidenza [13]. Un eccesso di confidenza, a cui corrispondono prestazioni effettive non in linea con le aspettative, risulta invece essere correlato a competenze e capacità decisionali inadeguate, autoregolazione inefficace e bassi risultati [14].

In questo contributo ci siamo interessati al cosiddetto *pregiudizio di sovra-confidenza* ("*overconfidence bias*", [15]). Tale *bias* corrisponde alla sopravvalutazione delle proprie capacità reali nell'aver eseguito un compito specifico. Per rilevare l'*overconfidence bias* è necessario, innanzitutto, calcolare la differenza tra il punteggio normalizzato, che esprime la fiducia nell'aver svolto correttamente un certo compito, e la frazione di risposte effettivamente corrette in quello stesso compito. Tale differenza è chiamata *accuratezza dell'autovalutazione* [16]. Quando l'accuratezza dell'autovalutazione è circa pari a zero, si dice che l'individuo è calibrato, mentre, se l'accuratezza dell'autovalutazione supera di molto lo zero, si può parlare di un *bias* di sovra-confidenza [12]. Studi precedenti hanno dimostrato che il *bias* di sovra-confidenza è inversamente proporzionale al rendimento, vale a dire che gli studenti con un rendimento insufficiente mostrano una sovra-confidenza più elevata [17].

La ricerca ha anche identificato una correlazione tra la calibrazione degli individui e la difficoltà del compito [18]. È più probabile, infatti, che la sovra-confidenza si manifesti quando si affrontano compiti difficili, mentre è più probabile che la sotto-confidenza venga rilevata con compiti facili [19]. Inoltre, contrariamente a quanto ci si potrebbe aspettare, la sfiducia aumenta con la pratica e la familiarità con il compito [19]. Tali evidenze suggeriscono che anche il *bias* di sotto-confidenza può essere dannoso per l'apprendimento, in quanto gli studenti potrebbero non esserne consapevoli, e quindi sottovalutare, i potenziali benefici dell'esercizio sulle proprie prestazioni [20].

Nell'ambito della ricerca in didattica della chimica e della fisica, il costrutto della confidenza è stato utilizzato per lo più come variabile utile all'identificazione delle misconcezioni [21-22]. Poca attenzione è invece stata data al ruolo che l'autovalutazione riveste nell'influenzare il rendimento degli studenti universitari. In questo studio ci siamo concentrati su questo aspetto e, in particolare, sulle seguenti domande di ricerca:

- RQ1 - L'accuratezza dell'autovalutazione predice la probabilità di successo accademico?
- RQ2 - Quali sono le differenze tra studentesse e studenti?
- RQ3 - Come è influenzata tale relazione dal rendimento scolastico pregresso?

3. Metodi

Per rispondere alle nostre domande di ricerca, abbiamo scelto due corsi di laurea non esplicitamente incentrati né sulla chimica né sulla fisica, ovvero un corso di laurea in Biologia e uno in Ingegneria. Abbiamo coinvolto un campione di convenienza di 206 studenti italiani, 81 dei quali seguivano il corso di laurea in Biologia (studentesse = 75%), mentre 125 erano iscritti al corso di laurea in Ingegneria (studentesse = 22%). L'età dei partecipanti variava tra i 18 e i 21 anni ($18,7 \pm 0,7$ anni s.d.).

Gli studenti di Biologia frequentavano un corso introduttivo di Chimica Generale ed Inorganica di 72 ore, tenuto dall'ultimo autore. Gli studenti di Ingegneria frequentavano un corso introduttivo di Fisica Generale 1 di 48 ore, tenuto dal primo autore.

Entrambi i corsi di Chimica e Fisica erano tenuti al primo semestre del primo anno dei rispettivi Corsi di Studi ed erano essenzialmente finalizzati allo sviluppo di competenze di base di chimica e fisica, con particolare attenzione alla risoluzione di problemi. Entrambi i corsi prevedevano lezioni frontali e non richiedevano alcun prerequisito formale, ad eccezione di conoscenze relative all'algebra di base.

I docenti di entrambi i corsi si sono accordati per adottare lo stesso sistema di valutazione consistente in un esame finale diviso in due parti. La prima parte consisteva in un esame scritto, obbligatorio per l'ammissione alla seconda parte, che, invece, prevedeva un esame orale. Inoltre, per incentivare la partecipazione attiva degli studenti alle lezioni e per dare loro un *feedback* utile alla valutazione in itinere, oltre che ad incoraggiarli a studiare regolarmente, i docenti assegnavano periodicamente dei compiti a casa, comprendenti sia test a risposta multipla che esercizi a risposta aperta relativi al programma svolto durante il corso.

4. Strumenti

In questo studio sono stati utilizzati i seguenti strumenti.

Introductory Chemistry Inventory (ICI): questo strumento, sviluppato a partire da studi precedenti [23, 24], comprendeva 13 *item* a scelta multipla, 8 dei quali a due livelli (primo livello = conoscenza; secondo livello = giustificazione della risposta) e 5 in formato singola. I quesiti indagavano argomenti comunemente affrontati nei programmi scolastici di chimica della scuola superiore italiana: stati della materia; fenomeni termici; reazioni di ossidoriduzione; stechiometria; soluzioni. In figura 1 è riportato un esempio di domanda a due livelli.

Introductory Physics Inventory (IPI): questo strumento, sviluppato a partire dai "Concept inventory" sulle forze [25] e su energia e moto [26], comprende 8 *item* a due livelli e 5 *item* a un livello. I quesiti riguardavano argomenti comunemente affrontati nei programmi scolastici di fisica delle scuole secondarie: i principi di Newton, il moto circolare, la forza gravitazionale, le trasformazioni di energia, il teorema lavoro-energia, tutti presenti nei programmi di fisica delle scuole superiori italiane. In figura 2 è riportato un esempio di domanda a un livello.

A ogni *item* dei questionari ICI ed IPI, sia a uno che a due livelli, è stato infine associato un livello in cui veniva richiesta la confidenza nella propria risposta utilizzando la formulazione riportata in figura 3.

13

100 mL di acqua a 25°C e 100 mL di alcol a 25°C vengono entrambi riscaldati alla stessa velocità in condizioni identiche. Dopo 3 minuti la temperatura dell'alcol è di 50°C. Due minuti dopo la temperatura dell'acqua è di 50°C. Quale liquido ha ricevuto più calore per riscaldarsi fino a 50°C? * (1 punto)

acqua ✓

alcol

entrambi i liquidi hanno ricevuto la stessa quantità di calore

non è possibile fornire una risposta certa in base alle informazioni date.

14

Motiva la tua risposta alla domanda precedente * (1 punto)

L'acqua ha un punto di ebollizione più elevato rispetto a quello dell'alcol

L'acqua ha un calore specifico maggiore e quindi si riscalda più lentamente ✓

entrambe le sostanze hanno incrementato la loro temperatura di 25°C

L'alcol ha una minore densità e minore tensione di vapore rispetto all'acqua

L'alcol ha un calore specifico maggiore e quindi si riscalda più rapidamente

Figura 1. Esempio di domanda dello strumento *Introductory Chemistry Inventory* (ICI)

Tre sferette sono lanciate come in figura. Chi arriva con velocità maggiore alla linea tratteggiata?
(1 punto)

(1) (2) (3)

Non si può stabilire, dipende dalla massa
 La 1
 La 1 e la 2 con la stessa velocità, la 3 non arriva alla linea tratteggiata
 La 3
 Avranno la stessa velocità ✓

Figura 2. Esempio di domanda dello strumento *Introductory Physics Inventory* (IPI)

Quanto ti senti sicuro della risposta che hai dato alla domanda precedente? (1 stella: per nulla; 2 stelle: poco; 3 stelle: abbastanza; 4 stelle: molto) *

☆☆☆☆

Figura 3. Formulazione della richiesta di confidenza nella propria risposta

5. Analisi dei dati

Per ottenere l'accuratezza dell'autovalutazione per ogni studente, abbiamo prima valutato le risposte ai test ICI e IPI, assegnando 1 punto per ogni risposta corretta agli *item* a un livello; nel caso, invece, degli *item* a due livelli, abbiamo assegnato 1 punto se la risposta ad entrambi i livelli di conoscenza e di motivazione della risposta erano corretti.

L'alfa di Cronbach è pari a 0,64 complessivamente, mentre se si considera solo la scala della chimica è 0,52, e per la sola scala di fisica è 0,51. Tali valori possono essere considerati accettabili per un questionario che misura i costrutti legati alla comprensione concettuale, dove ci si aspettano basse correlazioni tra le risposte [27].

L'affidabilità della scala di confidenza per tutti e 26 gli *item* è eccellente (alfa

di Cronbach = 0,95). Anche l'affidabilità della scala di fiducia per le singole scale di chimica e fisica è eccellente: 0,91 e 0,93, rispettivamente.

Abbiamo poi calcolato l'accuratezza dell'autovalutazione per ogni studente, sottraendo al punteggio medio della confidenza il punteggio medio ottenuto nei due questionari disciplinari ICI e IPI. Infine, abbiamo eseguito una serie di analisi della varianza fattoriale a due vie, utilizzando l'accuratezza dell'autovalutazione come variabile continua dipendente e le seguenti variabili categoriali: "esito all'esame" (variabile binaria, 1 = superamento esame, "pass"; 0 = esame non superato, "fail"), genere (variabile binaria, 1 = genere femminile; 0 = genere maschile) e "performance scolastica" (variabile binaria che tiene conto sia del voto all'esame di stato che del voto in chimica e fisica all'ultimo anno, 1 = "very high performers", cioè voto = 100 e voti > 7; 0 = "medium-high performers", cioè tutte le altre combinazioni). L'analisi della varianza fattoriale permette di studiare le differenze in una variabile continua tra due o più gruppi (nel nostro caso gli studenti che passano o non passano l'esame), controllando gli effetti dovuti a sottogruppi esistenti in entrambi i gruppi (studentesse e studenti, *very high performers* e *medium-high performers*).

6. Risultati

I grafici in figura 4 mostrano i risultati dell'analisi della varianza a due vie quando si considerano come variabili categoriali indipendenti l'esito dell'esame e il genere.

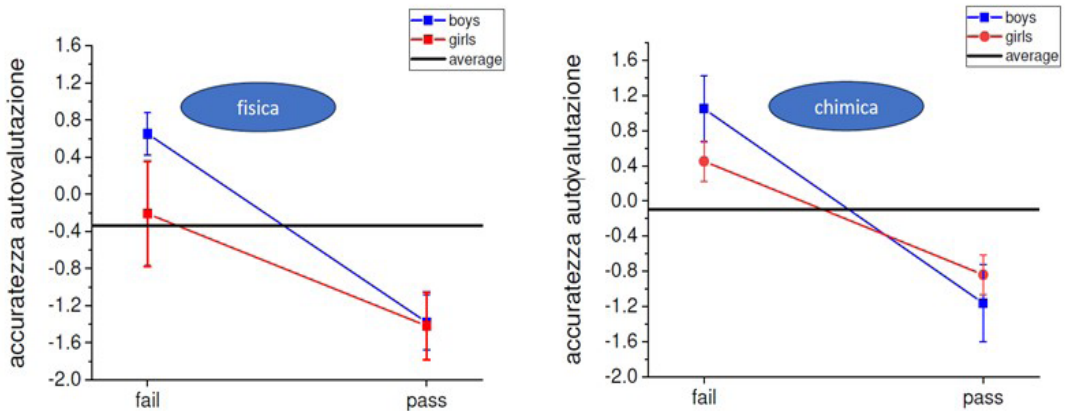


Figura 4. Andamento dell'accuratezza dell'autovalutazione in fisica e chimica in funzione dell'esito all'esame e del genere; per la spiegazione delle etichette sugli assi e della legenda vedi testo

Osserviamo che in fisica sia i ragazzi (in blu) che le ragazze (in rosso) che non superano la prova risultano essere sovra-confidenti e che questo effetto è particolarmente accentuato nel caso dei ragazzi. Al contrario, quando si considera

chi supera l'esame, ciò che emerge dai dati è che sia i ragazzi che le ragazze sono sotto-confidenti e, in tal caso, non vi è una differenza statisticamente significativa tra i due generi. È interessante, inoltre, notare che la media di accuratezza di valutazione è di circa $-0,3$, ciò significa che nel caso della fisica gli studenti sono ampiamente sotto-confidenti.

In chimica gli studenti risultano essere mediamente più calibrati (la media dell'accuratezza di valutazione è di poco inferiore a 0). Tuttavia, anche in questo caso, ritroviamo che ragazzi e ragazze che non superano l'esame sono sovra-confidenti, con i ragazzi che risultano essere più sovra-confidenti delle ragazze. Fra coloro che superano l'esame abbiamo, invece, un'inversione: a differenza di quanto visto in fisica sono i ragazzi a essere meno confidenti delle ragazze.

Questo risultato può essere interpretato facendo riferimento al fatto che studenti che si sottovalutano sono maggiormente spinti a impegnarsi nello studio per compensare quella che ritengono essere una loro preparazione insufficiente. Al contrario studenti sovra-confidenti sottostimano la necessità di impegnarsi nello studio, ritenendo di non averne bisogno. Un altro risultato interessante che emerge dalla nostra analisi riguarda le differenze di genere nella stima dell'accuratezza dell'autovalutazione. In particolare, emerge che le studentesse tendono a sovrastimare la loro preparazione in misura minore rispetto ai maschi.

In figura 5 sono mostrati i risultati ottenuti utilizzando l'esito all'esame e il *background* scolastico come variabili indipendenti.

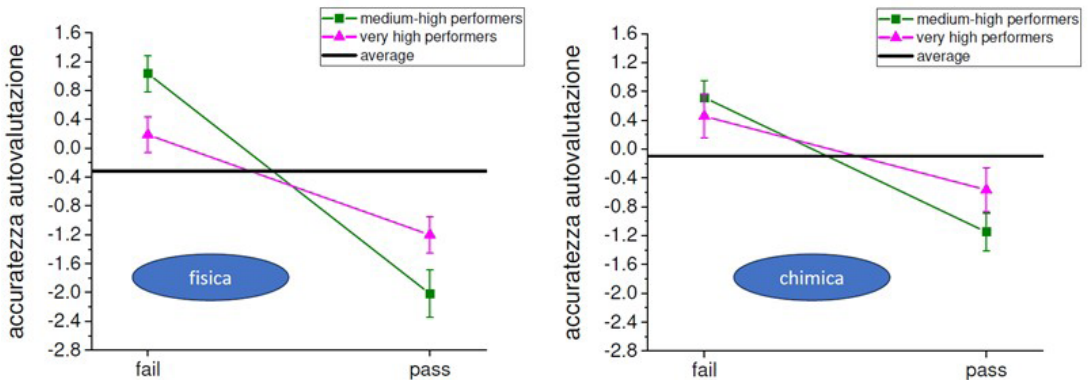


Figura 5. Andamento dell'accuratezza dell'autovalutazione in fisica e chimica in funzione dell'esito all'esame e del *background* scolastico; per la spiegazione delle etichette sugli assi e della legenda vedi testo

Nel caso della fisica si nota che, fra coloro che non superano l'esame, gli studenti con una preparazione medio-alta ("*medium-high performers*", in verde in figura 5) sono significativamente più sovra-confidenti di coloro che hanno

una preparazione più solida (“*very high performers*”, in rosa in figura 5) e che risultano essere, quindi, meglio calibrati. Anche nel caso degli studenti che superano l’esame si verifica una situazione analoga. Nel caso dell’esame di chimica, i risultati sono simili a quanto emerge per l’esame di fisica, tuttavia, in questo caso, possiamo osservare che mediamente gli studenti sono meglio calibrati.

7. Conclusioni

La correlazione tra la capacità di autovalutazione e la probabilità di superare l’esame supporta la necessità di investire in azioni e strategie finalizzate a migliorare in studenti e studentesse la capacità di autovalutazione. I risultati che emergono da questo studio suggeriscono che la mancanza di accuratezza metacognitiva e il conseguente *bias* di eccessiva fiducia possono essere dannosi, specialmente per gli studenti con scarso rendimento, che potrebbero non percepire la necessità di migliorare la loro regolamentazione dello studio. In quest’ottica, ci si propone di lavorare per inserire nei corsi di formazione docenti il tema dell’autovalutazione degli studenti e di sviluppare con gli stessi docenti strategie didattiche alternative (come ad esempio *Interactive lecture demonstrations, Scaffolding, Guided inquiry, Investigative science learning environment*) che possano supportare gli studenti nell’autovalutarsi già dalle scuole secondarie. A tali azioni saranno affiancate azioni di formazione rivolte ai colleghi che sono incaricati di tenere i corsi al primo anno dei corsi di studi universitari, affinché possano supportare ancora più efficacemente gli studenti nel passaggio scuola-università, implementando strategie didattiche utili a migliorare la capacità di autovalutazione dei nuovi iscritti.

Riferimenti

- [1] S. Wollscheid, B. Stensaker, B. Jongbloed, H. Vossensteyn, L. Cremonini, E. Hovdhaugen, F. Kaiser, A. Kottmann, Dropout and completion in higher education in Europe, Main report, 2015 (<https://data.europa.eu/doi/10.2766/826962>)
- [2] Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD): Education at a glance 2021, OECD indicators; OECD Publishing.
- [3] Agenzia Nazionale di Valutazione del Sistema Universitario e della Ricerca (ANVUR): Rapporto Biennale 2018; retrieved September, 2022 (<https://www.anvur.it/rapporto-biennale/rapporto-biennale-2018/>).
- [4] M. Cannistrà, C. Masci, F. Ieva, T. Agasisti, A. M. Paganoni, Early-predicting dropout of university students: an application of innovative multilevel machine learning and statistical techniques, *Studies in Higher Education*, 2022, 47, 9, 1935-1956 (<https://doi.org/10.1080/03075079.2021.2018415>).
- [5] J. M. Ortiz-Lozano, A. Rua-Vieites, P. Bilbao-Calabuig, M. Casadesús-Fa, University student retention: Best time and data to identify undergraduate students at risk of dropout, *Innovations in Education and Teaching*

- International*, 2018, **57**(1), 74-85 (<https://doi.org/10.1080/14703297.2018.1502090>).
- [6] J. Dalgety, R. K. Coll, The influence of first-year chemistry students' learning experiences on their educational choices, *Assessment & Evaluation in Higher Education*, 2006, **31**(3), 303-328 (<https://doi.org/10.1080/02602930500352931>).
- [7] P. Vincent-Ruz, K. Binning, C. Schunn, J. Grabowski, The effect of math SAT on women's chemistry competency beliefs, *Chemistry Education Research and Practice*, 2018, **19**(1), 342-351 (<https://doi.org/10.1039/C7RP00137A>).
- [8] Y. Boz, S. Yerdelen-Damar, N. Aydemir, M. Aydemir, Investigating the relationships among students' self-efficacy beliefs, their perceptions of classroom learning environment, gender, and chemistry achievement through structural equation modelling, *Research in Science & Technology Education*, 2016, **34**(3), 307-324 (<https://doi.org/10.1080/02635143.2016.1174931>).
- [9] L. Stankov, J. Lee, W. Luo, D. J. Hogan, Confidence: A better predictor of academic achievement than self-efficacy, self-concept and anxiety? *Learning and Individual Differences*, 2012, **22**(6), 747-758 (<https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.05.013>).
- [10] J. R. Cordova, G. M. Sinatra, S. H. Jones, G. Taasoobshirazi, D. Lombardi, Confidence in prior knowledge, self-efficacy, interest and prior knowledge: Influences on conceptual change, *Contemporary Educational Psychology*, 2014, **39**(2), 164-174 (<https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2014.03.006>).
- [11] R. Grazziotin-Soares, C. Blue, R. Feraro, K. Tochor, T. M. Ardenghi, D. Curtis, D. M. Ardenghi, The interrelationship between confidence and correctness in a multiple-choice assessment: Pointing out misconceptions and assuring valuable questions, *BDJ Open*, 2021, **7**, 10 (<https://doi.org/10.1038/s41405-021-00067-4>).
- [12] L. Stankov, Noncognitive predictors of academic achievement and intelligence: An important role of self-confidence, *Personal and Individual Differences*, 2013, **60**, S37 (<https://doi.org/10.1016/j.paid.2013.07.090>).
- [13] M. M. Chiu, R. M. Klassen, Relations of mathematics self-concept and its calibration with mathematics achievement: Cultural differences among fifteen-year-olds in 34 countries, *Learning and Instruction*, 2010, **20**(1), 2-17 (<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2008.11.002>).
- [14] J. Dunlosky, K. Rawson, Overconfidence produces underachievement: Inaccurate self evaluations undermine students' learning and retention, *Learning and Instruction*, 2012, **22**(4), 271-280 (<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2011.08.003>).
- [15] L. Stankov, J. Lee, Confidence and cognitive test performance, *Journal of Education Psychology*, 2008, **100**(4), 961-976 (<https://doi.org/10.1037/a0012546>).
- [16] S. Beyer, E. M. Bowden, Gender differences in self-perceptions: Convergent evidence from three measures of accuracy and bias, *Personality and Social Psychology Bulletin*, 1997, **23**(2), 157-172 (<https://doi.org/10.1177/0146167297232005>).

- [17] L. Bol, D. J. Hacker, P. O'Shea, D. Allen, The influence of overt practice, achievement level, and explanatory style on calibration accuracy and performance, *The Journal of Experimental Education*, 2005, **73**(4), 269-290 (<https://doi.org/10.3200/JEXE.73.4.269-290>).
- [18] P. Juslin, A. Winman, H. Olsson, Naive empiricism and dogmatism in confidence research: A critical examination of the hard–easy effect, *Psychological Review*, 2000, **107**(2), 384-396 (<https://doi.org/10.1037/0033-295X.107.2.384>).
- [19] D. W. Griffin, A. Tversky, The weighing of evidence and the determinants of confidence, *Cognitive Psychology*, 1992, **24**(3), 411-435 ([https://doi.org/10.1016/0010-0285\(92\)90013-R](https://doi.org/10.1016/0010-0285(92)90013-R)).
- [20] A. Koriat, L. Sheffer, H. Ma'ayan, The intricate relationships between monitoring and control in metacognition: Lessons for the cause-and-effect relation between subjective experience and behavior, *Journal of Experimental Psychology: General*, 2006, **135**(1), 36-69 (<https://doi.org/10.1037/0096-3445.135.1.36>).
- [21] K. Y. Hoe, R. Subramaniam, On the prevalence of alternative conceptions on acid–base chemistry among secondary students: Insights from cognitive and confidence measures, *Chemical Education Research and Practice*, 2016, **17**(2), 263-282 (<https://doi.org/10.1039/C5RP00146C>).
- [22] B. Sreenivasulu, R. Subramaniam, University students' understanding of chemical thermodynamics, *International Journal of Science Education*, 2013, **35**(4), 601-635 (<https://doi.org/10.1080/09500693.2012.683460>).
- [23] D. R. Mulford, W. R. Robinson, An inventory for alternate conceptions among first semester general chemistry students, *Journal of Chemical Education*, 2002, **79**(6), 739-744 (<https://doi.org/10.1021/ed079p739>).
- [24] M. Schultz, G. A. Lawrie, C. H. Bailey, S. B. Bedford, T. R. Dargaville, G. O'Brien, R. Tasker, C. D. Thompson, M. Williams, A. H. Wright, Evaluation of diagnostic tools that tertiary teachers can apply to profile their students' conceptions, *International Journal of Science Education*, 2017, **39**(5), 565-586 (<https://doi.org/10.1080/09500693.2017.1296980>).
- [25] D. Hestenes, M. Wells, G. Swackhamer, Force concept inventory, *The Physics Teacher*, 1992, **30**(3), 141-158 (<https://doi.org/10.1119/1.2343497>).
- [26] C. Singh, D. Rosengrant, Multiple-choice test of energy and momentum concepts, *American Journal of Physics*, 2003, **71**(6), 607-617 (<https://doi.org/10.1119/1.1571832>).
- [27] K. S. Taber, The use of Cronbach's alpha when developing and reporting research instruments in science education, *Research in Science Education*, 2018, **48**(6), 1273-1296 (<https://doi.org/10.1007/s11165-016-9602-2>).

I contributi di J. N. Brønsted e di T. M. Lowry alla definizione di acidi e basi¹

Franco Calascibetta

Gruppo Nazionale di Fondamenti e Storia della Chimica

e-mail: franco.calascibetta@fondazione.uniroma1.it

Abstract. The two physical chemists Johannes Nicolaus Brønsted (1879-1947) and Thomas Martin Lowry (1874-1936) are usually jointly credited with the definition of acids and bases in terms of acceptors and donors of H^+ ions. Each on his behalf, in a completely independent manner, in the same year, 1923, they in fact published two articles from which the aforementioned definition originates. We aim to analyze the contents of these articles to illustrate the different paths taken by the two scientists to arrive at this result.

Keywords: definizioni di acidi e basi; Johannes N. Brønsted; Thomas M. Lowry

1. Introduzione

Nell'agosto del 1923, nel fascicolo numero 8 del volume 42 della rivista *Recueil des travaux chimiques des Pays-Bas* venne pubblicato un articolo, scritto dal chimico danese Johannes Nicolaus Brønsted dal titolo "*Einige Bemerkungen über den Begriff der Säuren und Basen*" (Alcune osservazioni sul concetto di acidi e basi) [1]. Qualche mese prima, nel gennaio dello stesso anno, sulla rivista inglese *Journal of the Society of Chemical Industry* era stato pubblicato un articolo intitolato "*The uniqueness of hydrogen*" (L'unicità dell'idrogeno) a firma del chimico inglese Thomas Martin Lowry [2]. Come è noto sono queste le due pubblicazioni che segnarono l'introduzione della teoria, secondo la quale acidi e basi sono specie chimiche in grado rispettivamente di cedere e accettare ioni idrogeno. I due scienziati operavano entrambi nel campo della chimica fisica, ma differenti furono i presupposti attraverso cui arrivarono indipendentemente a conclusioni analoghe. In questo studio cercherò di descrivere più dettagliatamente i percorsi che seguirono in queste loro ricerche.

¹ La conferenza tenuta dall'autore al Convegno della Divisione Didattica della Società Chimica Italiana aveva come tema un excursus storico sui concetti di acidi e basi. Dato il breve spazio qui a disposizione si è preferito soffermarci su una parte dei contenuti della conferenza.

2. Il contributo di Brønsted

Johannes Nicholas Brønsted era professore di chimica fisica all'Università di Copenhagen dal 1908. I suoi studi si erano ispirati inizialmente a quelli del connazionale Julius Thomsen (1826-1909) volti a determinare l'affinità chimica misurando il lavoro massimo di un processo chimico. Brønsted, però, invece di utilizzare determinazioni calorimetriche, si servì di misurazioni della forza elettromotrice per celle galvaniche. Da qui era passato a ricerche sulla determinazione delle costanti di affinità, sulla solubilità e sull'interazione specifica degli ioni [3]. Nell'ambito di esse, avrebbe poi pubblicato nel 1924, con Victor K. La Mer (1895-1966), un articolo sulla relazione tra i coefficienti di attività e la forza ionica della soluzione [4], relazione derivata teoricamente negli stessi anni da Peter Debye (1884-1965) ed Erich Hückel (1896-1980).

Fu questo interesse per l'elettrochimica che probabilmente condusse Brønsted a riflettere sulla teoria, fondata decenni prima da Svante Arrhenius (1859-1927). Lo portò, infatti, a proporre una rivisitazione dei concetti di acido e base rispetto a quanto fissato dal chimico svedese. Il suo scopo era indicato sin dal titolo e veniva chiaramente illustrato nel paragrafo introduttivo:

Dalla enunciazione della teoria della dissociazione elettrolitica da parte di Arrhenius, la definizione dominante di acidi e basi come sostanze che possono liberare ioni idrogeno o ioni idrossile in soluzione non è mai stata seriamente attaccata per quanto riguarda la definizione di acidi. Abbiamo mantenuto fermamente l'idea che il composto S^2 è un acido se viene parzialmente o completamente scisso in soluzione secondo il seguente schema (Figura 1).

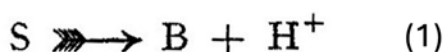


Figura 1. Relazione tra un acido e la sua base corrispondente secondo Brønsted [1]

L'articolo poi proseguiva ricordando che, dopo Arrhenius, c'erano stati timidi tentativi di definire in maniera diversa le basi, ad esempio da parte di Paul Pfeiffer (1875-1951) [5] e poi di Leonor Micaelis (1875-1949) [6], che aveva dato una prima parziale definizione di base come specie in grado di accettare ioni idrogeno, senza però sviluppare questo spunto. Quindi Brønsted così continuava:

Lo scopo del presente piccolo contributo è quello di mostrare i vantaggi che derivano da una definizione modificata di base. I vantaggi della definizione di base come sostanza in grado di legare uno ione

² Il simbolo S nasce ovviamente dal fatto che in tedesco (lingua in cui è scritto l'articolo originale) la parola per indicare acido è Säure.

idrogeno sono immediatamente evidenti. Nello schema (1), in cui è stabilito il concetto di acido (S), è ugualmente definito il concetto di base (B) e così il reciproco collegamento delle proprietà acide e basiche si mostra nel modo più chiaro e semplice.

Più oltre l'autore ribadiva:

Il risultato di queste considerazioni può essere formalizzato nel modo seguente: gli acidi e le basi sono sostanze capaci rispettivamente di cedere o di accettare ioni idrogeno. L'essenza di questo concetto di definizione di acidi e basi è data dall'espressione (1), in cui non si dice più niente delle proprietà di S e B. Ci riferiremo ad S e B, cioè ad un acido e ad una base che sono legati tra loro dalla relazione, come acidi e basi corrispondenti (*korresponderiende*).

Sottolineava quindi che gli acidi e le basi corrispondenti non potevano avere lo stesso stato di carica elettrica, portando alcuni esempi relativi alle coppie acido acetico/ione acetato, ione ammonio/ammoniaca, acido ossalico/ione ossalato (Figura 2).

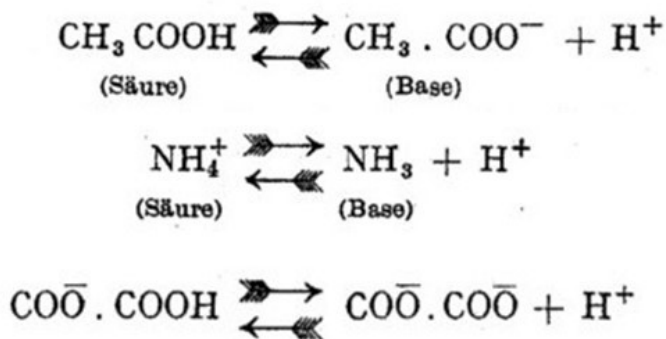


Figura 2. Esempi di coppie acido/base coniugate in Brønsted [1]

La trattazione di Brønsted così proseguiva:

L'equilibrio formulato nello schema (1) tra lo ione idrogeno e i corrispondenti acido e base può essere chiamato un equilibrio semplice acido-base. Mescolando due sistemi semplici, si ottiene un sistema doppio acido-base e un equilibrio che può essere formulato come segue (Figura 3).

Questo equilibrio include una serie di reazioni importanti come la neutralizzazione, l'idrolisi, le reazioni degli indicatori ecc.



Figura 3. Sistema doppio acido/base secondo Brønsted [1]

Nella chiusura, Brønsted sottolineava come lo ione OH^- non avesse una posizione particolare come portatore di proprietà basiche ed evidenziava l'analogia tra gli equilibri acido/base e quelli redox, a parte la carica opposta della specie scambiata nei due casi.

Come credo sia evidente, anche a cento anni di distanza l'articolo è perfettamente leggibile, al punto che le citazioni riportate sopra potrebbero tranquillamente essere confuse con passi di un qualsiasi manuale di chimica in uso nelle nostre scuole o nelle nostre università. L'attribuzione al chimico danese della definizione appare perciò assolutamente indiscutibile.

3. Il contributo di Lowry

Thomas Martin Lowry dopo la laurea in chimica nel 1896, divenne assistente del chimico organico Henry E. Armstrong (1848-1937). Nel 1913 fu nominato professore di chimica all'Università di Londra, andando poi a occupare la nuova cattedra di Chimica Fisica presso l'Università di Cambridge, dove rimase fino alla morte.

Durante i suoi anni con Armstrong, Lowry sviluppò un interesse per l'isomerismo dinamico, vale a dire, l'interconversione spontanea di due isomeri in soluzione che porta a una miscela di equilibrio dei due. Ciò lo osservò per la prima volta con gli isomeri ottici dei derivati della canfora, un fenomeno che chiamò "mutarotazione", poiché il percorso verso l'equilibrio era correlato con una variazione continua nella rotazione ottica della soluzione.

Dopo il suo trasferimento a Cambridge, Lowry fu coinvolto nella seconda fase dello sviluppo della moderna teoria elettronica della chimica organica, basata sull'applicazione delle idee di Gilbert N. Lewis (1875-1946) sul legame chimico come dovuto alla condivisione di coppie di elettroni [7].

Un sottoprodotto dell'interesse di Lowry per la nuova teoria elettronica della chimica organica lo portò all'interpretazione di un tipo di isomerismo dinamico, che chiamò "prototropia", in cui i due isomeri in equilibrio venivano interconvertiti dalla migrazione di un protone all'interno di una molecola da una posizione a un'altra. Poiché i siti di attacco del protone corrispondevano a una varietà di gruppi funzionali, ciò lo indusse a mettere in discussione l'identificazione della basicità con il solo OH^- , ed è da qui che probabilmente nacque il suo interesse per una ridefinizione di acidi e basi.

Se andiamo ora a esaminare brevemente l'articolo che egli pubblicò all'inizio del 1923, in base al quale nasce il riconoscimento del suo ruolo in tale ridefinizione, notiamo che il titolo "*L'unicità dell'idrogeno*", al contrario di quello della

pubblicazione di Brønsted, esaminata nel precedente paragrafo, non è così immediatamente riconducibile agli equilibri acido-base. Le prime righe dell'articolo di Lowry permettono di capire meglio le considerazioni dell'autore:

Più di un autore ha recentemente speso le sue energie e messo alla prova la pazienza dei suoi lettori, discutendo la questione se l'idrogeno debba essere considerato come un omologo inferiore dei metalli alcalini univalenti o degli alogeni univalenti.

Questo problema, che può essere paragonato a quello ancora più antico, se l'idrogeno liquido dovesse rivelarsi un metallo o una paraffina, era di un certo interesse 50 anni fa, quando la teoria delle ottave dominava la classificazione periodica degli elementi. È curioso che sopravviva ancora in un'epoca in cui l'esistenza dei periodi con 2, 8, 18 e 32 elementi è stata così chiaramente stabilita. In queste circostanze le colonne della tavola di Mendeleev sono diventate un'ossatura puramente convenzionale, mediante la quale è possibile risparmiare spazio, e diminuire lo sforzo della memoria ... Questa forma convenzionale della tavola periodica sembra, tuttavia, occupare un posto particolarmente fermo nella mentalità dei chimici, in considerazione del fatto che problemi come quello sopra suggerito sono ancora considerati degni di considerazione.

Una visione molto più chiara della relazione tra l'idrogeno e gli altri elementi univalenti si ottiene mediante la teoria elettronica della valenza enunciata da Lewis. A Lewis spetta il merito di fornire per la prima volta un quadro chiaro (insieme ad una spiegazione plausibile) di due distinti tipi di affinità chimica, la cui esistenza era stata riconosciuta in modo confuso fin da quasi cent'anni or sono.

Le argomentazioni dell'autore vanno innanzi tutto contestualizzate al periodo che stiamo esaminando, in cui la tavola periodica cessava di essere organizzata solo in base alle proprietà chimiche e diventava soprattutto un riflesso della configurazione elettronica esterna degli elementi. Notiamo inoltre l'immediato richiamo alla teoria del legame di Lewis, di cui Lowry fu fin da subito convinto sostenitore.

Lowry continuava a far riferimento a Lewis nel proseguire l'esposizione delle proprie idee:

Secondo la teoria dell'ottetto di Lewis, gli elementi devono la loro valenza alla forza potente ma misteriosa che li spinge a formare gruppi di 2, 8, 18 o 32 elettroni. Questa forza è evidentemente identica a ciò che è stata descritta per molte generazioni come "affinità chimica", poiché è questo che determina la combinazione chimica tra gli atomi. La formazione dei gruppi stabili di elettroni, che nel caso degli elementi dal carbonio al calcio sono solitamente ottetti, può essere effettuata in due modi principali:

(i) trasferendo elettroni da un atomo all'altro, ad es. da un atomo che contiene troppi elettroni rispetto a uno che ne contiene troppo pochi; o
(ii) condividendo elettroni tra atomi adiacenti, in modo che due atomi entrambi carenti di elettroni possano raggiungere una condizione di completezza che nessuno dei due potrebbe raggiungere da solo.

Nella maggior parte dei casi questi due tipi di valenza possono essere distinti in modo piuttosto netto, come nei casi tipici di $\text{Na}^+ \text{Cl}^-$ e $\text{Cl}-\text{Cl}$. Nel caso degli alogeni può sorgere la domanda se la dissociazione della molecola (ad esempio del cloro nella formazione di $\text{ClCH}_2-\text{CH}_2-\text{Cl}$ da C_2H_4 e Cl_2) avvenga simmetricamente, dando origine a due atomi neutri portanti ciascuno un setetto di elettroni oppure generi un atomo che trasporta un otetto completo (e quindi caricato negativamente) e un secondo che trasporta solo un sestetto di elettroni (e quindi caricato positivamente).

Ma finché non avviene effettivamente la divisione della molecola, non vi è alcuna ragione per cui non debba persistere la simmetria della molecola e con essa il carattere completamente apolare del legame tra i 2 atomi di cloro.

Rispetto a quanto detto, l'idrogeno meritava però una considerazione particolare:

È proprio qui che diventa evidente l'unicità dell'idrogeno, poiché in questo elemento i due tipi di valenza non possono essere distinti in modo così semplice e facile. Pertanto, nel caso dell'acido cloridrico, la formula elettronica della molecola è: $\text{Cl}:\text{H}$, la formula elettronica dell'acido ionizzato è: $\text{Cl}:\text{H}^+$, dove lo ione idrogeno può essere considerato provvisoriamente come un semplice nucleo nudo: un singolo protone che non trasporta alcun elettrone né nel nucleo né all'esterno. Quando lo ione idrogeno è lontano dallo ione cloro, le forze tra loro sono evidentemente elettrostatiche e di carattere polare, e l'affinità tra loro è chiaramente dovuta all'elettrovalenza. Ma quando i due atomi sono vicini, possono essere considerati come se condividessero una coppia di elettroni e quindi uniti da una covalenza ... Il comportamento unico dell'idrogeno è dovuto al fatto che una configurazione stabile può essere ottenuta sia senza elettroni, come nello ione idrogeno, sia con due elettroni, come nella molecola di idrogeno $\text{H}:\text{H}$.

Lowry proseguiva la trattazione mostrando come nelle molecole l'idrogeno poteva trovarsi in situazioni intermedie tra i due stati suddetti³ e, quando acquisiva lo stato di

³ Credo sia inutile ricordare come l'elettronegatività, modernamente intesa, e l'introduzione per essa di una scala numerica sarebbero state per la prima volta introdotte da Linus Pauling (1901-1994) nel 1932 [8].



Figura 5. Il comportamento basico dell'ammoniaca secondo Lowry [2]

Se la base è sufficientemente forte, può non solo accettare i nuclei di idrogeno liberi che sono stati allontanati dalle molecole di un acido, ma può anche rubarli a composti in cui sono trattenuti solo debolmente, ad esempio dall'acqua, come nella reazione (Figura 6):



Figura 6. Reazione tra ammoniaca e acqua secondo Lowry [2]

In questo caso la forza della base si manifesta con la liberazione di ioni idrossile ... Lo ione idrossile è esso stesso una base forte, poiché è in grado di accettare ioni idrogeno. La combinazione dello ione idrogeno con l'idrossile è, tuttavia, quasi limitata alle soluzioni acquose, mentre la neutralizzazione mediante accettazione di un nucleo di idrogeno può avvenire in qualsiasi solvente in cui si possano produrre ioni idrogeno.

4. Brevi riflessioni conclusive

Per gli scopi espliciti del suo articolo e per tutte le argomentazioni in esso contenute, Brønsted appare certamente il principale padre della moderna definizione di acidi e basi, avendo sviluppato con chiarezza e completato alcune riflessioni preliminari di L. Michaelis. Tuttavia, anche se nell'articolo di Lowry le reazioni acido/base costituivano in effetti un corollario rispetto ai temi centrali del suo articolo, le considerazioni finali, che abbiamo riportato sopra, aggiungono qualcosa che in Brønsted non compare esplicitamente. Ciò, insieme alla non del tutto trascurabile precedenza temporale, giustifica in definitiva la doppia attribuzione della teoria ai due scienziati, malgrado le riserve che in passato furono sollevate rispetto al ruolo di Lowry [9]. C'è da dire che storicamente né Brønsted né Lowry apparvero in seguito molto interessati a sottolineare questo loro merito, avendo nella loro attività di scienziati dedicato maggiore attenzione ad altri temi e ottenuto risultati, da entrambi ritenuti più significativi. Alla fine, però, e questo vale in definitiva per tutti e due, è la definizione di acidi e basi il motivo per il quale ancor oggi essi vengono generalmente ricordati.

Riferimenti

- [1] J. N. Brønsted, *Recl. Trav. Chim. Pays-Bas*, 1923, **42**, 718.
- [2] T. M. Lowry, *J. Soc. Chem. Ind.*, 1923, **42**, 43.
- [3] C. Coulston Gillispie et al., *Dictionary of scientific biography*, Scribner's Sons, New York 1970, Vol. 2, 498-499.
- [4] J. N. Brønsted, V. K. la Mer, *J. Am. Chem. Soc.*, 1924, **46**, 555.
- [5] P. Pfeiffer, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.*, 1907, **40**, 4036.
- [6] L. Michaelis, *Die Wasserstoffionenkonzentration*, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1922, p. 14.
- [7] W. B. Jensen, *Educación Química*, 2016, **27**, 175.
- [8] L. Pauling, *J. Am. Chem. Soc.*, 1932, **54**, 3570.
- [9] R. P. Bell, *The Proton in Chemistry*, Cornell University, New York, 1973, p. 4.

Il simbolismo chimico come interpretazione unificante del mondo materiale scientifico moderno

Giovanni Villani

CNR - Istituto di Chimica dei Composti OrganoMetallici, (UOS Pisa)

e-mail: villani@pi.iccom.cnr.it

Abstract. Galileo's scientific method, Galileo himself tells us, is built on two pillars: *sensate esperienze* and *dimostrazioni necessarie*. In modern terms, experiments and mathematical formalization. These two pillars played a fundamental epistemological/scientific role and demarcated natural science from philosophical interpretations at the birth of modern science. The other side of the coin of the Galilean cultural revolution was that this definition of science placed not only all the human and social sciences, but also the entire chemical-biological-medical scientific area outside the scientific boundary. This last area, over a three-century long journey, has built a third scientific pillar centered on chemical symbolism, essential for the modern definition of scientificity. This process of scientific "reappropriation" occurred in the animate, inanimate and in the world of artificial substances. Today we can certainly say that chemistry is the preferred language for a scientific description of matter, whether inanimate or animate, whether natural or artificial. It is to the example of chemical symbolism that the human and social sciences should refer for a complete reunification with the natural sciences.

Keywords: Rivoluzione galileiana; scientificità; linguaggio chimico

Quando alla metà del XVII secolo si costruirono le basi della scienza moderna con il contributo determinante di Galileo, questa rivoluzione culturale, prima che filosofico/scientifica, portò all'individuazione del metodo scientifico, quello che ancora oggi è da molti ritenuto il discriminante tra cosa sia scientifico e cosa non lo sia. Molte potrebbero essere le citazioni adatte a illustrare la nuova visione del mondo della nascente scienza moderna. Quella più usata, e che utilizzerò anch'io, è la frase galileiana [1]: "Stante, dunque, ciò, mi par che nelle dispute di problemi naturali non si dovrebbe cominciare dalle autorità di luoghi delle Scritture, ma dalle sensate esperienze e dalle dimostrazioni necessarie." Unanimemente, per "sensate esperienze" si è inteso la parte sperimentale della scienza moderna e per "dimostrazioni necessarie" la sua formalizzazione matematica. Nel Saggiatore, infatti, Galileo ci aveva detto [2]: "La filosofia naturale è scritta in

questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi, io dico l'universo, ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua e conoscer i caratteri nei quali è scritto. Egli 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 labirinto."

Con questa rivoluzione galileiana nascevano le moderne astronomia, meccanica, fisica in generale; come altra faccia della medaglia, tuttavia, si metteva fuori dalla scientificità le discipline che noi oggi chiamiamo chimica, biologia, medicina, ecc. L'idea di Galileo di scienza si affermò prepotentemente, come evidenzia la citazione di Kant [3] che, un secolo dopo Galileo, affermava, usando proprio l'esempio della chimica, che in ogni dottrina particolare della natura si poteva trovare tanta scienza propriamente detta, quanta era la matematica che vi si trovava; la chimica, pertanto, non poteva divenire nient'altro che una dottrina sperimentale, mai una vera e propria scienza; i suoi principi, infatti, erano soltanto empirici e, essendo inadeguati all'applicazione della matematica, non rendevano affatto comprensibili scientificamente i fenomeni chimici.

Nei secoli successivi, l'area scientifica che va dalla chimica alla medica ha "lottato" per rientrare nel criterio di scientificità mostrando, da un lato, di potere anch'essa usare gli esperimenti e la formalizzazione matematica e, dall'altro, costruendo una sua specifica scientificità. Non è questo il luogo dove mostrare in dettaglio il percorso storico di affrancamento della chimica e delle altre discipline scientifiche dall'idea galileiana, ma vogliamo qui solo rivendicarne la conclusione. Come ho spiegato altrove [4], parafrasando Galileo, il mondo materiale scientifico odierno è scritto principalmente in linguaggio chimico e i suoi caratteri sono atomi, molecole e macromolecole, nel mondo microscopico, e sostanze chimiche, in quello macroscopico. Senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro labirinto.

È il linguaggio chimico che ha reso scientifica la chimica odierna, sebbene in essa non vi sia tutta quella matematica che richiedevano essenziale sia Galileo sia Kant. È sempre il linguaggio chimico il comune denominatore delle discipline scientifiche che, partendo dall'analisi degli esseri viventi in generale, e l'uomo in particolare, tramite il mondo microscopico e macroscopico della chimica, ha reso scientifiche la biologia, la farmacologia e la medicina. Inoltre, è sempre il linguaggio chimico che descrivendo e analizzando gli oggetti inanimati, come le rocce o l'intero pianeta Terra, ha reso scientifica la geologia e la climatologia. Questo risultato si può considerare abbastanza noto ed evidente, ma, dato che raramente viene evidenziato, vediamo qualche esempio.

Come detto, la chimica odierna svolge un ruolo essenziale in biologia, farmacologia e medicina. Non è facile pensare a una biologia moderna che faccia a meno delle molecole e macromolecole nella spiegazione del "funzionamento" sia della cellula sia dell'organismo. Migliaia di citazioni potrebbero supportare

questa tesi largamente diffusa nel mondo scientifico. Ne utilizziamo una per tutte: “La nostra comprensione della biosfera deve essere chimica. La chimica organica non è un palcoscenico casuale sul quale i principi astratti della vita mettono in scena uno spettacolo che potrebbe essere rappresentato altrove. La chimica è importante nei dettagli, perché è importante in linea di principio. Alcune delle fondamentali fonti di stabilità e complessità della vita non sarebbero esprimibili in nessun altro sistema. L’ecosistema è il ponte che collega la geochimica alla vita e trasporta gran parte di ciò che è deterministico e necessario nell’ordine metabolico. Le specie emergono ulteriormente nel dominio del caso e sono secondarie. Pertanto, non abbiamo mai bisogno di chiamare l’ecosistema un ‘super-organismo’ per riconoscerne l’integrità, perché lo riconosciamo come in qualche modo precedente agli organismi” [5].

La “molecolarizzazione”¹ degli organismi viventi è stato il tratto saliente della spiegazione biologica del XX secolo. Non si vuole qui assumere che “la vita non è altro che chimica”, ma tale disciplina è il principale punto di riferimento per “leggere” il vivente, la prospettiva privilegiata in cui oggi viene interpretato il vivente [4]. La vita di un organismo, infatti, non si esaurisce nelle relazioni con l’interno (le sostanze chimiche costituenti) e con l’esterno (l’ambiente chimico) in cui esso vive, ma senza di essi non è facile studiarlo scientificamente. È questo il motivo per cui per “riparare” un organismo in farmacologia si ricorre a specifiche sostanze chimiche (principi attivi dei farmaci) e/o a cocktail di esse (Figura 1).



Figura 1. Esempi di farmaci

¹ Vedere, per esempio, Ariane Dröschner, *Storia della biologia*, Carocci, Roma, 2008, pp. 162-164.

Esistono anche, nel caso della farmacologia e della medicina, possibili alternative. Terapie elettriche e magnetiche, per esempio, affiancano quelle farmacologiche chimiche nel trattamento di malattie, ma è indubbio che l'approccio chimico è quello predominante. Inoltre, oggi in medicina si sta sviluppando una medicina molecolare che ha la pretesa di "adattarsi" alle specifiche chimiche delle singole persone e che, quindi, vorrebbe aprire una nuova area culturale, oltre che scientifica, nella cura dei pazienti e nella generale pratica medica.

Come abbiamo detto, le sostanze chimiche svolgono un ruolo essenziale anche nella spiegazione dell'inanimato. Possiamo anzi dire che una delle prime pratiche chimiche dell'antichità è stata quella metallurgica, pratica così importante da aver dato il nome alle epoche storiche del passato (età del rame, del bronzo e del ferro). Le rocce e l'intera crosta terrestre, infatti, sono descrivibili tramite la loro composizione chimica e le loro proprietà ad essa ricollegata (Figura 2). Lo stesso discorso vale per l'atmosfera e per i molti inquinanti in essa presenti.

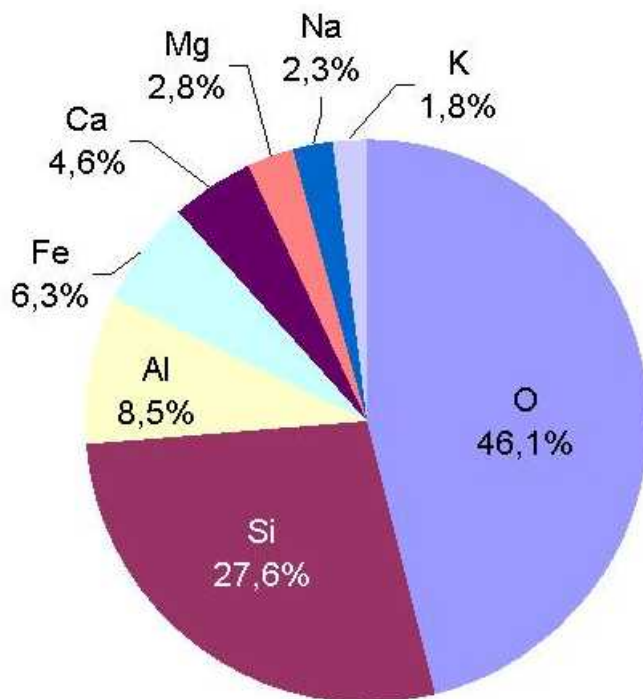


Figura 2. Composizione chimica media della crosta terrestre

Non solo le sostanze naturali sono "chimiche". Anche i materiali sintetici, come le plastiche che costituiscono tanti nostri manufatti e che hanno cambiato, nel bene e nel male, il volto del nostro pianeta, sono "formati" e "descritti" mediante la chimica (Figura 3). La chimica, infatti, non soltanto sa "leggere" il mondo, ma sa anche "scriverlo" [6].

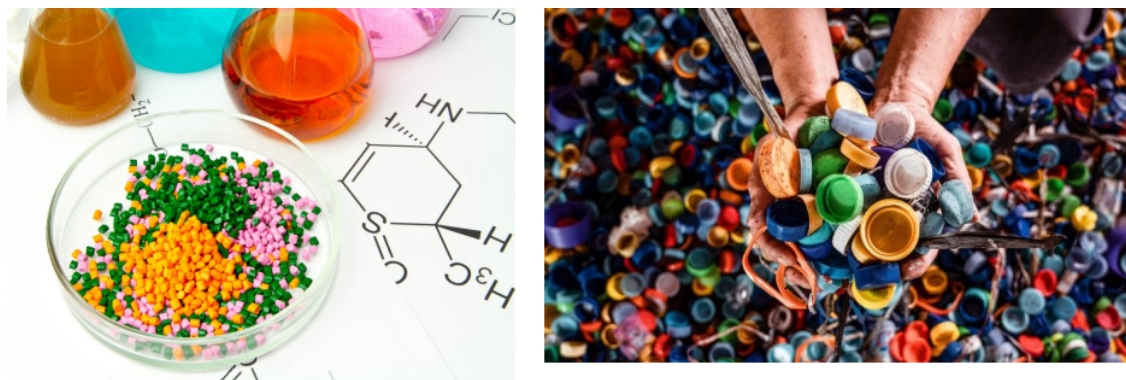


Figura 3. La chimica e le plastiche

Veniamo ora ad analizzare più in dettaglio gli aspetti salienti della spiegazione scientifica proposta dalla chimica [7] sia al suo interno sia nelle discipline scientifiche che poggiano su di essa.

La prima cosa da notare della spiegazione chimica è la particolarità di tale spiegazione di rifarsi al piano microscopico (molecole, principalmente) per comprendere delle proprietà di sostanze macroscopiche (sostanze chimiche). Il connettere e spiegare le proprietà macroscopiche delle sostanze chimiche, con l'aiuto del concetto di composizione/struttura nel piano microscopico, fanno sì che i fatti macroscopici siano considerati spiegati quando sono ricondotti a particolari "aggregati" atomici, dai chimici chiamate molecole, che sono riconosciute e individuate in quanto è lo stesso modello esplicativo che le induce a cercarle.

La compresenza di questi due piani è tipica di tutta la chimica. Tale compresenza, tuttavia, oltre a essere un evidente fattore di ricchezza, può generare delle confusioni a livello didattico. Una cosa essenziale da chiarire, in qualunque corso di chimica (scolastici, ovviamente, e persino in quelli universitari), è che, sebbene esista una corrispondenza praticamente biunivoca tra le molecole (microscopiche) e i composti chimici (macroscopici), non esiste nessuna relazione biunivoca tra le proprietà molecolari e quelle dei composti chimici: una proprietà macroscopica è, in genere, legata a più proprietà microscopiche e, inoltre, per molte proprietà macroscopiche non esiste una controparte molecolare. Alcune proprietà macroscopiche, infatti, sono correlabili non alle proprietà delle singole molecole, ma a quelle dell'insieme di molecole. Sono, pertanto, le interazioni intermolecolari a spiegare queste grandezze macroscopiche. Ciò ha come conseguenza che una sostanza chimica (identiche proprietà molecolari) in differenti stati fisici (differenti interazioni molecolari) ha proprietà macroscopiche molto diverse. Questo non è il solo possibile caso da evidenziare: anche le differenti forme cristalline della stessa sostanza, ad esempio, possono svolgere lo stesso scopo didattico.

La spiegazione di tipo chimico è un modo generale di spiegazione che possiamo ricollegare alla ricerca del *generale*. Nelle spiegazioni scientifiche, un fatto singolo, unico, va sempre connesso ad altri per essere capito. La connessione nel caso della chimica avviene per inclusione dei singoli in “gruppi”, creati tramite l'evidenziare proprietà collettive e collegati a concetti chimici importanti. L'esempio degli acidi e delle basi, degli ossidanti e dei riducenti sono i più evidenti, ma non i soli possibili. Il raggruppare le specifiche sostanze chimiche in “classi” non annulla, tuttavia, le individualità dei singoli, ma consente di “rapportare” le proprietà individuali e di “misurale”. L'acido acetico, o qualunque altro acido specifico, può essere usato per chiarire un tale aspetto: questa sostanza chimica, infatti, viene designata con due termini, “acido” e “acetico”, proprio per mettere in evidenza sia la funzione generale sia quella individuale.

Un altro aspetto importante della spiegazione chimica è quello “contestuale”. Una sostanza/molecola non è né acida né basica, né ossidante né riducente *in sé*, ma si “comporta” in specifici ambienti da acido, da base, da ossidante o da riducente. Le proprietà di una specie chimica sono, quindi, sempre legate sia ai costituenti sia all'ambiente in cui opera. Noi abbiamo collegato questo duplice aspetto ai livelli di complessità della chimica che è una scienza intrinsecamente sistemica [7-10].

L'approccio di tipo chimico è lo stesso che si usa nello studio dei fatti umani e sociali. Anche in questo caso, ogni azione è unica ed è compiuta da un soggetto unico. Tuttavia, se ci si fermasse a ciò non si potrebbe “spiegare” nessun comportamento umano, né singolo né collettivo. Solo raggruppando gli individui e gli enti sociali strutturati (classi, popoli, nazioni, ecc.) e utilizzando poi le proprietà di questi insiemi, insomma un approccio di spiegazione di tipo chimico, si possono interpretare le azioni di tali enti. Solo tenendo in conto il “contesto” in cui operano gli enti umani e sociali si possono capire le loro azioni. La conseguenza di ciò è che la chimica, che da sempre usa un tipo di spiegazione “per enti e relative proprietà in specifici contesti”, può rappresentare un modello di spiegazione per le scienze umane e sociali, molto più della fisica.

Riferimenti

- [1] G. Galilei, Lettere (1610), XIV - *A madama Cristina di Lorena granduchessa di Toscana* ([https://it.wikisource.org/wiki/Lettere_\(Galileo\)/XIV](https://it.wikisource.org/wiki/Lettere_(Galileo)/XIV)).
- [2] G. Galilei, *Il Saggiatore, nel quale con bilancia esquisita e giusta si ponderano le cose contenute nella Libra astronomica e filosofica di Lotario Sarsi Sigensano, scritto in forma di lettera all'ill.mo et rever.mo mons.re d. Virginio Cesarini acc.o linceo m.o di camera di N.S., Giacomo Mascardi, Roma (1623)*.
- [3] E. Bastianon, *Kant e il programma kantiano per la costruzione di un sistema trascendentale dinamico e complesso: il ruolo della chimica* (https://www.academia.edu/13105354/Kant_e_il_programma_di_ricerca_kantiano_per_la_costruzione_di_un_sistema_trascendentale_dinamico_e_complesso_il_ruolo_della_chimica).

- [4] G. Villani, *L'interpretazione chimica del vivente. Fondamenti sistemici delle scienze della vita*, CLUEB, Bologna, 2023, Quarta di copertina.
- [5] E. Smith, H. J. Morowitz, *The origin and nature of life on Earth: the emergence of the fourth geosphere*, Cambridge University Press, New York, 2016, xxii Preface.
- [6] V. Balzani, M. Venturi, *Chimica! Leggere e scrivere il libro della natura*, Scienza Express, Trieste, 2012.
- [7] G. Villani, *Complesso e organizzato. Sistemi strutturati in fisica, chimica, biologia ed oltre*, FrancoAngeli, Milano, 2008, Capitolo 3.
- [8] G. Villani, *La chiave del mondo. Dalla filosofia alla scienza: l'onnipotenza delle molecole*, Cuen, Napoli, 2001.
- [9] 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 L. Urbani Ulivi), Il Mulino, Bologna, 2010.
- [10] G. Villani, *Chemistry: A systemic complexity science*, Pisa University Press, Pisa, 2017.

Il ruolo dell'entropia come descrittore fenomenologico delle reazioni chimiche

Alessandro Motta

Dipartimento di Chimica, Università di Roma "La Sapienza"

e-mail: alessandro.motta@uniroma1.it

Abstract. The presentation of the second law of thermodynamics in high school and early university teachings often leaves students with a sense of elusive abstraction, condensed into the expression "entropy measures disorder". This could be avoided by treating entropy more specifically as a property derived from the analysis of heat exchanges between the system and the surroundings. In this contest, starting from a modern reinterpretation of Carnot's work on the efficiency of heat engines, it would be helpful to delve into the analytical derivation of entropy associated with an isothermal expansion process, demonstrating how such a process is intimately related to the thermodynamic explanation of chemical equilibrium. Furthermore, it would be beneficial to explore the historical motivations that led to the formulation of the third principle to clarify its chemical importance in deriving reaction entropy.

Keywords: Carnot; entropia; equilibrio; terzo principio

1. Introduzione

Spiegare il concetto di entropia agli studenti che frequentano gli ultimi anni della scuola secondaria di secondo grado, come pure a quelli che si affacciano all'istruzione superiore, rappresenta un obiettivo arduo da raggiungere. Nella maggior parte dei casi, gli sforzi didattici atti a districare le innumerevoli sfaccettature dell'entropia vengono distillate in una risposta piuttosto vuota e demoralizzante: "l'entropia misura il disordine". Questo, probabilmente, è dovuto alla difficoltà di coniugare gli aspetti fenomenologici legati al suo utilizzo pratico con la sua trattazione probabilistica a livello microscopico.

Di fatto, per capire a fondo l'entropia non solo dobbiamo sforzarci di immaginare cosa fanno atomi e molecole, ma per di più dobbiamo applicare formule che sono più vicine a quelle che regolano la probabilità nei giochi con i dadi, piuttosto che quelle che determinano la meccanica di Newton. Inoltre, la pro-

cedura per il calcolo quantitativo dell'entropia in esempi molto semplici, che spesso coinvolgono la distribuzione di qualche molecola tra due scatole, non è applicabile a casi macroscopici come transizioni di fase, o reazioni chimiche vere e proprie.

A conti fatti, il tentativo di derivare quantitativamente l'entropia dall'approccio microscopico rischia di rimanere scollegato dalla realtà, relegando questa funzione a quella cosa che misura il disordine. Da un tale punto di vista, la valutazione "sperimentale" dell'entropia in alcuni casi semplici, ma particolarmente importanti, aiuterebbe i ragazzi a rendere familiare e utile un concetto spesso limitato al mondo delle astrazioni.

In pratica, si dovrebbe rimarcare che l'entropia rappresenta uno degli strumenti (forse il più importante) presenti dentro la cassetta degli attrezzi del chimico.

In questa prospettiva, tre sono gli aspetti che verranno rimarcati qui di seguito. Il primo riguarda il contesto storico in cui è stata individuata l'entropia, sottolineando l'importanza didattica del lavoro di Carnot. Il secondo riguarda l'applicazione pratica di un calcolo di entropia associato all'espansione isoterma di un gas, semplice trasformazione, ma fondamentale per la comprensione degli equilibri chimici. Il terzo aspetto riguarda il contesto storico in cui è stato enunciato il terzo principio della Termodinamica per rimarcare come l'esigenza di trovare un modo di calcolare la variazione di entropia associata alle reazioni chimiche abbia condotto alla sua enunciazione.

2. La prospettiva di Carnot in chiave moderna

Se la direzione tracciata prevede l'utilizzo pratico dell'entropia, concepita come proprietà misurabile dei sistemi, allora il miglior punto di partenza è rappresentato da una rilettura in chiave moderna dello scritto principale di Sadi Carnot: "Réflexion sur la puissance motrice du feu et sur le machines propres à développer cette puissance" [1]. In maniera molto semplificata, la chiave moderna consiste nel tradurre la parola "calorico", spesso usata da Carnot nel suo scritto, con la parola entropia. Infatti, sebbene il contesto teorico entro cui si muove Carnot sia concettualmente errato (la teoria del calorico non resisterà ancora a lungo dopo la morte di Carnot), le caratteristiche del calorico che Carnot utilizza per esplorare l'efficienza delle macchine termiche, rendono il calorico irresistibilmente simile al moderno concetto di entropia [2, 3].

2.1. L'entropia come proprietà

La prima fondamentale caratteristica che Carnot assegna al suo calorico, cioè alla nostra entropia, è che non si consuma durante la produzione di lavoro in condizioni ideali. Visto che la macchina è per definizione un dispositivo che funziona ciclicamente, significa che, alla fine di ogni ciclo di funzionamento (ideale), la quantità di entropia rimane invariata. Tanta ne entra e tanta ne esce. In chiave moderna

diremmo che essa è una funzione di stato e, in quanto tale, possiamo considerarla come una proprietà qualificante dei sistemi: esattamente come la pressione, la temperatura e il volume, è possibile assegnare un valore di entropia ai sistemi.

Ritengo che questo sia un punto fondamentale che definisce come si vuole fare intendere l'entropia agli studenti, cioè come una proprietà qualificante dei sistemi. Qui, emerge il primo aspetto "misterioso" dell'entropia. Mentre le variabili come la pressione, il volume e la temperatura possono essere assegnate in maniera assoluta ai sistemi, non è possibile praticare una misura diretta di entropia dei sistemi, ma possiamo conoscere solo la sua variazione durante una trasformazione. Questa difficoltà, in realtà non è prerogativa dell'entropia, ma è condivisa con un altro concetto particolarmente sfuggente che si ritrova nello studio della Termodinamica, l'energia. Il fatto, forse, che rende l'entropia più sfuggente dell'energia è che essa si rende manifesta come proprietà dei sistemi solo se la trasformazione avviene in condizioni di idealità (reversibilità), mentre l'energia, o meglio la sua variazione, può essere misurata in qualsiasi tipo di trasformazione, semplicemente misurando il calore e il lavoro implicato nella trasformazione stessa. Ciò la rende più facilmente accessibile rispetto all'entropia.

Cosa intendere per condizioni di idealità è ben spiegato nello scritto di Carnot che introduce i concetti moderni di processo quasi statico, di reversibilità e di equilibrio. A questo proposito è necessario puntualizzare un aspetto che può indurre in equivoco. Se la trasformazione non avvenisse in condizioni di idealità o di reversibilità, non saremmo più in grado di fare una misura diretta della variazione di entropia. E se non è misurabile, allora esiste? Ovviamente sì. In questo caso, però, è necessario progettare un esperimento analogo in cui gli stati iniziali e finali del sistema siano gli stessi, ma il cammino con cui avviene la trasformazione sia ideale. Così facendo possiamo misurare la variazione di entropia e, visto che essa è una funzione di stato (cioè dipende solo dallo stato iniziale e dallo stato finale), tale variazione sarà la stessa della trasformazione irreversibile dove non eravamo in grado di misurarla direttamente.

2.2. Emerge una nuova funzione di stato

Una volta che sono state definite le condizioni sperimentali necessarie per poter fare una misura di variazione di entropia bisogna specificare come fare tale misura. Ciò viene dedotto in maniera lineare dal ragionamento di Carnot fatto per dedurre l'efficienza (η) massima di una macchina termica, cioè di una macchina in grado di compiere lavoro (L), grazie ad un flusso di calore (Q_c) proveniente da una sorgente "calda" (T_c) verso una sorgente "fredda" (T_f), dove arriva parte del calore (Q_f). Dalla definizione di efficienza (equazione 1):

$$\eta = \frac{L}{Q_c} = \frac{Q_c - Q_f}{Q_c} = 1 - \frac{Q_f}{Q_c} \quad (1)$$

e dalla constatazione che l'efficienza massima (ottenuta in condizioni di idealità) dipende solo dalla differenza di temperatura (equazione 2)

$$\eta_{max} = \left(1 - \frac{T_f}{T_c}\right) \quad (2)$$

emerge che in condizioni di idealità la quantità $(Q/T)_{rev}$, alla fine di un ciclo di funzionamento della macchina termica, è zero (equazione 3):

$$\left(\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f}\right)_{rev} = 0 \rightarrow \Delta S = 0 \quad (3)$$

Quest'ultima relazione può essere interpretata dicendo che $(Q/T)_{rev}$ misura la variazione di una funzione di stato (una macchina funziona in modo ciclico e alla fine di ogni ciclo lo stato iniziale coincide con quello finale). Tale funzione di stato è stata chiamata entropia (S) e $(Q/T)_{rev}$ rappresenta proprio il modo di misurare la sua variazione (ΔS). Sebbene queste considerazioni possano essere dedotte direttamente dalla lettura dello scritto di Carnot, il battesimo di questa proprietà risale al 1867, ad opera di Clausius [4]:

We might call S the *transformational content* of the body, just as we termed the magnitude U its *thermal and ergonal content*. [...] I propose to call the magnitude S the *entropy* of the body, from the Greek word *tropη*, transformation. I have intentionally formed the word *entropy* so as to be as similar as possible to the word *energy*.

Clausius ricerca un'assonanza con la parola energia (U), per sottolineare la corresponsabilità delle due grandezze nel caratterizzare una trasformazione. Alla definizione di queste due grandezze corrispondono il primo e il secondo principio della Termodinamica. Il primo è un *principio di conservazione* e afferma che l'energia non si crea e non si distrugge ($\Delta U_{uni} = 0$), può solo trasformarsi come lavoro e calore, mentre il secondo possiamo considerarlo un *principio di semi conservazione* visto che in sostanza afferma che l'entropia dell'universo non si distrugge ($\Delta S_{uni} \geq 0$), e ci offre la possibilità di conoscere la freccia del tempo, cioè di prevedere da semplici calcoli se una trasformazione sarà spontanea oppure no.

3. Misura della variazione di entropia negli equilibri chimici

I concetti sinora esposti risultano già sufficienti per applicare le misurazioni di entropia alla vasta fenomenologia delle reazioni chimiche. Da questo punto di vista ritengo che ci sia un caso di particolare importanza. Mi riferisco all'entropia associata a un'espansione isoterma che è strettamente correlata alla trattazione dell'equilibrio chimico sia in fase gassosa che in soluzione.

3.1. Espansione isoterma di un gas: calcolo semplice, ma fondamentale

Questa trasformazione descrive banalmente cosa succede quando a un gas offriamo più spazio da occupare (e quando vi è un buon contatto termico con l'ambiente). Da un punto di vista chimico è una trasformazione molto importante perché avviene sempre durante una reazione in fase gassosa. Infatti, i prodotti formati (e i reagenti consumati) tendono a occupare tutto lo spazio a loro disposizione discostandosi dalla pressione standard. L'espansione isoterma quasi statica rappresenta il percorso reversibile da cui dedurre la variazione di entropia associabile poi a qualsiasi espansione durante una reazione chimica (Figura 1).

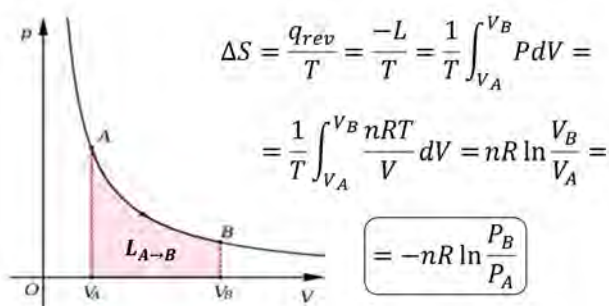


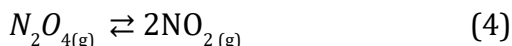
Figura 1. Calcolo dell'entropia associata a un'espansione isoterma di un gas

Per arrivare a questa formula è necessaria la conoscenza della legge dei gas ideali e prevede la risoluzione di un integrale notevole. Risulta essere, quindi, alla portata degli insegnamenti di chimica di base nella scuola secondaria e nei primi anni dei corsi universitari. La sua importanza risiede nel fatto che il semplice processo di espansione appena descritto è in grado di spiegare i processi di mescolamento e, in ultima analisi, l'equilibrio chimico, entrambi processi che, in condizioni ideali, si manifestano solo grazie a questo contributo entropico. Ci concentreremo adesso sul secondo processo, l'equilibrio chimico.

3.2. Equilibrio chimico

Capire l'equilibrio chimico da un punto di vista termodinamico significa capire perché una reazione non decorra sino a completamente, nonostante la variazione di energia libera di Gibbs calcolata in condizioni standard ($\Delta G_{\text{reaz}}^\circ$) sia negativa (o perché essa non decorra spontaneamente se tale variazione è positiva). Ricordiamo che la variazione di energia libera di Gibbs è intimamente legata alla variazione di entropia dell'universo secondo la semplice relazione $\Delta G = -T\Delta S_{\text{uni}}$.

Prendiamo il semplice esempio del diossido di azoto (NO_2) che in fase gassosa è in equilibrio con la sua forma dimera (N_2O_4) e consideriamo la reazione di dissociazione del dimero (equazione 4).



A temperatura ambiente il $\Delta G_{\text{reaz}}^\circ$ è positivo e, quindi la reazione non dovrebbe avvenire spontaneamente. Eppure, in fase gassosa si ritrovano entrambe le specie, il che significa che se partiamo solo dal dimero, la reazione un po' decorre. Durante l'avanzamento di una reazione, sebbene la pressione totale rimanga sempre a 1 bar, i reagenti che stanno scomparendo e i prodotti che si stanno formando si mescolano tra loro, ciascuno occupando tutto lo spazio a disposizione e abbassando, così, la propria pressione parziale sotto il valore di 1 bar (visto che la loro somma dà 1 bar). Possiamo immaginare il processo in avanzamento diviso in due stadi (Figura 2):

1. formazione/distruzione delle specie chimiche coinvolte nella reazione, confinate in un volume ideale di dimensioni tali da lasciare le specie in condizioni standard ($P = 1 \text{ bar}$);
2. conseguente espansione che le portano ad occupare tutto lo spazio, mescolandosi tra loro e ad abbassare quindi la loro pressione rispetto lo stato standard.

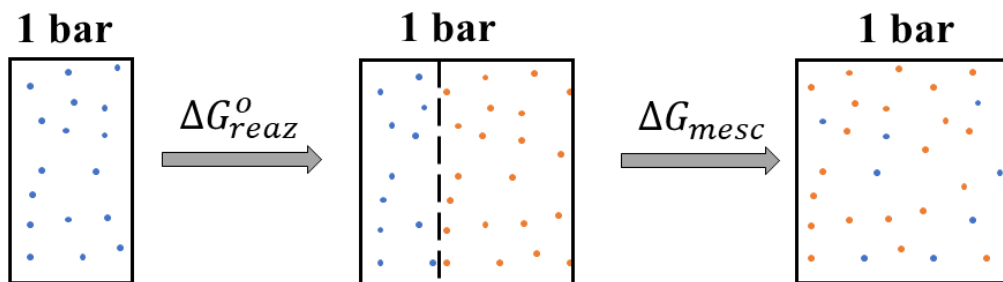


Figura 2. Contributi dell'energia libera durante il decorso della reazione che porta alla decomposizione di N_2O_4 in NO_2

Il primo stadio è descritto dal $\Delta G_{\text{reaz}}^\circ$, mentre il secondo dal ΔG_{mesc} , che in condizioni ideali coincide con il $-T\Delta S_{\text{mesc}}$, che può essere facilmente desunto dalla formula della espansione isoterma (equazione 5):

$$\Delta S_{\text{mesc}} = S_B - S_A = -Rb \ln P_B + Ra \ln P_A = -R \ln \frac{P_B^b}{P_A^a} \quad (5)$$

Se uniamo i due contributi otteniamo il valore totale di ΔG_{reaz} al variare della composizione. Così facendo, si scopre che l'andamento di ΔG_{reaz} tocca il suo minimo a una certa composizione tra i reagenti puri e i prodotti puri e che questo andamento è guidato esclusivamente dalla possibilità dei reagenti e dei prodotti di occupare tutto lo spazio a disposizione miscelandosi tra loro (sono gas dopo tutto). Quindi, la reazione decorre spinta dal contributo entropico del mescolamento fino a raggiungere la composizione di massima diminuzione dell'energia libera di Gibbs.

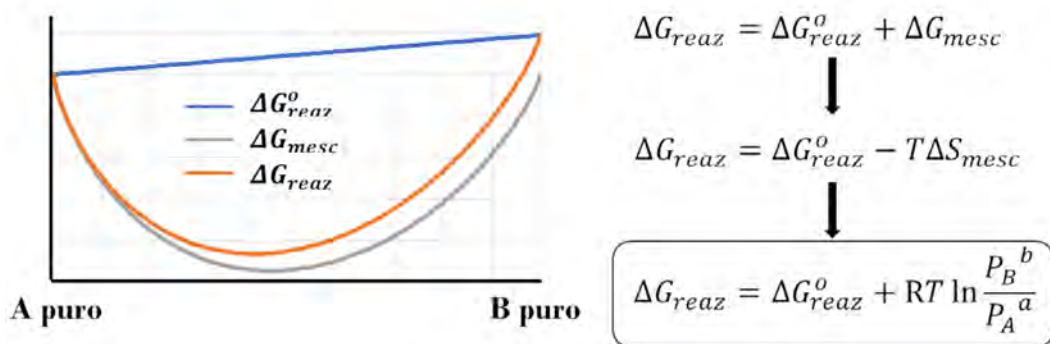


Figura 3. Andamento dell'energia libera durante il decorso di una reazione che conduce all'equilibrio

A questo punto, se volessimo sintetizzare con una frase le motivazioni che spingono le reazioni chimiche a fermarsi a “metà strada”, cioè volessimo dare una interpretazione del concetto di equilibrio, potremmo dire che è tutta colpa della miscelazione tra reagenti e prodotti. Con questa semplice trattazione che prevede solo il calcolo di integrali notevoli risulterebbe chiara la derivazione termodinamica della legge di azione di massa e della relazione che esiste tra energia libera di Gibbs e costante di equilibrio. Concetti questi, che una volta introdotti accompagneranno gli studenti attraverso gli equilibri in fase gassosa, gli equilibri in soluzione, gli acidi e le basi, gli equilibri di solubilità e l'elettrochimica: praticamente metà del programma di un corso di chimica di base.

4. Il terzo principio della Termodinamica

Il terzo principio della Termodinamica non enuncia alcuna legge di conservazione e non introduce alcuna proprietà che determina le sorti dell'universo. Abituamente nei corsi base viene enunciato come corollario che chiude il discorso sulla Termodinamica. In parole poco rigorose dice che l'entropia delle sostanze ben cristallizzate a zero Kelvin è nulla, ma può essere enunciato anche dicendo che non è possibile raggiungere lo zero Kelvin attraverso riduzioni finite di temperature. Sebbene, come sottolineato, non aggiunga ulteriori avanzamenti epistemologici rispetto ai primi due principi, il suo valore applicativo

è di fondamentale importanza nella determinazione della spontaneità delle reazioni chimiche, come dimostra il contesto storico in cui è stato enunciato. Prima di tutto capiamone l'importanza strumentale.

Un metodo sperimentale generale per acquisire informazioni sulla variazione di energia libera di Gibbs associata ad una reazione chimica (ΔG_{reaz}), è quello di misurare il calore di reazione a pressione costante (q_p), che ci conduce alla conoscenza del contributo entalpico (ΔH_{reaz}), e il calore di reazione in condizioni di reversibilità (q_{rev}), che ci conduce alla conoscenza del contributo entropico ($\Delta S_{\text{reaz}} = q_{\text{rev}}/T$). I due contributi sono legati al ΔG_{reaz} dalla nota relazione (equazione 6):

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (6)$$

Mentre il calore di reazione è facilmente accessibile, trovare delle condizioni di reversibilità per le reazioni chimiche, dalle quali dedurre il contributo entropico, non è così banale. Alcune reazioni possono essere fatte avvenire in una cella elettrochimica e, in tal caso, da misure di potenziale (ΔE) si può ricavare direttamente il ΔG_{reaz} attraverso la legge di Nernst ($\Delta G = -nF\Delta E$). In altri casi, il ΔG_{reaz} può essere ricavato dalle condizioni di equilibrio ($\Delta G_{\text{reaz}}^{\circ} = -RT\ln K$). In molti altri casi (si pensi, ad esempio, alle combustioni) la valutazione del ΔG_{reaz} deve passare dalla stima del ΔS_{reaz} quando questo non è suscettibile di misura diretta. Se non può essere valutato direttamente, possiamo pensare di farlo indirettamente. Nel caso dell'entalpia, per esempio, era possibile esprimere il ΔH_{reaz} introducendo il concetto di entalpia di formazione delle singole sostanze coinvolte nella reazione, ma per il ΔS_{reaz} il problema di trovare le condizioni di reversibilità riguarda ovviamente anche l'entropia di formazione delle singole sostanze. Il problema sarebbe semplicemente spostato, ma non risolto. È qui che ci viene incontro il terzo principio della Termodinamica. All'inizio del 1900 si sapeva calcolare l'incremento di entropia associata al riscaldamento di una sostanza (equazione 7):

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C_p}{T} dT \quad (7)$$

Questa formula, partendo dallo zero Kelvin, poteva restituire il valore assoluto dell'entropia di una sostanza (S_T) a una data temperatura (equazione 8)

$$S_T = S_0 + \int_0^T \frac{C_p}{T} dT \quad (8)$$

solo se si riusciva a stimare l'entropia di una sostanza allo zero kelvin (S_0). Mentre il termine integrale era calcolabile, il termine S_0 doveva essere estrapolato. Immaginate di voler risalire all'altezza di un individuo di 15 anni sapendo che mediamente cresce 10 cm all'anno. Ovviamente non è possibile, se non si conosce anche la sua altezza al momento del parto. Per la determinazione dell'entropia assoluta sussisteva lo stesso problema: si poteva conoscere l'incremento di entropia con la temperatura (il termine integrale), ma non si conosceva la temperatura "nativa" (S_0). La sfida per la determinazione S_0 fu raccolta da diversi ricercatori, tra cui Le Chatelier [5] e Lewis [6]. Alla fine, nel 1906 Nernst [7] enunciò quello che, con qualche modifica, è conosciuto come terzo principio della Termodinamica assegnando per tutte le sostanze $S_0 = 0$. La conoscenza dell'entropia assoluta ci permette di conoscere l'entropia di reazione (equazione 9) dalla conoscenza del contenuto entropico di ciascuna specie presente tra i prodotti (S_p) e tra i reagenti (S_r)

$$\Delta S_{\text{reaz}} = \sum_p p \cdot S_p - \sum_r r \cdot S_r \quad (9)$$

e in ultima analisi ci permette di conoscere il ΔG_{reaz} potenzialmente di tutte le reazioni chimiche. Se si contestualizza storicamente l'enunciazione del terzo principio e le necessità pratiche che hanno condotto alla sua formulazione, risulta evidente la sua importanza nell'ambito delle reazioni chimiche.

5. Considerazioni conclusive

Ancora due commenti sui concetti di energia ed entropia. Siamo abituati a parlare di energia in contesti familiari e quotidiani, mentre il concetto di entropia appare molto più astratto e sfuggente, ma dalla Termodinamica ci arriva un messaggio differente. Riguardo l'energia, nonostante sia una proprietà dei sistemi (sia considerata come energia interna che come entalpia) non siamo in grado di attribuirne un valore a un determinato stato, ma siamo capaci solo di conoscerne la variazione durante una trasformazione che porta da uno stato iniziale ad uno finale. Inoltre, dietro la parola energia si nasconde un mondo variegato che comprende tanti tipi di manifestazione dell'energia stessa: energia potenziale, energia cinetica, lavoro e calore. D'altro canto, parlando di entropia, non solo abbiamo un concetto univoco (l'entropia non si manifesta sotto diverse forme), ma è possibile assegnare un valore di entropia ai sistemi (almeno in certe circostanze) oltre che calcolarne la variazione durante una trasformazione. Di sicuro l'entropia è più sfuggente dell'energia, visto che si manifesta solo in condizioni di reversibilità, ma se ci limitiamo al suo uso strumentale ci rendiamo conto per certi aspetti che è un concetto meno problema-

tico dell'energia. Infine, è possibile dare un volto "microscopico" all'entropia, qualificandola come misura del grado di dispersione dell'energia delle molecole. Gli esempi per estrinsecare questo concetto sono molteplici, mi limiterò a elencare quelli più strettamente connessi agli argomenti trattati nelle sezioni precedenti. Un primo esempio è proprio l'espansione isoterma di un gas descritta nella sezione 3, in cui la dispersione deriva dalla possibilità delle molecole di muoversi in uno spazio più grande. Un secondo esempio passa dal confronto delle distribuzioni di Maxell-Boltzmann delle energie cinetiche di una sostanza a diverse temperature. In questo caso la dispersione è rappresentata proprio dall'allargamento della distribuzione all'aumentare della temperatura e spiega l'aumento dell'entropia delle molecole all'aumentare della temperatura. Infine, un terzo esempio si incontra nei passaggi di stato dove la dispersione si manifesta come aumento dei gradi di libertà delle molecole passando dal solido (le molecole possono solo vibrare) al liquido (le molecole ruotano e si spostano, ancora parzialmente vincolate) e al gas (totale libertà). Questi due ultimi esempi sono collegati alla misura dell'entropia assoluta delle sostanze come descritto nella sezione 4.

Riferimenti

- [1] S. Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, Bachelier, Paris, 1824.
- [2] H. Yu, Y.-X. Liu, G. Falk, Entropy, a resurrection of caloric-a look at the history of thermodynamics, *Eur. J. Phys.*, 1985, **6**, 108.
- [3] H. L. Callendar, The caloric theory of heat and Carnot's principle, *Proc. Phys. Soc. London*, 1910, **23**, 153–189.
- [4] R. Clausius, *The mechanical theory of Heat*, 1867.
- [5] H. Le Chatelier, *Recherches expérimentales et théoriques sur les équilibres chimiques*, dunod, 1888.
- [6] G. N. Lewis, *A general equation for free energy and physico-chemical equilibrium, and its application*, PhD dissertation, Harvard University, 1899.
- [7] W. Nernst, Über die berechnung chemischer gleichgewichte aus thermischen messungen, *Nachrichten von der gesellschaft der wissenschaften zu Göttingen, Math. Klasse*, 1906 (n.d.) 1–40.

Una pagina di Storia della Chimica per la Didattica: lo sviluppo della teoria molecolare della capillarità

Vincenzo Villani

Dipartimento di Scienze, Università degli Studi della Basilicata

e-mail: vincenzo.villani@unibas.it

Abstract. The development of understanding of the molecular nature underlying the phenomenon of capillarity and the relation of this with the surface tension underlying the formation of drops and bubbles can become a useful teaching tool in establishing the cause-effect link between the molecular microscopic world and the observed macroscopic world.

The chemist uses capillarity in many forms in daily practice, for example in the thin layer chromatography technique, and surface tension in problems of solubility and emulsion stability. However, the depth of these ideas goes far beyond and represents an important page in the history of chemistry and physics, and the development of these concepts is exciting and of educational value. This is a highly interdisciplinary topic, little addressed in teaching programs, but the historical perspective facilitates its exposition and introduces in an innovative way the role of molecular interactions underlying macroscopic phenomena.

Although Leonardo already intuited the presence of "hidden" cohesive forces in the formation of a drop, it is in the hands of Laplace's genius that the molecular theory of capillarity is completely developed and despite the outdated hypothesis, it reaches today.

The rise (or lowering) of the level of a liquid in a capillary tube still aroused wonder in the 18th century and greatly disturbed temperature and pressure measurements using liquids in capillary tubes. Today, the idea that it was the gravitational force of the interaction between atoms and molecules responsible for the phenomenon may seem naive, but in truth it was a huge step forward towards a unified vision of the forces of Nature from the atom to the universe. The debate in the 19th century was fierce and profound, it mobilized the greatest minds of the time Laplace, Maxwell, Gauss... Laplace's theory constituted the solution and the starting point for subsequent studies. The same interactions were placed by the chemist Berthollet at the basis of the chemical affinities, responsible of the reactivity. Then the fundamental laws were deduced, and it was established that the phenomenon of capillarity is due to the surface tension of liquids and this to the short-range attractive and repulsive molecular interactions at the interface.

Keywords: Teoria della capillarità; tensione superficiale; interazioni molecolari; affinità chimica

Tensione superficiale di un liquido, fenomeni di capillarità, interazioni molecolari all'interfaccia, sono concetti complessi e poco utilizzati nella didattica, ma strettamente connessi tra loro che possono costituire un *fil rouge* interdisciplinare capace di legare in una relazione di causa-effetto il livello microscopico delle molecole a quello macroscopico osservato. In verità, facendo riferimento a fenomeni ben noti, ripercorrendo lo sviluppo storico e l'interpretazione particellare della materia che ne fu data da Newton prima e successivamente da Ampère, Berthollet e Laplace [1-4], è possibile chiarire senza perdita di rigore questi concetti e sviluppare utili analogie didattiche per illustrare le interazioni atomiche e molecolari.

In questo percorso, cominciamo da una semplice domanda: perché le gocce e le bolle sono sferiche? È un'osservazione tanto comune che rischia di cessare di meravigliarci; tuttavia, questa intrigante proprietà è carica d'informazione e può diventare il vettore di concetti profondi. La sfericità è dovuta alla tensione superficiale che rende elastica la superficie libera dei liquidi. Allora, la forma sferica risulta una conseguenza della minima energia superficiale, ottenuta rendendo minima l'area superficiale; infatti, la sfera è la forma geometrica che ha il più basso rapporto superficie-volume: dato un certo volume, l'area superficiale è la più bassa possibile. A sua volta, la tensione superficiale all'interfaccia è la risultante tra le forze di coesione del liquido e le forze di adesione solido-liquido.

Fu il genio di Leonardo a intuire e descrivere per la prima volta la profondità del problema (*Codice Atlantico*, 1478-1518):

La gravità di una goccia d'acqua è dupla: una comune a tutti i corpi la spinge verso il centro della Terra, l'altra, sua propria, la spinge verso il centro della sua massa; ma di questa non veggo nell'umano ingegno modo di darne scienza, ma dire come si dice della calamita che attira il ferro, cioè che tal virtù è occulta proprietà, della quale è infinita la natura.

E che dire della capillarità? Come è noto un liquido si innalza (o si abbassa, a seconda dei materiali in gioco) in un capillare, sfidando apparentemente la forza di gravità: l'acqua s'innalza in un capillare di vetro e il mercurio si abbassa, rispetto al livello del liquido nel serbatoio. Solo nel XIX secolo il genio di Laplace dimostrò che la tensione superficiale e la capillarità sono due facce della stessa medaglia e la prima è causa della seconda: è la pressione generata dalla superficie libera del liquido (il cosiddetto *menisco*) che innalza la sottostante colonna di liquido, fino all'equilibrio tra la pressione esercitata verso l'alto e il peso della colonna sottostante. Dunque, le interazioni molecolari alla superficie di un liquido sono la causa della tensione superficiale e la tensione superficiale del liquido è la causa dei fenomeni capillari.

La capillarità era uno spiacevole effetto parassita che falsava le misure di tem-

peratura nei primi termometri a mercurio inventati nel 1705 da Fahrenheit, entusiasta per la bella invenzione [5]:

Quando realizzai il termometro a mercurio (imperfetto sotto molti modi) il risultato rispose alla mia preghiera, e con grande piacere della mente osservai la verità che l'acqua bolle a un determinato grado di calore.

Tensione superficiale e capillarità intervengono in molti e importanti fenomeni comuni e applicativi. L'acqua bagna in modo diverso una superficie idrofoba o idrofila. Fu Young nel 1804 a scoprire il parametro chiave di questa interazione, l'*angolo di contatto*: una goccia si spande su una superficie idrofila fino a un angolo di contatto tendente a zero; al contrario, si contrae su una superficie idrofoba formando un angolo maggiore di 90° (Figura 1).

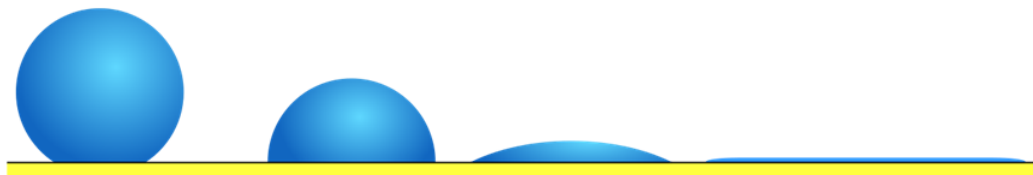


Figura 1. Una goccia d'acqua su una superficie idrofoba (a sinistra) a idrofila (verso destra)

La *bagnabilità* (*wetting*) è una proprietà di grande interesse applicativo: oggi i chimici modulano in modo sofisticato questa proprietà, rivestendo le superfici di macromolecole con un gruppo laterale che può essere caricato o scaricato elettricamente, rendendo la superficie idrofila o idrofoba a piacimento (Figura 2) [6].

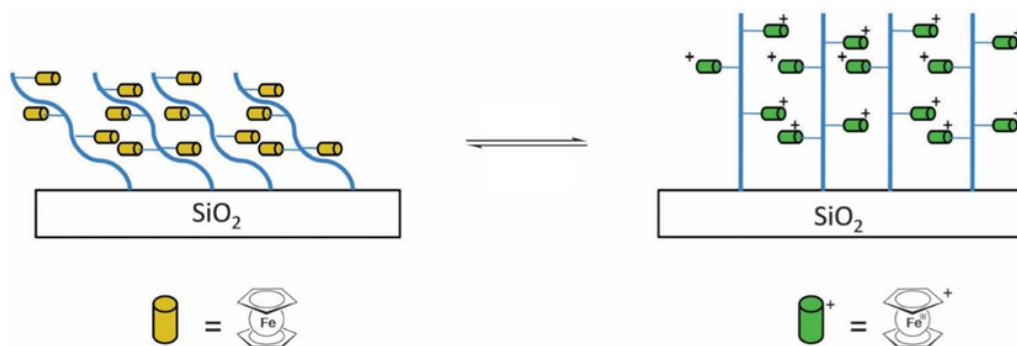


Figura 2. Una lastra di vetro decorata mediante una poliolefina con il ferrocene come gruppo laterale, in cui il ferro può essere ossidato o ridotto applicando un potenziale elettrico

La tensione superficiale controlla un gran numero di fenomeni, ad esempio, la formazione delle *emulsioni*, in cui minute gocce d'olio sono disperse in acqua (o viceversa, minute gocce d'acqua sono disperse in olio), grazie alla presenza di un tensioattivo (la lecitina, ad esempio) che riveste l'interfaccia della goccia d'olio di molecole solubili in acqua, rendendo miscibile l'olio in acqua e sufficientemente stabile la goccia abbassando la tensione superficiale (Figura 3).

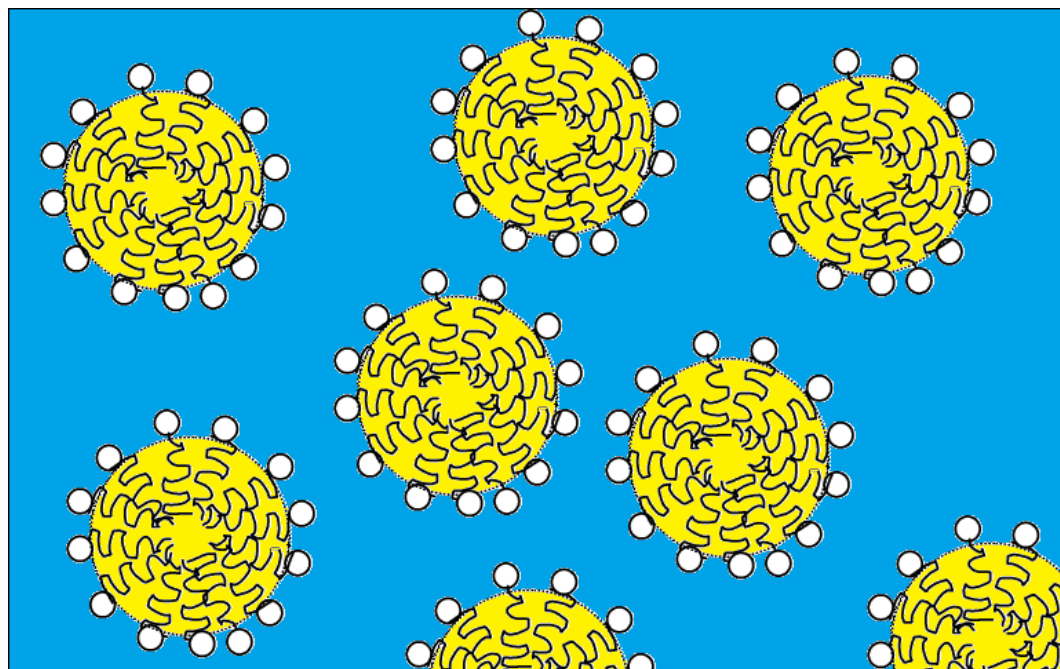


Figura 3. Rappresentazione di un'emulsione olio in acqua: le molecole anfotere del tensioattivo stabilizzano l'interfaccia con la catena apolare nell'olio e la testa polare in acqua

Analogamente, le bolle d'aria sono disperse mediante una vigorosa agitazione meccanica nel latte, nella chiara d'uovo delle meringhe o nel cappuccino. Altresì, gli alveoli polmonari, le cellule, i batteri e i virus sono stabilizzati da una membrana di tensioattivi a base di fosfolipidi e proteine che, riducendo la tensione superficiale, rendono stabili particelle nanometriche altrimenti altamente instabili (Figura 4).

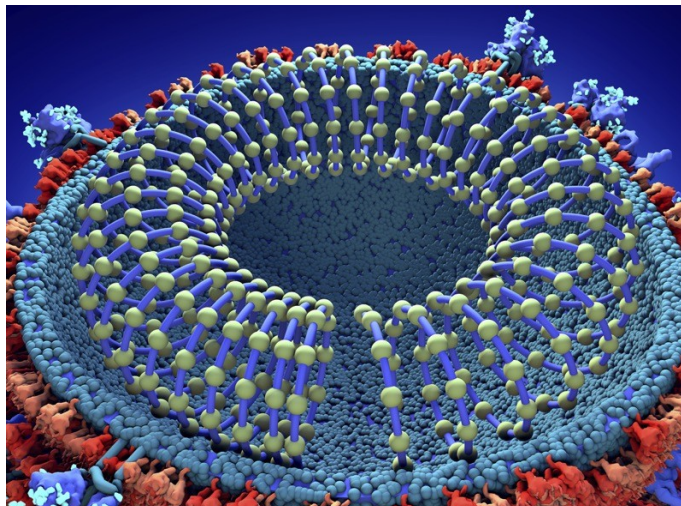


Figura 4. Una rappresentazione del Sars-Cov-2 la cui membrana è stabilizzata dalla bassa tensione superficiale

Il chimico sfrutta la capillarità nella pratica del laboratorio, ogni volta che effettua una cromatografia su carta o su strato sottile (TLC): l'eluente sale per capillarità, separando i soluti disciolti in modo riconoscibile (Figura 5). Allo stesso modo, la linfa sale dalle radici alle foglie degli alberi per capillarità nei minutissimi tubuli del tessuto conduttore (xilema e floema).

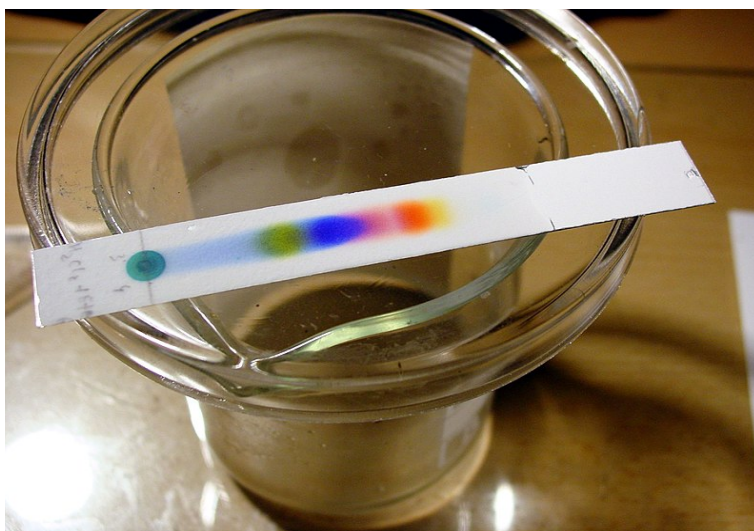


Figura 5. Separazione dei componenti di una goccia di inchiostro nero mediante TLC, utilizzando una soluzione di etanolo e acqua

La storia moderna della capillarità comincia nel XVII secolo con Alfonso Maria Borrelli e Geminiano Montanari, i grafici dell'opera di quest'ultimo contengono in modo chiaro i principali effetti capillari: la risalita del liquido in stretti tubicini, in modo inversamente proporzionale alla dimensione del foro (Figura 6).

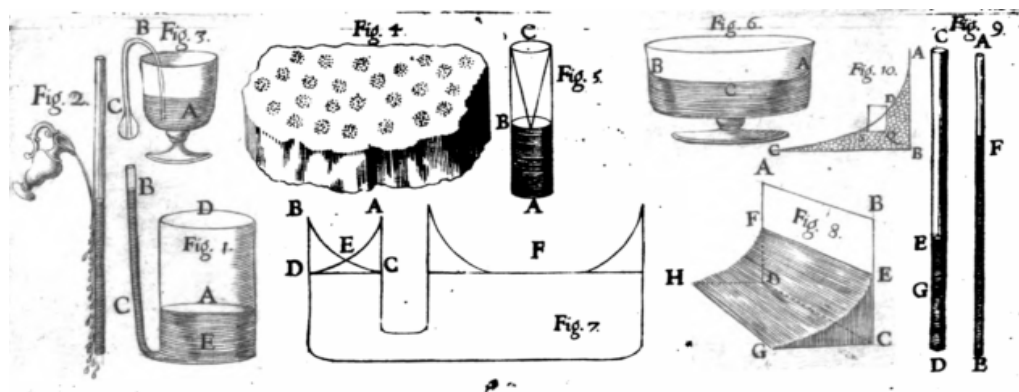


Figura 6. Gli esperimenti di capillarità di Geminiano Montanari (1667)

Fu tuttavia l'opera di Newton a rappresentare anche in questo caso lo spartiacque. Newton aderì all'atomismo, diffuso dal filosofo Pierre Gassendi (*De vita et moribus Epicuri*, 1647) entusiasta delle idee contenute nel *De rerum Natura* di Lucrezio, riscoperto da Poggio Bracciolini nel 1417. Nell'ultimo capitolo dell'*Ottica* del 1705 sono riportate 31 *Questiones* (ipotesi di lavoro), la cui soluzione è lasciata ai posteri. La XXXI è incentrata sulla natura particellare della materia e sulla natura *short-range* dell'attrazione intermolecolare: *sensibile solo a distanze insensibili* e di come sia fondamentale nei comportamenti chimici e nella capillarità:

Dalla coesione dei corpi, desumerei che le loro particelle si attraggono l'un l'altra per effetto di una certa forza, straordinariamente grande nel contatto immediato, che a piccole distanze produce gli effetti chimici e capillari e lontano dalle particelle non arriva a produrre alcun effetto percepibile dai sensi.

Utilizzando capillari di vetro con il foro della stessa dimensione, ma con pareti sottili o spesse, osservò che il liquido si innalzava (o abbassava a seconda del liquido utilizzato) nella stessa misura, dimostrando la natura *short-range* delle interazioni molecolari, dal momento che sono efficaci solo le interazioni all'interfaccia (Figura 7).

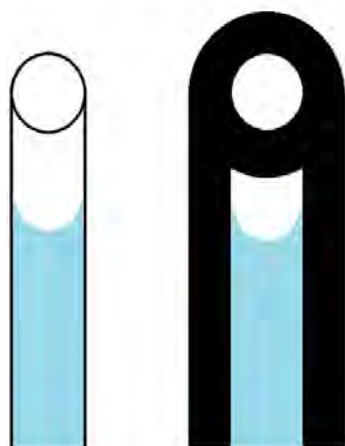


Figura 7. L'acqua risale nella stessa misura in capillari di vetro dalla parete sottile o spessa

Analogamente, dimostrò che un'impercettibile pellicola d'olio sulla parete interna del capillare inibiva completamente il fenomeno.

Il chimico francese Bertollet nel trattato *Statique Chimique* (1804), il primo trattato di Chimica teorica in senso moderno, pone in stretta relazione il fenomeno della capillarità e l'affinità chimica:

Si debbono ricercare le leggi dell'attrazione molecolare, considerando i loro effetti nei fenomeni della statica chimica e in quelli offerti dall'equilibrio dei liquidi contenuti negli spazi capillari.

In questo modo è indicata l'urgenza di chiarire la natura delle forze di attrazione molecolare alla base della reattività osservata: la capillarità risulta essere la via privilegiata in questa direzione.

La spiegazione fu infine trovata da Laplace nel 1805, in una geniale teoria fortemente matematica, che risulta essere la prima teoria molecolare in senso moderno. Considerando le molecole costituite da una massa circondata da un'atmosfera di calorico (il fluido imponderabile responsabile dei fenomeni termici), tenendo conto dell'attrazione gravitazionale massa-massa e massa-calorico e della repulsione calorico-calorico e ipotizzando un'interazione molecolare *short-range*, ovvero (in termini newtoniani) *insensibile a distanza sensibile*, senza esplicitare oltre la forza intermolecolare, ricava l'equazione di Laplace-Young della tensione superficiale (equazione 1) e la legge di Jurin dell'innalzamento/abbassamento del liquido nei capillari (in modo inverso al raggio a del foro), o tra lastre piane ravvicinate (equazione 2):

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{R} \quad (1)$$

$$h = \frac{2\gamma \cdot \cos \vartheta}{\rho g \cdot a} \quad (2)$$

Laplace non approfondisce la natura *short-range* della forza gravitazionale operante a livello molecolare, ma questa sarebbe dovuta all'attrazione tra sferoidi, piuttosto che tra masse puntiformi, che si esercita quando la distanza intermolecolare è comparabile alla dimensione dei corpi interagenti: tuttavia, essendo incognita la forma molecolare e le distanze in gioco non gli è possibile spingere oltre l'analisi:

Le affinità dipenderebbero dalla forma delle molecole integranti e dalle loro rispettive posizioni, e si potrebbe con la varietà di queste forme, spiegare tutte le varietà delle forze attrattive, e ricondurre così a una sola legge generale tutti i fenomeni della fisica e dell'astronomia. Tuttavia, l'impossibilità di conoscere le figure delle molecole e le loro distanze mutue, rende queste spiegazioni vaghe e inutili al progresso delle scienze.

Infine, Poisson (1831), allievo di Laplace, conferma le equazioni del maestro e include nel calcolo la variazione della densità del liquido all'interfaccia.

In conclusione, e con una bella analogia didatticamente utile, possiamo dire che le molecole, nella visione dei chimici e fisici d'inizio Ottocento si comportano come bolle di sapone: si attirano fortemente quando vengono a contatto, ma altresì resistono allo schiacciamento, raggiungendo una stabile configurazione d'equilibrio (Figura 8).

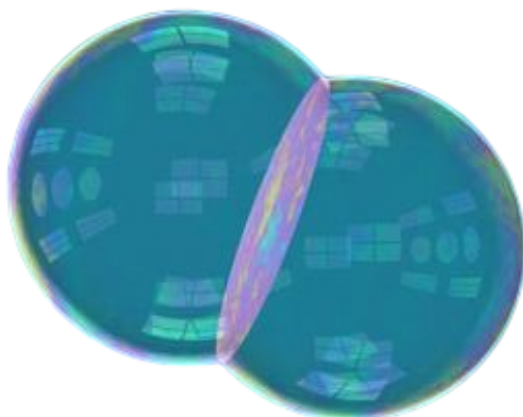


Figura 8. La configurazione d'equilibrio di due bolle di sapone a contatto sotto l'azione della tensione superficiale e della pressione dell'aria

Riferimenti

- [1] André-Marie Ampère - Opere (a cura di Mario Bertolini), *Classici della Scienza*, UTET, Torino, 1969.
- [2] V. Villani, La geniale teoria delle combinazioni chimiche di André-Marie Ampère, *Rendiconti Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Memorie di Scienze Fisiche e Naturali*, 2019, vol. XLIII, 197.
- [3] Opere di Pierre Simon Laplace (a cura di Orietta Pesenti Cambursano), *Classici della Scienza*, UTET, Torino, 1967.
- [4] V. Villani, Molecole e Interazioni molecolari nella teoria della capillarità, *Rendiconti Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Memorie di Scienze Fisiche e Naturali*, 2022, vol. XLVI, 151.
- [5] A. Baracca, A. Rossi, *Materia e Energia*, Feltrinelli, Milano, 1978.
- [6] R. Pietschnig, Polymers with pendant ferrocenes, *Chem. Soc. Rev.*, 2016, **45**, 5216.