

CnS

La Chimica nella Scuola

n. 3 anno 2026

- **Come migliorare la capacità degli studenti nel risolvere problemi stechiometrici**
- **Modi nuovi per insegnare e divulgare la chimica**
- **La chimica «insolita» delle stelle**
- **Come e perché si è passati dal peso atomico al numero atomico per ordinare gli elementi chimici**
- **Gli antichi strumenti chimici per una didattica efficace**
- **I tanti volti dell'arsenico**
- **E altro ancora ...**



DIRETTORE ONORARIO

Luigi Mondello

COMITATO EDITORIALE

Direttore: Margherita Venturi

Vice-direttori: Eleonora Aquilini, Giovanni Villani

COMITATO DI REDAZIONE

Leonardo Anatrini, Eleonora Aquilini, Luigi Campanella,
Giorgio Cevasco, Marco Ciardi, Valentina Domenici,
Maria Funicello, Silvano Fuso, Elena Ghibaudi, Carmine Iorio,
Elena Lenci, Anna Maria Madaio, Giulia Quaglia,
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

- Che caldo che fa: solo Guterres sembra accorgersene..... 1
Margherita Venturi

Non solo calcoli stechiometrici

- La verifica del risultato per migliorare le abilità di problem solving 5
Liberato Cardellini

Didattica e divulgazione della chimica

- Archè: la chimica va in scena per raccontare l'evoluzione del concetto di elemento e di atomo 21
Marco Caruso
Il sistema periodico fra divulgazione scientifica e materiali didattici 25
Luciana Massi

Musei scientifici e didattica

- Valorizzare il patrimonio degli strumenti scientifici storici per la conoscenza e la didattica: il progetto Va3SCoDi..... 35
Luca Rocca, Gaetano Angelici e Valentina Domenici

Chimica e astronomia

- Siamo «polvere di stelle»: come la chimica costruisce l'Universo 45
Giuseppe Bellomo

Storia ed epistemologia della chimica

- Dal peso atomico al numero atomico: un nuovo criterio ordinatore per gli elementi della Tavola Periodica 55
Matteo Chioccioli e Antonio Testoni

Un chimico non più tanto giovane racconta

Arsenico double-face e un po' di gossip 69

Franco Alhaique

News

La stampa 3D anche per i Beni Culturali..... 81

Luigi Campanella

A 50 anni da Seveso..... 83

Claudio Della Volpe

Che caldo che fa: solo Guterres sembra accorgersene

Margherita Venturi

Cara lettrice e caro lettore,

scrivo questo editoriale in una torrida giornata e penso a quanto sta accadendo attorno a noi: guerre combattute a suon di armi e una guerra, quella climatica, che non usa armi, ma causa comunque tante vittime.

Sono due facce della stessa medaglia, perché i combustibili fossili sono alla base sia delle guerre che stanno “infiammando” il mondo (si dice che vogliono esportare la democrazia, ma in realtà vogliono

solo accaparrarsi le ultime risorse di petrolio e gas), sia della guerra climatica che sta ugualmente “infiammando” il mondo (ormai è chiaro che il riscaldamento globale si deve fondamentalmente alla grande quantità di CO₂ immessa in atmosfera bruciando carbone, petrolio e gas).

Tutto ciò mette in crisi il nostro attuale modello di sviluppo, ma sembra che ad accorgersene sia solo Guterres, l'illuminato segretario generale dell'ONU, che il 23 giugno scorso ha tenuto un bellissimo discorso alla *London Climate Action Week*. In realtà si potrebbe meglio definire un appello appassionato, tipico del suo stile, di cui mi piace riportare alcune frasi sulle quali dovremmo riflettere tutti, politici compresi.

“... è chiaro che il nostro mondo sta affrontando una «Storia di due crisi». Una crisi climatica che ci spinge verso temperature sempre più elevate e ci avvicina a punti di non ritorno catastrofici. E una crisi energetica che mette a nudo la follia di un mondo dipendente dagli idrocarburi. Queste due crisi gemelle hanno messo ancora una volta a nudo i limiti di un modello di sviluppo ormai superato. Un modello alimentato dai combustibili fossili – in cui un singolo conflitto può sconvolgere l'approvvigionamento energetico globale e un singolo punto di strozzatura può far impennare i prezzi.

Un modello che tratta la natura come una risorsa illimitata – da consumare senza conseguenze. Un modello che ha creato un'enorme ricchezza – ma ha anche aggravato le disuguaglianze e alimentato l'insicurezza.

Un modello in cui chi ha contribuito meno a causare queste crisi paga il prezzo più alto.

La lezione è chiara: questo modello non ha futuro.

La comunità internazionale ne ha riconosciuto i limiti quando ha adottato l'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile. Il mondo non può tornare indietro.

Non possiamo più puntare su un sistema basato sui combustibili fossili che sta alimentando sia la crisi climatica che quella energetica.



Ciò di cui abbiamo bisogno, con urgenza, è la volontà di attuare pienamente gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile. Per conciliare la prosperità con la resilienza. La crescita con la sostenibilità. E le opportunità con la giustizia.

La buona notizia è che – a differenza di ogni crisi energetica del passato – ora abbiamo una via d'uscita chiara. Una via d'uscita pulita.

Le energie rinnovabili sono la fonte di nuova energia elettrica più economica, più veloce e più scalabile nella maggior parte del mondo.

Ogni unità di energia che un paese produce per sé è un'unità in meno che deve acquistare da un mercato che non può controllare, attraverso una rotta che non può proteggere e a un prezzo determinato da eventi che non ha scelto. Non ci sono embarghi sulla luce del Sole né blocchi sul vento.”

E qui mi è venuta in mente la questione dello stretto di Hormuz con tutte le notizie altalenanti che ci arrivano: oggi le navi passano, domani forse no; le borse del mercato energetico, fra questi sì e no, si “innervosiscono” (frase tipica dei telegiornali); ieri ci hanno detto che le nostre vacanze nei paradisi tropicali sono a rischio, perché senza carburante gli aerei non possono partire, e oggi hanno annunciato che l'emergenza è rientrata, ma fino a quando?

Sono cose tutte, o quasi tutte, importantissime, lo capisco benissimo, però, se ci fossimo affidati a uno sviluppo meno dipendente dai combustibili fossili, vedremmo la situazione con altri occhi; se avessimo adottato uno stile di vita meno consumistico, non penseremmo a vacanze oltreoceano, viste come la nostra massima aspirazione.

Sconsolatamente devo dire che il periodo dell'Austerità degli anni Settanta del secolo scorso non ci ha proprio insegnato nulla!

Un altro punto molto interessante del discorso/appello di Guterres riguarda l'Intelligenza Artificiale di cui tanto si parla ultimamente.

“L'Intelligenza Artificiale può accelerare le soluzioni climatiche.

Può aiutare a curare le malattie, trasformare l'istruzione e consentire all'umanità di affrontare sfide un tempo ritenute fuori dalla nostra portata. Dobbiamo sfruttare quel potenziale.

Ma l'intelligenza artificiale ha anche un grande fabbisogno di terra, acqua ed energia.

I data center che la supportano consumano già più elettricità della maggior parte delle nazioni. ...

Nonostante queste evidenti preoccupazioni, le comunità sono spesso all'oscuro dell'impatto ambientale delle infrastrutture che sorgono intorno a loro.

Per questo oggi propongo l'Iniziativa per la trasparenza ambientale nell'IA. Chiedo a tutte le principali aziende del settore dell'IA di misurare e rendere pubblico l'impatto ambientale complessivo dei propri sistemi – impronta di carbonio, idrica e territoriale – e di impegnarsi ad alimentare ogni data center con energia rinnovabile entro il 2030.

Basta con i costi nascosti. Basta scaricare l'onere su chi è meno in grado di sopportarlo. È ora di fare chiarezza. Se l'IA deve contribuire a costruire un futuro migliore, deve essere onesta su quanto ci costa oggi.”

Guterres ha avuto anche parole lusinghiere per la scienza che, da persona che ha sempre lavorato in ambito scientifico, ho apprezzato moltissimo.

“La scienza ha dato all'umanità la capacità di comprendere i rischi prima che la catastrofe si abbatta su di noi. Eppure, la disinformazione si sta diffondendo – deliberatamente – per ritardare l'azione per il clima, consolidare interessi acquisiti e minare la fiducia.

Dobbiamo agire per proteggere l'indipendenza scientifica; rafforzare la fiducia nelle prove scientifiche e nelle istituzioni; ... garantire a tutti l'accesso a informazioni affidabili, credibili e basate sulla scienza.

Le Nazioni Unite hanno lanciato l'Iniziativa Globale per l'Integrità dell'Informazione sui Cambiamenti Climatici proprio per contribuire a questo obiettivo.

I fatti contano. La scienza conta. L'integrità dell'informazione conta.”

Il discorso/appello di Guterres meriterebbe di essere riportato interamente, ma per ragioni di spazio aggiungo, a quanto già citato, solo la sua conclusione che, pur aprendo alla speranza, ci inchioda alle nostre responsabilità.

“Per l'agenda climatica, questo è davvero il migliore dei tempi e il peggiore dei tempi.

Il peggiore – perché gli impatti climatici si stanno intensificando, i punti di non ritorno incombono e la crisi energetica ha messo a nudo i profondi rischi della dipendenza dai combustibili fossili.

Ma anche il migliore – perché la rivoluzione delle energie rinnovabili è ben avviata. Una rivoluzione fatta di energia pulita, elettrificazione, costi in calo, ambizioni in crescita – e immense opportunità.

Una rivoluzione in grado di liberare i paesi dalla volatilità dei mercati dei combustibili fossili, ampliare l'accesso all'energia, rafforzare la sicurezza, creare posti di lavoro, purificare l'aria, ripristinare gli ecosistemi e rendere raggiungibile un futuro più sicuro.

Abbiamo l'enorme opportunità – e la responsabilità – di trasformare questa «Storia di due crisi» in un'unica storia di determinazione, equità e progresso condiviso. Possiamo finalmente voltare pagina sui combustibili fossili e scrivere un futuro alimentato dalle energie rinnovabili e radicato nella giustizia climatica. Questo è il nostro momento di scelta. Il nostro momento della verità. Il nostro momento di opportunità. Cogliamo questa occasione.”

Dopo i problemi che affliggono il nostro mondo, passiamo ora a qualcosa di più “leggero” e, cioè, a questo numero del CnS, in cui puoi trovare molti spunti per il ritorno a scuola.

Gli argomenti sono diversi e tutti molto interessanti: da una riflessione su come gli studenti affrontano (e spesso sbagliano) i calcoli stechiometrici alla chimica “insolita” che avviene nelle stelle, da modi nuovi di fare didattica e divulgazione in ambito chimico all'analisi e alla storia di antiche apparecchiature scientifiche, come efficaci strumenti didattici. E poi, ancora, un contributo ci spiega come e perché si è passati dal peso atomico al numero atomico per ordinare gli elementi chimici e un altro ci racconta i tanti volti dell'arsenico. A tutto ciò si aggiungono due News che chiudono il numero, una che riguarda una tecnologia d'avanguardia applicata ai beni culturali e l'altra che, invece, ricorda un grave incidente avvenuto 50 anni fa.

Insomma, c'è solo l'imbarazzo della scelta!

Prima di salutarti e augurarti, come al solito, buona lettura, ci tengo a ricordare una persona molto importante per me e per la nostra rivista che ci ha lasciato da poco, Claudio Tubertini della CLUEB, che rimarrà sempre nel mio cuore; sono sicura che, da lassù, continuerà a seguire con il suo sorriso bonario tutte le mie paranoie e le mie continue richieste durante la correzione delle bozze.

Luigi Alfieri

La verifica del risultato per migliorare le abilità nel problem solving

Liberato Cardellini

Già docente presso il Dipartimento SIMAU dell'Università Politecnica delle Marche
e-mail: l.cardellini21@outlook.it

Abstract. Some educational experiments were conducted to identify the difficulties students encounter in using familiar concepts such as density or in solving simple stoichiometric calculation problems and verifying the result. This article demonstrates how the systematic use of verification improves students' self-esteem and problem-solving skills.

Keywords: stima del risultato; verifica; motivazione; autostima; bilancio di carica; bilancio di massa

1. Introduzione

La capacità di risolvere problemi è un'abilità importante e necessaria per arricchire il percorso formativo degli studenti perché contribuisce in modo importante allo sviluppo delle abilità cognitive [1]. Le abilità cognitive di ordine elevato e la capacità di risolvere problemi sono considerate uno scopo importante e un traguardo necessario dell'istruzione scientifica [2]. Questo aspetto è stato evidenziato dall'affermazione che segue [3]: "It is difficult to imagine a more important educational objective than the teaching and learning of how to think more effectively."

Lo stesso concetto viene ribadito da John Anderson [4].

David Jonassen argomenta sull'importanza di risolvere problemi in quanto forma autentica di acquisizione della conoscenza [5]: "... problem solving is the most authentic and therefore the most relevant learning activity that students can engage in. ... research has shown that knowledge constructed in the context transferable. ... problem solving requires intentional learning. ... Therefore, the primary purpose of education should be to engage and support learning to solve problems."

La capacità di eseguire calcoli stechiometrici è un aspetto fondamentale nella formazione dei futuri chimici. Gli studenti, oltre al libro di testo preparano l'esame utilizzando anche il libro di stechiometria; il primo manuale di calcolo stechiometrico fu pubblicato quasi due secoli fa [6]. La ricerca educativa ha evidenziato le numerose difficoltà che gli studenti incontrano nell'acquisizione delle varie operazioni logiche necessarie, sia per eseguire i calcoli stechiometrici in modo corretto, che per la loro comprensione concettuale [7-22].

Come possiamo migliorare le capacità degli studenti nella soluzione dei problemi chimici? Nel suo famoso testo *How to Solve it*, Polya dà grande risalto alla verifica; quando si mette in pratica il piano risolutivo, "*check each step*: "Can you see clearly that the step is correct? Can you prove that it is correct?" Quando si controlla la soluzione ottenuta [23]: "Can you *check the result*? Can you check the argument?"

La verifica della soluzione del problema, di congetture e affermazioni, viene suggerita o presentata in molti testi che riguardano studi di matematica [24, 25] in cui "to prove" e "looking back" sono espressioni spesso ricorrenti. La riconsiderazione del risultato ottenuto, la sua verifica e la riesamina dei vari passaggi della risoluzione sembrano non rivestire molto interesse in altre discipline scientifiche, quasi la stessa cosa accade in chimica. L'unico esempio di discussione della verifica e della sua importanza si trova in un paragrafo riportato in *The Chemistry Classroom* [26]. Herron riporta i dati

di uno studio condotto da David Frank [27] su studenti di chimica in corsi di scienze e ingegneria. È interessante notare che, già all'epoca, era difficile convincere alcuni studenti a verificare la consistenza dei loro risultati.

Chi risolve i problemi con successo spesso impiega diverse strategie per verificare efficacemente la coerenza logica dei passaggi, delle procedure e delle conclusioni, nonché la loro corretta esecuzione. L'essere sicuri di aver risolto in modo corretto un problema contribuisce alla crescita della propria autostima. Il successo nella risoluzione dei problemi è un'emozione potente: innesca uno stato mentale che genera altre emozioni positive che alimentano l'interesse, la motivazione e il coinvolgimento degli studenti [28-34].

Riconsiderando e riesaminando il risultato e la consistenza logica dei vari passaggi che hanno permesso di ottenerlo, gli studenti possono diventare più sicuri e consapevoli del lavoro fatto, ma anche "consolidate their knowledge and develop their ability to solve problems" [35]. Poiché l'abilità a risolvere problemi è un aspetto importante della preparazione professionale in chimica, abituare gli studenti alla precisione nei calcoli e alla verifica del risultato contribuisce a migliorare la loro formazione.

2. Padroneggiare i calcoli stechiometrici

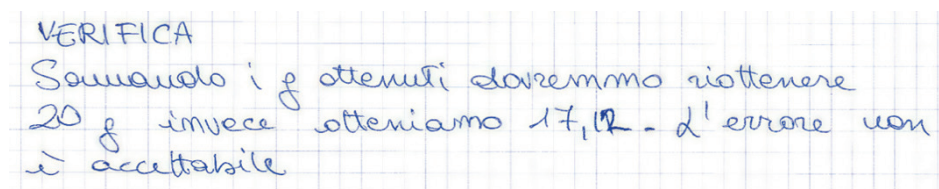
Con lo scopo di verificare le conoscenze nel calcolo stechiometrico degli studenti che arrivavano al mio corso di chimica al primo anno di università in una Facoltà di ingegneria, proponevo di risolvere il problema (1) di seguito riportato.

Problema (1)

10,00 g di carbonato di sodio (Na_2CO_3) vengono fatti reagire con 10,00 g di acido cloridrico (HCl). Calcolare i grammi di CO_2 , di acqua (H_2O) e di cloruro di sodio (NaCl) che si formano. Escogitare inoltre un metodo esaustivo per fare la verifica del risultato.

Alla lavagna veniva scritta l'equazione chimica e la massa molare (g/mol) di reagenti e prodotti e veniva suggerito di scrivere eventuali ipotesi fatte per giustificare i calcoli. Non è stato specificato che uno dei reagenti venisse completamente consumato, per vedere come gli studenti ragionassero. A questo esperimento hanno partecipato 67 studenti (26 donne e 41 uomini) suddivisi in 27 gruppi cooperativi.

Nella maggior parte delle soluzioni la verifica è stata basata sulla conservazione della massa e 19 soluzioni riportano la somma delle masse dei prodotti uguale a 20 grammi; in 4 soluzioni il procedimento di calcolo è risultato corretto, mentre 4 soluzioni sono risultate inconsistenti o non complete. In una delle soluzioni inconsistenti compare quanto riportato in figura 1.



VERIFICA
Sommando i g ottenuti dovremmo ottenere
20 g invece otteniamo 17,12 - l'errore non
è accettabile

Figura 1. I risultati della verifica non convincono gli studenti

La soluzione in parte corretta (calcolo del reagente limitante) è stata ritenuta inconsistente per via di alcuni ragionamenti utilizzati. Ad esempio, l'acqua prodotta è stata calcolata come segue:

$$(10,00 \text{ g HCl}) / (36,46 \text{ g HCl/mol HCl}) = 2,74 \times 10^{-1} \text{ mol HCl} = \text{mol H}$$

$$\text{moli O in H}_2\text{O} = 2,74 \times 10^{-1} \text{ mol H} / 2 = 1,37 \times 10^{-1} = \text{mol O} = 1,37 \times 10^{-1} \text{ mol H}_2\text{O}$$

$$1,37 \times 10^{-1} \text{ mol H}_2\text{O} = (1,37 \times 10^{-1} \text{ mol H}_2\text{O}) \times (18,02 \text{ g H}_2\text{O/mol H}_2\text{O}) = 2,47 \text{ g H}_2\text{O}$$

In un'altra soluzione ritenuta inconsistente, il calcolo delle moli di HCl è stato eseguito secondo il ragionamento riportato in figura 2.

$$\begin{aligned} \text{Se } 2\text{HCl} &= 10,00 \text{ g} & \text{HCl} &= 5,00 \text{ g} \\ \text{mol HCl} &= \frac{5,00 \text{ g}}{36,458 \text{ g/mol}} & &= 13,71 \cdot 10^{-2} \text{ mol HCl} \end{aligned}$$

Figura 2. Se $2\text{HCl} = 10,00 \text{ g}$, allora la massa di HCl diventa $5,00 \text{ g}$

Con l'intento di suggerire agli studenti in modo indiretto il ragionamento del calcolo stechiometrico necessario per risolvere in maniera corretta questo problema è stata successivamente presentata la metafora del panino e, poi, chiesto nuovamente di risolvere lo stesso problema. Praticamente tutti i gruppi hanno svolto un ragionamento risolutivo corretto, con qualche errore di calcolo o nell'uso delle cifre significative.

3. La metafora del panino

Consideriamo ora questo problema:

Si hanno a disposizione 10 fette di pane, 10 fette di salame e 10 foglie di lattuga; si confezionano panini con 2 fette di pane (F), 3 fette di salame (S) e 1 foglia di lattuga (L). Qual è il numero massimo di panini (P) che con questi ingredienti si possono fare?

In simboli, indicando con **p** la situazione prima del confezionamento e con **d** la situazione dopo aver prodotto i panini, si ha:

	2F	+	3S	+	L	→	P
p	10		10		10		0

l'esperienza ci dice che si possono avere tre panini, non 4; altrimenti la quantità S diverrebbe negativa, mentre la necessità fisica impone che la massa non sia negativa. Allora, quale è il numero di panini che rende nulla la quantità di uno (o più) reagenti? Indichiamo con **r** le operazioni che formano il panino: per ogni **r** si ha un panino prodotto. L'espressione formale indica che, per ogni panino, F diminuisce di 2 unità, S di 3 unità e L diminuisce di 1 unità. Utilizzando il formalismo adottato, possiamo scrivere:

	2F	+	3S	+	L	→	P
p	10		10		10		0
d	$10 - 2r$		$10 - 3r$		$10 - r$		r

Il valore di **r** viene calcolato imponendo il limite fisico:

$$10 - 2r \geq 0$$

$$10 - 3r \geq 0$$

$$10 - r \geq 0$$

Il valore $r = 10/3 = 3,3$ soddisfa le tre disequazioni. Si ottengono perciò 3,3 panini ($r = 3,3$) e, dopo aver confezionato tutti i panini possibili, si ha la situazione rappresentata dall'ultima riga della tabella:

	2F	+	3S	+	L	→	P
p	10		10		10		0
d	$10 - 2r$		$10 - 3r$		$10 - r$		r
d	3,4		0		6,7		3,3

Il componente S, che per primo va a zero, in una reazione chimica è il *reagente limitante*. La quantità massima di prodotto che si può ottenere in una certa reazione è stabilita dal reagente limitante e non dipende dai componenti F ed L che sono in eccesso. Per poter fare un ragionamento quantitativo sulle reazioni chimiche è, pertanto, necessario identificare prima di tutto il reagente limitante.

Ovviamente un ragionamento analogo può essere fatto in tutte le situazioni ove esiste una relazione stechiometrica. L'uso di questa analogia si è dimostrato negli anni sufficiente ed efficace per introdurre il concetto del reagente limitante e per fare padroneggiare agli studenti il calcolo stechiometrico [36].

4. Altre soluzioni con altri errori

Vengono riportati i risultati della soluzione del problema (1), scegliendo due corsi con risultati simili e piuttosto elevati nel test GALT (Group Assessment of Logical Thinking) [37]. Questo test, il cui punteggio massimo è 24, è ritenuto affidabile nel predire il successo in chimica [38, 39]. Per il corso A, composto da 48 studenti (16 donne e 32 uomini), il punteggio medio nel GALT è $17,79 \pm 3,30$ (da 10 a 24), mentre per il corso B, composto da 91 studenti (5 donne e 86 uomini), il punteggio medio nel GALT è $17,08 \pm 4,55$ (da 5 a 23).

Questi studenti, risolvendo il problema in gruppi cooperativi, hanno prodotto 47 soluzioni. Tra queste, 4 soluzioni sono risultate corrette e soddisfano la verifica, 7 soluzioni sono inconsistenti o incomplete, 24 soluzioni hanno trovato 20,00 g di prodotti. Questo è un errore tra i più ricorrenti e una delle strategie usate nella soluzione è quella di calcolare i grammi di Na_2 , C, e O_3 , contenuti in 10,00 g di Na_2CO_3 , e i grammi di H e Cl in 10,00 g di HCl. Poi, le quantità di ciascuno dei prodotti vengono ottenute sommando quanto calcolato in precedenza, come riportato in figura 3.

$$\text{g di } 2\text{NaCl} = 14,06 \text{ g} = 9,72 + 4,34$$

Figura 3. Calcolo della quantità di '2' NaCl, come somma dei grammi di Na e Cl dei reagenti

Un altro errore ricorrente, che compare in 5 soluzioni, è quello di considerare 30,00 g di reagenti; 10,00 g di HCl diventano 20,00 g per via del coefficiente 2 nell'equazione bilanciata (Figura 4).

$$\begin{aligned} \text{moli di HCl} &= \frac{10 \text{ g}}{36,46 \text{ g/mol}} = 0,274 \text{ moli} \\ \text{moli di } 2\text{HCl} &= 0,274 \text{ mol} \cdot 2 = 0,548 \text{ moli} \end{aligned}$$

Figura 4. Moli di '2' HCl, raddoppiate a causa del coefficiente 2 nell'equazione bilanciata

Da 20,00 g di reagenti come è possibile formare 41,39 g di prodotti? In 4 delle soluzioni prodotte è avvenuto questo "miracolo"; un esempio è riportato in figura 5.

$$\begin{array}{l}
 \text{Na}_2\text{CO}_3 + 2\text{HCl} \\
 \frac{10,09}{166} = 0,0943 \quad \frac{10}{79,92} = 0,1371 = 0,2314 \text{ mol} \\
 58,44 + 18,02 + 44,01 = 178,92 \\
 178,92 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 0,2314 \text{ mol} = 41,399 \text{ g}
 \end{array}$$

Figura 5. Secondo questo procedimento stringato, la massa dei prodotti è 41,399 g

La somma delle moli che compare in altre 3 soluzioni, può dare luogo a ulteriori risultati (Figura 6).

$$\begin{array}{l}
 n_{(\text{NaCl})} = \frac{58,44}{178,92} \rightarrow n_{(\text{NaCl})} = 0,12 \text{ moli} \\
 n_{(\text{H}_2\text{O})} = \frac{18,02}{178,92} \rightarrow n_{(\text{H}_2\text{O})} = 0,03 \text{ moli} \\
 n_{(\text{CO}_2)} = \frac{44,01}{178,92} \rightarrow n_{(\text{CO}_2)} = 0,089 \text{ moli} \\
 m_{(\text{NaCl})} = n_{(\text{NaCl})} \cdot 58,44 = 7,01 \text{ g} \\
 m_{(\text{H}_2\text{O})} = n_{(\text{H}_2\text{O})} \cdot 18,02 = 0,54 \text{ g} \\
 m_{(\text{CO}_2)} = n_{(\text{CO}_2)} \cdot 44,01 = 3,91 \text{ g}
 \end{array}$$

Figura 6. Dopo aver fatto la somma delle moli dei reagenti, è stato utilizzato un procedimento “fantasioso” per il calcolo dei prodotti

Da quanto ora visto risulta che per gli studenti che hanno conseguito il diploma della scuola superiore le conoscenze (o il loro ricordo) del calcolo stechiometrico sono piuttosto limitate. A ulteriore prova viene riportato quanto viene affermato in un'altra soluzione ritenuta inconsistente: “Divido il numero di moli per il numero di atomi presenti nella molecola” (Figura 7).

$$\begin{array}{l}
 \text{Divido il numero di moli per il numero di atomi presenti nella molecola:} \\
 0,09 : 6 = 0,015 \quad 0,27 : 4 = 0,068
 \end{array}$$

Figura 7. Il numero di atomi è 6 per Na_2CO_3 e 4 per 2HCl

Una lista contenente anche altri errori commessi nella soluzione di questo problema è stata in precedenza riportata [40]. Si può, perciò, affermare che tutti gli studenti ricordano la legge della conservazione della massa, ma la maggior parte non ricorda il ragionamento appreso per applicarla in modo corretto e presenta robuste lacune nel padroneggiare la logica chimica.

5. La stima e il processo di verifica

Sono state inoltre evidenziate le differenze tra la capacità di risolvere i problemi da parte di un esperto e di un novizio [41], fra le quali esistono due differenze significative importanti. L'esperto, infatti, è in grado 1) di eseguire l'analisi del problema in modo più completo, pianificando la

risoluzione prima di iniziare a svolgere i calcoli, e 2) di usare strategie risolutive più potenti e in maniera più efficace rispetto agli studenti. La sicurezza con la quale un esperto affronta un problema (esercizio) deriva dal fatto che già conosce l'ordine di grandezza del risultato e, in modo più o meno conscio, esegue continuamente la verifica rispetto ai risultati che ottiene nei vari passaggi. Perciò la stima del risultato dovrebbe costituire un altro strumento logico a disposizione dello studente.

Dal libro che gli studenti utilizzano per il calcolo stechiometrico si legge:

“Vengono riportate alcune osservazioni logiche, che possono aiutare gli studenti a stabilire una risposta stimata. Il numero di moli (n) può essere minore, maggiore o uguale a 1, a seconda dei grammi e del peso molecolare; se i grammi sono minori del peso molecolare, n deve risultare minore di 1; dall'applicazione della legge di Boyle a una compressione, deve risultare una diminuzione di volume; il numero di atomi (o di molecole) in un qualunque campione, piccolo a piacere, dovrà risultare un numero enorme, perché proporzionale alla costante di Avogadro. ... Ancora, il peso molecolare medio sarà compreso tra quello del componente con peso molecolare minore e quello del componente con peso molecolare maggiore: nel caso che il miscuglio sia formato da due componenti, il valore del peso molecolare medio deve risultare essere più vicino a quello del componente presente in numero di moli maggiore. ... In una reazione chimica, le masse dei prodotti non possono mai essere maggiori di quelle dei reagenti; le variazioni dovute alle proprietà colligative sono in genere “piccole”, comunque proporzionali al numero di moli. Per gli equilibri, il valore della costante è decisivo per stabilire l'ordine di grandezza del grado di avanzamento della reazione; $K \gg 1$, indica che la reazione va a completamento. In ogni caso il valore di r , moli di reazione che avvengono [42], deve essere compreso in un intervallo numerico che lo studente è sempre in grado di determinare. Nel caso $K \ll 1$, ci si deve attendere valori di r molto piccoli. Queste semplici osservazioni logiche, che dovranno essere rilette a tempo debito, possono aiutare lo studente a evitare errori numerici nella risoluzione del problema e con la verifica potrà confermare che il risultato ottenuto è corretto” [43].

Vediamo ora la soluzione completa del problema (1), con il processo della verifica.

La reazione che avviene è la seguente:



La verifica dell'equazione bilanciata si fa con la tabella del bilanciamento:

Atomo	Na	C	O	H	Cl
Reagenti	2	1	3	2	2
Prodotti	2	1	3	2	2

Poiché l'equazione chimica bilanciata indica il numero delle moli di reazione, si calcola questo numero per quanto riguarda i reagenti che vengono mescolati:

$$\text{Moli di Na}_2\text{CO}_3 \text{ contenute in } 10,00 \text{ g} = (10,00 \text{ g Na}_2\text{CO}_3) / (106,0 \text{ g Na}_2\text{CO}_3 / \text{mol Na}_2\text{CO}_3) = 9,434 \times 10^{-2} \text{ mol Na}_2\text{CO}_3$$

$$\text{Moli di HCl contenute in } 10,00 = (10,00 \text{ g HCl}) / (36,46 \text{ g HCl} / \text{mol HCl}) = 2,743 \times 10^{-1} \text{ mol HCl}$$

A questo punto, occorre identificare il reagente limitante e, quindi, calcolare le moli di reazione che avvengono.

Indicando con **p** la situazione prima che la reazione abbia luogo e con **d** la situazione dopo che la reazione è avvenuta, si ha:

	Na_2CO_3	+	2HCl	$\longrightarrow$	2NaCl	+	CO_2	+	H_2O
p	$9,434 \times 10^{-2}$		$2,743 \times 10^{-1}$		0		0	0	0
d	$9,434 \times 10^{-2} - r$		$2,743 \times 10^{-1} - 2r$		$2r$		r		r

Poiché r rappresenta le moli di reazioni che avvengono il suo campo di esistenza è: $0 < r \leq 9,434 \times 10^{-2}$. Il valore si determina imponendo le condizioni:

$$9,434 \times 10^{-2} - r \geq 0$$

$$2,743 \times 10^{-1} - 2r \geq 0$$

Il valore $r = 9,434 \times 10^{-2}$ soddisfa entrambe le disequazioni e, pertanto il carbonato di sodio è il reagente limitante.

Avvengono $9,434 \times 10^{-2}$ moli di reazione e dopo, che la reazione è avvenuta, si ha la situazione descritta dall'ultima riga della tabella sotto riportata.

	Na_2CO_3	+	2HCl	$\longrightarrow$	2NaCl	+	CO_2	+	H_2O
p	$9,434 \times 10^{-2}$		$2,743 \times 10^{-1}$		0		0	0	0
d	$9,434 \times 10^{-2} - r$		$2,743 \times 10^{-1} - 2r$		$2r$		r		r
d	0		$8,562 \times 10^{-2}$		$1,887 \times 10^{-1}$		$9,434 \times 10^{-2}$		$9,434 \times 10^{-2}$

È ora possibile calcolare le quantità ottenute dei vari prodotti

$$1,887 \times 10^{-1} \text{ mol NaCl} = (1,887 \times 10^{-1} \text{ mol NaCl}) \times (58,44 \text{ g NaCl/mol NaCl}) = 11,03 \text{ g NaCl}$$

$$9,434 \times 10^{-2} \text{ mol CO}_2 = (9,434 \times 10^{-2} \text{ mol CO}_2) \times (44,01 \text{ g CO}_2/\text{mol CO}_2) = 4,152 \text{ g CO}_2$$

$$9,434 \times 10^{-2} \text{ mol H}_2\text{O} = (9,434 \times 10^{-2} \text{ mol H}_2\text{O}) \times (18,02 \text{ g H}_2\text{O/mol H}_2\text{O}) = 1,700 \text{ g H}_2\text{O}$$

Verifica

$$\text{Massa dei prodotti ottenuti} = 11,03 \text{ g NaCl} + 4,152 \text{ g CO}_2 + 1,700 \text{ g H}_2\text{O} = 16,88 \text{ g}$$

$$\text{Massa dei reagenti che hanno reagito: } 10,00 \text{ g Na}_2\text{CO}_3 + 6,879 \text{ g HCl} = 16,88 \text{ g}$$

Tenendo conto delle cifre significative, la verifica è soddisfatta.

La verifica del bilanciamento delle equazioni è un'operazione utile e necessaria per le reazioni più complesse e gli studenti possono gioire per aver superato qualche sfida e acquisito delle abilità, come risulta dalla figura 8. Lo studente esulta perché attraverso la tabella del bilanciamento ha la certezza di avere bilanciato in modo corretto una reazione redox che riteneva difficile. Questo successo contribuisce a sviluppare l'autoefficacia, costrutto importante per la riuscita accademica [44].

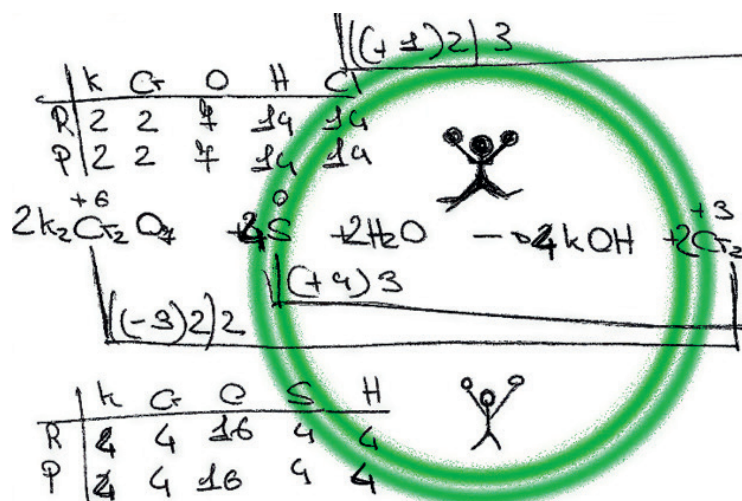


Figura 8. Uno studente esulta perché è riuscito a bilanciare una reazione redox

Non è sempre possibile eseguire una verifica numerica esaustiva e, allora, in questi casi vanno tenute presenti queste domande:

- 1) Ha senso questo risultato?
- 2) L'ordine di grandezza del risultato è ragionevole?
- 3) Sono corrette le unità di misura?

Ora vediamo un esempio di un processo di verifica non esaustivo.

Consideriamo il problema (2) che per molti studenti risulta essere difficile da risolvere [45].

Problema (2)

10,00 mL di una soluzione di H_2SO_4 al 2,485% in peso (densità 1,015 g/mL) vengono diluiti a 100,0 mL. Calcolare quanti millilitri di $NaOH$ $1,000 \times 10^{-2}$ M sono necessari per neutralizzare 20,00 mL della soluzione di H_2SO_4 prima preparata.

Nel tentativo di facilitare la soluzione corretta, è stato suggerito di risolvere prima il problema (3), analogo, ma con un carico cognitivo minore [46-48].

Problema (3)

10,00 mL di una soluzione contengono $5,044 \times 10^{-2}$ g di H_2SO_4 vengono diluiti a 100,0 mL. Calcolare quanti millilitri di $NaOH$ $1,000 \times 10^{-2}$ M sono necessari per neutralizzare 20,00 mL della soluzione di H_2SO_4 prima preparata.

Alcuni studenti hanno risolto soltanto uno dei problemi proposti; 65 soluzioni del problema (2) con 28 risultati sbagliati (da 2×10^{-3} mL a 1.870 mL) e 69 soluzioni del problema (3) con 28 risultati sbagliati (da 1,03 mL a 10.280 mL); 21 studenti hanno sbagliato le soluzioni di entrambi i problemi. Stimare l'ordine di grandezza del risultato in questi problemi è difficile anche per noi insegnanti; come è possibile eseguire una verifica per quanto possibile indipendente dalla soluzione trovata? Facciamo la verifica del problema (2), che, dall'analisi di migliaia di problemi risolti, è difficile da risolvere risulta correttamente da parte di molti studenti.

Risolvendo il problema con un procedimento analogo a quelli riportati nei testi di calcolo stechiometrico, il volume necessario di $NaOH$ $1,000 \times 10^{-2}$ M è 102,8 mL. La soluzione che segue è analoga a quella utilizzata da uno studente e suddivisa in diversi passaggi, commentati [45].

1. Calcolo dei grammi di soluzione (g slz) di H_2SO_4

Conoscendo il volume della soluzione e la sua densità, si può dire che:

$$g \text{ slz} = (10,00 \text{ mL slz}) \times (1,015 \text{ g slz / mL slz}) = 10,15 \text{ g slz}$$

2. Calcolo dei grammi di H_2SO_4 contenuti nella soluzione
Sapendo che la percentuale in peso è pari al 2,485%, si può dire che in 100,0 g di soluzione ci sono 2,485 g di H_2SO_4 , per cui con una proporzione si possono calcolare i grammi (x) di H_2SO_4 contenuti in 10,15 g slz:

$$100,0 \text{ g slz} : 2,485 \text{ g H}_2\text{SO}_4 = 10,15 \text{ g slz} : x \text{ g H}_2\text{SO}_4$$

$$x \text{ g H}_2\text{SO}_4 = 2,522 \times 10^{-1} \text{ g H}_2\text{SO}_4$$
3. Calcolo delle moli di H_2SO_4 contenute in 10,15 g slz (e in 10,00 mL slz)

$$\text{mol H}_2\text{SO}_4 = (2,522 \times 10^{-1} \text{ g H}_2\text{SO}_4) / (98,09 \text{ g H}_2\text{SO}_4 / \text{mol H}_2\text{SO}_4) = 2,571 \times 10^{-3} \text{ mol H}_2\text{SO}_4$$
4. Calcolo delle moli di H_2SO_4 contenute in 20,00 mL di soluzione
Poiché il numero di moli di H_2SO_4 contenute in 10,00 mL è lo stesso nella soluzione diluita a 100,0 mL, allora nei 20,00 mL di soluzione considerati il numero di moli è pari a:

$$100,0 \text{ mL slz} : 2,571 \times 10^{-3} \text{ mol H}_2\text{SO}_4 = 20,00 \text{ mL slz} : x \text{ mol H}_2\text{SO}_4$$

$$x = 5,142 \times 10^{-4} \text{ mol H}_2\text{SO}_4$$
5. Calcolo delle moli di NaOH necessarie, tenendo presente che ‘neutralizzare’ è una parola del linguaggio chimico e significa “reagire completamente con”.
Per calcolare le moli necessarie si deve considerare la reazione che avviene tra H_2SO_4 e NaOH

$$\text{H}_2\text{SO}_4 + 2 \text{ NaOH} \longrightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2 \text{ H}_2\text{O}$$
Sapendo che H_2SO_4 è il reagente limitante, le moli di reazione (mol rzn) che avvengono sono pari a $5,142 \times 10^{-4} \text{ mol rzn}$, per cui, tenendo conto del rapporto stechiometrico, si ha:

$$\text{moli di NaOH} = (5,142 \times 10^{-4} \text{ mol rzn}) \times (2 \text{ mol NaOH} / 1 \text{ mol rzn}) = 1,028 \times 10^{-3} \text{ mol NaOH}$$
6. Calcolo del volume di NaOH necessario
Sapendo che la molarità della soluzione di NaOH è $1,000 \times 10^{-2} \text{ M}$ e ricordando che $M = n \text{ moli NaOH} / V \text{ (L slz)}$ e, quindi, anche che $V \text{ (L slz)} = n \text{ moli NaOH} / M$, si ottiene:

$$V \text{ (L slz)} = (1,028 \times 10^{-3} \text{ mol NaOH}) / (1,000 \times 10^{-2} \text{ mol NaOH} / \text{L slz}) = 1,028 \times 10^{-1} \text{ L} = 102,8 \text{ mL}$$

Suddividendo in più passaggi, spiegando, argomentando e rendendo visibile il ragionamento si diminuisce il carico cognitivo e si ha una traccia per controllare la connessione logica e verificare la correttezza del ragionamento. Per evitare il sovraccarico della memoria di lavoro gli studenti spesso ricorrono a una rappresentazione visiva del problema e un esempio è riportato nella figura 9.

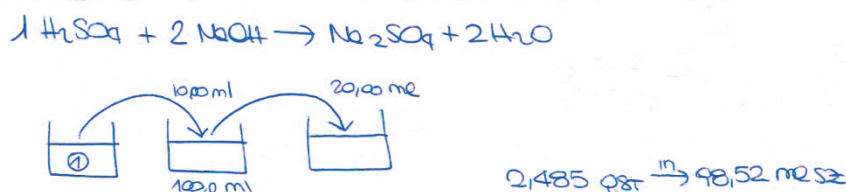


Figura 9. Rappresentazione di tre informazioni contenute nel problema; una rappresentazione corretta rende più facile il ragionamento poiché riduce il sovraccarico della memoria di lavoro

Di seguito è riportato un procedimento possibile per validare o falsificare questo risultato.
Quante sono le moli di NaOH contenute in 102,8 mL di soluzione $1,000 \times 10^{-2} \text{ M}$?

$$\text{Moli di NaOH} = (102,8 \text{ mL}) \times (1,000 \times 10^{-2} \text{ mol/L}) \times (10^{-3} \text{ L/mL}) = 1,028 \times 10^{-3} \text{ mol NaOH}$$

Avviene la reazione:



dal cui bilanciamento risulta che 2 moli NaOH reagiscono con 1 mole H_2SO_4 ; in termini più formali possiamo scrivere la relazione come rapporto stechiometrico 1 mol $\text{H}_2\text{SO}_4 \sim 2 \text{ mol NaOH}$. Il rapporto

stechiometrico è uno dei tre passaggi in cui vengono commessi più errori logici. In questo studio, la metà o il doppio del risultato corretto compare 7 volte nelle soluzioni del problema (2) e 11 volte nelle soluzioni del problema (3); viene così dimostrata l'importanza dell'uso appropriato dei fattori di conversione e dei rapporti stechiometrici [49].

Ora è necessario conoscere le moli di H_2SO_4 che reagiscono completamente con $1,028 \times 10^{-3}$ mol NaOH, usando il corretto rapporto stechiometrico (rs), cioè $rs = 1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4 / 2 \text{ mol NaOH}$:

$$\text{Moli di H}_2\text{SO}_4 \text{ necessarie} = (1,028 \times 10^{-3} \text{ mol NaOH}) \times (1 \text{ mol H}_2\text{SO}_4 / 2 \text{ mol NaOH}) = 5,140 \times 10^{-4} \text{ mol H}_2\text{SO}_4$$

Per validare o falsificare il risultato ottenuto, dobbiamo riferirci al problema (2) e calcolare le moli di H_2SO_4 presenti in 100,0 mL della soluzione al 2,485% in peso e densità 1,015 g/mL.

Notiamo che, per effetto della diluizione, la quantità di H_2SO_4 presente in 100,0 mL è la stessa che in 10,00 mL e siccome si utilizzano solo 20,00 mL della soluzione diluita, questo equivale a considerare 1/5 dei 10,00 mL iniziali: è come se la soluzione iniziale fosse 2,000 mL *slz* (*slz* sta per soluzione e sottolinea il fatto che non si riferisce al solo H_2SO_4).

Pertanto, i 20,00 mL della soluzione diluita contengono la stessa quantità di H_2SO_4 presente in 2,000 mL della soluzione iniziale e per calcolare la massa di questa soluzione, si usa la densità come fattore di conversione:

$$2,000 \text{ mL slz} = (2,000 \text{ mL slz}) \times (1,015 \text{ g slz/mL slz}) = 2,030 \text{ g slz H}_2\text{SO}_4 \text{ (soluzione al 2,485\% in peso)}$$

Infine, per calcolare la massa di H_2SO_4 assoluto, si applica la proporzione:

$$100,0 \text{ g slz} : 2,485 \text{ g H}_2\text{SO}_4 = 2,030 \text{ g slz} : x \text{ g H}_2\text{SO}_4$$

$$x = 5,044 \times 10^{-2} \text{ g H}_2\text{SO}_4 \equiv 5,143 \times 10^{-4} \text{ mol H}_2\text{SO}_4$$

Concludendo, nei 20,00 mL della soluzione diluita sono presenti $5,143 \times 10^{-4}$ mol H_2SO_4 , valore coincidente (entro gli arrotondamenti) con quello ricavato precedentemente, pari a $5,140 \times 10^{-4}$ mol H_2SO_4 . Questa verifica, ancorché non esaustiva, avrebbe permesso di non considerare come corrette diverse soluzioni con errori concettuali. Viene consigliato di utilizzare per la densità le dimensioni grammi di soluzione per mL di soluzione (g *slz*/mL *slz*), un accorgimento che può aiutare gli studenti a evitare un errore comune, ovvero quello di considerare la massa della soluzione come coincidente con quella del soluto.

6. Equilibri ionici

Si riporta ora un ultimo esempio per illustrare la verifica nel caso dei problemi sugli equilibri chimici, considerando il caso degli equilibri ionici. Oltre al bilancio di massa e la verifica della costante di equilibrio, per i problemi sugli equilibri ionici è necessario controllare il bilancio di carica. Il metodo generale per risolvere questo tipo di problemi con vari esempi di calcolo si può trovare in un articolo pubblicato su *CnS* [50].

L'uso di questo metodo per i problemi sugli equilibri ionici permette di risolvere i problemi attraverso un ragionamento chimico e di ottenere risultati con errore relativo inferiore all'1%. Tale metodo viene illustrato considerando il calcolo del pH di un acido poliprotico; esempi simili si possono trovare anche nei testi di chimica generale [51, 52].

Problema (4)

Calcolare il pH di una soluzione ottenuta aggiungendo 99,0 mL di NaOH 0,100 M a 50,0 mL di H_2CO_3 (CO_2 disciolta in acqua) 0,100 M, nell'ipotesi che i volumi siano additivi. ($K_{a1} = 4,31 \times 10^{-7}$ M; $K_{a2} = 5,60 \times 10^{-11}$ M)

Le moli della base reagiscono con quelle dell'acido in base a due reazioni successive.

Per quanto riguarda la prima reazione, indicando con **p** la situazione iniziale e con **d** quella a fine processo, si ha:

	H_2CO_3	+	NaOH	$\longrightarrow$	NaHCO_3	+	H_2O
<i>p</i>	$5,00 \times 10^{-3}$		$9,99 \times 10^{-3}$		0		0
<i>d</i>	0		$4,90 \times 10^{-3}$		$5,00 \times 10^{-3}$		$5,00 \times 10^{-3}$

Considerando ora la seconda reazione e indicando con ***p'*** la situazione all'inizio di tale processo e ***d'*** a reazione avvenuta, si ha:

	NaHCO_3	+	NaOH	$\longrightarrow$	Na_2CO_3	+	H_2O
<i>p'</i>	$5,00 \times 10^{-3}$		$4,90 \times 10^{-3}$		0		0
<i>d'</i>	$1,00 \times 10^{-4}$		0		$4,90 \times 10^{-3}$		$4,90 \times 10^{-3}$

A seguito del mescolamento dei due reagenti, il volume totale è:

$$V_{\text{tot}} = 99,0 \text{ mL} + 50,0 \text{ mL} = 149,0 \text{ mL}$$

Le concentrazioni di HCO_3^- e CO_3^{2-} sono pertanto:

$$[\text{NaHCO}_3] = 1,00 \times 10^{-4} \text{ mol} / 1,49 \times 10^{-1} \text{ L} = 6,71 \times 10^{-4} \text{ M} = [\text{HCO}_3^-]$$

$$[\text{Na}_2\text{CO}_3] = 4,90 \times 10^{-3} \text{ mol} / 1,49 \times 10^{-1} \text{ L} = 3,29 \times 10^{-2} \text{ M} = [\text{CO}_3^{2-}]$$

La presenza di HCO_3^- e CO_3^{2-} fa supporre la presenza di una soluzione tampone e si procede al calcolo del pH con l'equazione di Henderson-Hasselbalch:

$$[\text{H}^+] = K_{\text{a}2} [\text{HCO}_3^-] / [\text{CO}_3^{2-}] = 1,14 \times 10^{-12} \text{ M}$$

Il pH della soluzione tampone è, pertanto, 11,94

La verifica del risultato ottenuto può essere fatta attraverso il calcolo delle concentrazioni molari delle specie ioniche positive e negative presenti in soluzione:

$$[\text{Na}^+] = (9,90 \times 10^{-3} \text{ mol}) / (1,49 \times 10^{-1} \text{ L}) = 6,64 \times 10^{-2} \text{ M}$$

$$[\text{OH}^-] = K_{\text{w}} / [\text{H}^+] = 8,77 \times 10^{-3} \text{ M}$$

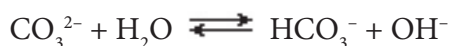
$$[\text{Na}^+] + [\text{H}^+] = 6,64 \times 10^{-2} + 1,14 \times 10^{-12} = 6,64 \times 10^{-2} \text{ M}$$

$$[\text{OH}^-] + [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] = 8,77 \times 10^{-3} + 6,71 \times 10^{-4} + 2 \times 3,29 \times 10^{-2} = 7,53 \times 10^{-2} \text{ M}$$

Dai calcoli effettuati si evince che la condizione di elettro-neutralità della soluzione non è verificata:

$$[\text{Na}^+] + [\text{H}^+] \neq [\text{OH}^-] + [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}]$$

Pertanto, la soluzione trovata non può essere accettata. Lo studente, riflettendo su quanto ha studiato si rende conto che in una soluzione contenente NaHCO_3 e Na_2CO_3 si stabiliscono diversi equilibri, che vanno tutti considerati, incominciando con l'equilibrio che ha il valore di K maggiore, cioè quello relativo alla reazione di idrolisi dello ione carbonato:



Se nella reazione si producono $r \text{ mol L}^{-1}$ di OH^- , indicando con ***i*** la situazione all'inizio (non equilibrio) e con ***e*** la situazione all'equilibrio, si ha:

	CO_3^{2-}	+	H_2O	$\rightleftharpoons$	HCO_3^-	+	OH^-
<i>i</i>	$3,29 \times 10^{-2}$				$6,71 \times 10^{-4}$		0
<i>e</i>	$3,29 \times 10^{-2} - r$				$6,71 \times 10^{-4} + r$		<i>r</i>

La soluzione numerica comporta che *r* deve essere compreso nell'intervallo $0 < r < 3,29 \times 10^{-2}$ M. Per questo equilibrio vale la costante di idrolisi K_{h2} :

$$K_{h2} = [\text{HCO}_3^-] \times [\text{OH}^-] / [\text{CO}_3^{2-}] = K_w / K_{a2} = 1,78 \times 10^{-4} \text{ M}$$

$$K_{h2} = (6,71 \times 10^{-4} + r) \times (r) / (3,29 \times 10^{-2} - r) = 1,78 \times 10^{-4} \text{ M}$$

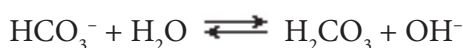
Risolvendo l'equazione si ottiene:

$$r = [\text{OH}^-] = 2,03 \times 10^{-3} \text{ M}$$

$$[\text{HCO}_3^-] = 2,70 \times 10^{-3} \text{ M}$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = 3,08 \times 10^{-2} \text{ M}$$

Ora va considerato il seguente equilibrio:



Per questo equilibrio, $K_{h1} = [\text{H}_2\text{CO}_3] \times [\text{OH}^-] / [\text{HCO}_3^-] = K_w / K_{a1}$

Se per raggiungere l'equilibrio si producono *s* mol L⁻¹ di OH⁻, si ha:

Quindi:

	HCO_3^-	+	H_2O	$\rightleftharpoons$	H_2CO_3	+	OH^-
<i>i</i>	$2,70 \times 10^{-3}$				0		$2,03 \times 10^{-3}$
<i>e</i>	$2,70 \times 10^{-3} - s$				<i>s</i>		$2,03 \times 10^{-3} + s$

$$K_{h1} = (2,03 \times 10^{-3} \text{ M} + s \text{ M}) \times (s \text{ M}) / (2,70 \times 10^{-3} \text{ M} - s \text{ M}) = 2,32 \times 10^{-8} \text{ M}$$

La soluzione numerica comporta che *s* debba essere compreso nell'intervallo $0 < s < 2,70 \times 10^{-3}$ M, per cui:

$$s = [\text{H}_2\text{CO}_3] = 3,09 \times 10^{-8} \text{ M}$$

$$[\text{HCO}_3^-] = (2,70 \times 10^{-3} - s) \text{ M} = 2,70 \times 10^{-3} \text{ M} \text{ (il valore di } s, \text{ pari a } 3,09 \times 10^{-8} \text{ M, è trascurabile)}$$

$$[\text{OH}^-] = (2,03 \times 10^{-3} + s) \text{ M} = 2,03 \times 10^{-3} \text{ M} \text{ (il valore di } s, \text{ pari a } 3,09 \times 10^{-8} \text{ M, è trascurabile)}$$

Considerando ora la dissociazione dell'acqua e ammettendo che per raggiungere l'equilibrio si producano *t* mol L⁻¹ di H⁺, si ha:

	H_2O	$\rightleftharpoons$	H^+	+	OH^-
<i>i</i>			0		$2,03 \times 10^{-3}$
<i>e</i>			<i>t</i>		$2,03 \times 10^{-3} + t$

La soluzione numerica comporta che t deve essere compreso nell'intervallo $0 < t < 1,00 \times 10^{-7} \text{ M}$ e il suo valore è ottenuto risolvendo la seguente equazione:

$$K_w = [\text{H}^+] \times [\text{OH}^-] = (t) \times (2,03 \times 10^{-3} + t) = 1,00 \times 10^{-14} \text{ M}^2$$

$t = [\text{H}^+] = 4,93 \times 10^{-12} \text{ M}$ (soluzione ricavata considerando trascurabile il contributo t alla concentrazione di OH^-)

$$\text{pH} = 11,31$$

Questa volta la soluzione è corretta?

Per verificare il risultato ottenuto si può procedere come segue.

- Determinazione dell'elettro-neutralità della soluzione:

$$[\text{Na}^+] + [\text{H}^+] = 6,64 \times 10^{-2} \text{ M}$$

$$[\text{OH}^-] + [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] = 6,63 \times 10^{-2} \text{ M}$$

- Calcolo delle costanti di dissociazione acida:

$$[\text{H}^+] \times [\text{HCO}_3^-] / [\text{H}_2\text{CO}_3] = 4,31 \times 10^{-7} \text{ M}$$

$$[\text{H}^+] \times [\text{CO}_3^{2-}] / [\text{HCO}_3^-] = 5,62 \times 10^{-11} \text{ M}$$

- Calcolo del bilancio di massa:

$$[\text{H}_2\text{CO}_3] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] = 3,35 \times 10^{-2} \text{ M}$$

$$C_a = \text{concentrazione totale dell'acido} = (5,00 \times 10^{-3} \text{ mol H}_2\text{CO}_3) / (1,49 \times 10^{-1} \text{ L}) = 3,36 \times 10^{-2} \text{ M}$$

La soluzione è accettabile e l'errore relativo che si avrebbe con l'uso dell'equazione di Henderson-Hasselbalch è del 76,8%.

Ma come sarebbe possibile scoprire che il valore trovato non è accettabile, in assenza della verifica? In genere, in Chimica Generale, ma anche in Chimica Analitica, nei calcoli relativi agli equilibri ionici viene utilizzata la regola dell'approssimazione del 5% [53-56]; errori superiori andrebbero evitati, anche per non dare cattivo esempio agli studenti. La verifica dei calcoli è una procedura utile anche per chi insegna; due libri di testo riportano lo stesso problema con gli stessi dati (la concentrazione di tutte le specie in una soluzione di acido fosforico 0,100 M), ma i due risultati sono molto diversi: $[\text{HPO}_4^{2-}] = 6,2 \times 10^{-8} \text{ M}$ in un caso [57] e $1,96 \times 10^{-7} \text{ M}$ nell'altro [58], tanto da differire del 216%.

7. Conclusioni

Esiste da tempo un dibattito sulla valorizzazione degli errori e sull'errore produttivo [59]. L'applicazione del metodo didattico dell'errore produttivo alla risoluzione dei problemi prevede due fasi: una prima fase di generazione di soluzioni anche sbagliate, seguita da una fase di istruzione diretta, ove viene insegnato il procedimento corretto. L'obiettivo è quello di dare agli studenti l'opportunità di usare le conoscenze pregresse, sia formali che intuitive, e le risorse a loro disposizione per produrre soluzioni a un problema, anche complesso, un problema che richiede passaggi o procedure che gli studenti non hanno ancora appreso [60].

Affinché un errore abbia degli aspetti didattici positivi è necessario che chi lo commette abbia la consapevolezza di aver sbagliato [61, 62]. Questo può avvenire se un esperto lo evidenzia correggendo il procedimento, oppure se la verifica mette in evidenza un risultato sbagliato (Figura 10).

$$\left\{ \begin{array}{l} K_a = 8,347 \cdot 10^{-7} \text{ M} \\ K_a = \frac{8,465 \cdot 10^{-7} \cdot 8,347 \cdot 10^{-7}}{(8,750 - 8,347) \cdot 10^{-7}} = 175,33 \cdot 10^{-7} = 1,753 \cdot 10^{-9} \text{ M} \end{array} \right.$$

a) DOVE SBAGLIO?

b) ci sono ERRORI CONCETTUALI??

Figura 10. Lo studente ha risolto correttamente l'esercizio, ma nella fase della verifica trova un valore della K_a diverso da quello aspettato per un errore di conversione; riporta, infatti $175,3 \times 10^{-7} = 1,753 \times 10^{-9}$ invece di $175,3 \times 10^{-7} = 1,753 \times 10^{-5}$ (valore atteso)

Quanto appare nella figura 10 non va sottovalutato; lo studente è profondamente coinvolto nel processo risolutivo e dalla verifica è in qualche modo costretto a mettere in dubbio la propria soluzione. Deve andare alla ricerca dell'errore nei passaggi e rivedere il suo ragionamento. Nello studente che esegue la verifica possiamo riconoscere uno studente motivato e desideroso di migliorare le proprie abilità nel problem solving. La verifica offre allo studente la possibilità di scoprire i propri errori, senza l'intervento di un esperto, e con l'esercizio è in grado di sviluppare in modo autonomo le proprie abilità e competenze nella soluzione dei problemi. Un risultato formativo notevole di qualunque processo educativo.

Ringraziamenti

Ringrazio un anonimo revisore che mi ha permesso di correggere qualche errore di calcolo e per i suggerimenti che hanno migliorato la qualità dell'articolo.

Riferimenti bibliografici

- [1] D. R. Krathwohl, A Revision of Bloom's Taxonomy: An Overview, *Theory Into Practice*, 2002, **41**, 212-218.
- [2] G. Tsaparlis, U. Zoller, M. Fastow, A. Lubezky, Students' Self-Assessment in Chemistry Examinations Requiring Higher- and Lower-Order Cognitive Skills, *Journal of Chemical Education*, 1999, **76**, 112-113.
- [3] R. S. Nickerson, D. N. Perkins, E. E. Smith, *The teaching of thinking*, Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1985, p. 323.
- [4] J. R. Anderson, *Cognitive psychology and its implications*, Fourth Ed., W. H. Freeman, New York, 1995, p. 237.
- [5] D. H. Jonassen, *Learning to solve problems: a handbook for designing problem-solving learning environments*, Routledge, New York, 2011, p. xvii-xviii.
- [6] H. Buff, *Stöchiometrie. Ein leitfaden zur kenntniss und anwendung der lehre von den bestimmten chemischen proportionen*. Campeschen Officin, Nürnberg, 1829.
- [7] H. Kramers-Pals, J. Lambrechts, P. J. Wolff, Recurrent difficulties: Solving quantitative problems. *Journal of Chemical Education*, 1982, **59**, 509-513.
- [8] M. Frazer, R. Sleet, A study of students' attempts to solve chemical problems, *European Journal of Science Education*, 1984, **6**, 141-152.
- [9] D. Gabel, K. Samuel, High school students' ability to solve molarity problems and their analogue counterparts, *Journal of Research in Science Teaching*, 1986, **23**, 165-176.
- [10] J. D. Herron, T. J. Greenbowe, What can we do about Sue: A case study of competence, *Journal of Chemical Education*, 1986, **63**, 528-531.
- [11] M. Niaz, The relationship between M-demand, algorithms, and problem solving: A neo-piagetian analysis, *Journal of Chemical Education*, 1989, **66**, 422-424.
- [12] G. M. Bodner, I have found you an argument: The conceptual knowledge of beginning chemistry graduate students, *Journal of Chemical Education*, 1991, **68**, 385-388.
- [13] J. Cohen, M. Kennedy-Justice, et al., Encouraging meaningful quantitative problem solving, *Journal of Chemical Education*, 2000, **77**, 1166-1173.
- [14] A. H. Johnstone, Can problem solving be taught? *University Chemistry Education*, 2001, **5**, 69-73.
- [15] G. M. Bodner, J. D. Herron, Problem-solving in chemistry. In J. K. Gilbert, O. De Jong, R. Justi, D. F. Treagust, J. H. Van Driel (a cura di), *Chemical education: Towards research-based practice* (pp 235-266). Kluwer, New York, 2003.
- [16] M. S. Cracolice, J. C. Deming, B. Ehlert, Concept learning versus problem solving: A cognitive difference, *Journal of Chemical Education*, 2008, **85**, 873-878.
- [17] A. L. Chandrasegaran, D. F. Treagust, et al., Students' dilemmas in reaction stoichiometry problem solving: Deducing the limiting reagent in chemical reactions, *Chemistry Education Research and Practice*, 2009, **10**, 14-23.
- [18] M. C. Sostarecz, A. G. Sostarecz, A conceptual approach to limiting-reagent problems, *Journal of Chemical Education*, 2012, **89**, 1148-1151.

- [19] O. Gulacar, T. L. Overton, et al., A novel code system for revealing sources of students' difficulties with stoichiometry, *Chemistry Education Research and Practice*, 2013, **14**, 507-515.
- [20] E. Yuriev, S. Naidu, et al., Scaffolding the development of problem-solving skills in chemistry: Guiding novice students out of dead ends and false starts, *Chemistry Education Research and Practice*, 2017, **18**, 486-504.
- [21] M. Shadreck, O. C. Enunuwe, Recurrent difficulties: Stoichiometry problem-solving, *African Journal of Educational Studies in Mathematics and Sciences*, 2018, **14**, 25-31.
- [22] K. Vo, M. Sarkar, et al., Problem solving in chemistry supported by metacognitive scaffolding: teaching associates' perspectives and practices, *Chemistry Education Research and Practice*, 2022, **23**, 436-451.
- [23] G. Polya, *How to Solve it. A New Aspect of Mathematical Method*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1973, p. xvii.
- [24] A. H. Schoenfeld, *Mathematical problem solving*, Academic Press, New York, 1985.
- [25] P. Liljedahl, M. Santos-Trigo (a cura di), *Mathematical Problem Solving. Current Themes, Trends, and Research*, Springer Nature, Cham, Switzerland, 2019.
- [26] D. J. Herron, *The chemistry classroom: Formulas for successful teaching*, American Chemical Society, Washington, DC, 1996, pp. 73-75.
- [27] D. Frank, Implementing instruction to improve the problem-solving abilities of general chemistry students (Doctoral dissertation, Purdue University, 1985). *Dissertation Abstracts International*, 1986, **47**(1), 141-A.
- [28] C. S. Dweck, Motivational processes affecting learning, *American Psychologist*, 1986, **41**, 1040-1048.
- [29] K. Amrai, S. E. Motlagh, et al., The relationship between academic motivation and academic achievement students, *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 2011, **15**, 399-402.
- [30] C. Romero, A. Master, et al., Academic and emotional functioning in middle school: The role of implicit theories, *Emotion*, 2014, **14**, 227-234.
- [31] K. A. Renninger, S. E. Hidi, *The power of interest for motivation and engagement*. Routledge, New York, 2016.
- [32] R. M. Ryan, E. L. Deci, Intrinsic and extrinsic motivation from a self-determination theory perspective: Definitions, theory, practices, and future directions, *Contemporary Educational Psychology*, 2020, **61**, 101860.
- [33] R. Pekrun, H. W. Marsh, et al., School grades and students' emotions: Longitudinal models of within-person reciprocal effects, *Learning and Instruction*, 2023, **83**, 101626.
- [34] E. Santana-Monagas, F. Núñez-Regueiro, J. L. Núñez, Does motivation lead to academic success, or conversely? Reciprocal relations between autonomous and controlled motivation, and mathematics achievement, *British Journal of Educational Psychology*, 2025, **95**, 513-529.
- [35] Rif. 23, pp. 14-15.
- [36] L. Cardellini, *Strategie per il Problem Solving in Chimica*, Libreria Scientifica Ragni, Ancona, 2014, pp. 109-110.
- [37] V. Roadrangka, R. H. Yeany, M. J. Padilla, *The construction and validation of group assessment of logical thinking (GALT)*. Paper presented at the annual meeting of the National Association for Research in Science Teaching, Dallas, TX, 1983.
- [38] D. M. Bunce, K. D. Hutchinson, The use of the GALT (Group Assessment of Logical Thinking) as a predictor of academic success in College Chemistry, *Journal of Chemical Education*, 1993, **70**, 183-187.
- [39] L. Bird, Logical reasoning ability and student performance in general chemistry, *Journal of Chemical Education*, 2010, **87**, 541-546.
- [40] Rif. 36, pp. 13-14.
- [41] M. T. H. Chi, R. Glaser, Overview, in M. T. H. Chi, R. Glaser, M. J. Farr (a cura di), *The Nature of Expertise* (pp. xv-xxviii). Lawrence Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1988.

- [42] L. Cardellini, Moli di reazione che avvengono: un concetto utile nella stechiometria, *La Chimica nella Scuola*, 1995, **17**, 19-21.
- [43] Rif. 36, pp. 26-27.
- [44] D. H. Schunk, F. Pajares, The Development of Academic Self-Efficacy. In A. Wigfield, J. S. Eccles (a cura di), *Development of Achievement Motivation* (pp. 15-31). Academic Press, San Diego, CA, 2002.
- [45] L. Cardellini, Ragionamenti fondamentali nel calcolo stechiometrico. Superare le difficoltà con la densità, *La Chimica nella Scuola*, 2019, **41**, 25-83.
- [46] G. A. Miller, The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information, *Psychological Review*, 1956, **63**, 81-97.
- [47] A. H. Johnstone, New stars for the teacher to steer by? *Journal of Chemical Education*, 1984, **61**, 847-849.
- [48] J. Sweller, P. Ayres, S. Kalyuga, *Cognitive Load Theory*, Springer, New York, 2011.
- [49] L. Cardellini, Fattori di conversione e rapporti stechiometrici: strumenti logici per la risoluzione dei problemi, *La Chimica nella Scuola*, 1996, **18**, 148-151.
- [50] L. Cardellini, Come risolvere i problemi sugli equilibri ionici, *La Chimica nella Scuola*, 2001, **23**, 84-90.
- [51] T. L. Brown, H. E. LeMay, et al., *Chemistry: The Central Science*, 14e, Pearson, Harlow (UK), 2018, pp. 732-733.
- [52] R. H. Petrucci, F. G. Herring, et al., *General Chemistry: Principles and modern applications*, 11th Ed., Pearson Canada, Ontario (Canada), 2017, Ch. 17.
- [53] Rif. 51, p. 727.
- [54] Rif. 52, p. 755.
- [55] J. N. Butler, *Ionic Equilibrium. A Mathematical Approach*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1964, p. vi.
- [56] J.-L. Burgot, *Ionic Equilibria in Analytical Chemistry*, Springer, New York, 2012, p. 88.
- [57] M. J. Sienko, *Equilibrium*, W. A. Benjamin, Inc., New York, 1964, p. 404.
- [58] P. Nylén, N. Wigren, *Stechiometria*, CEDAM, Padova, 1971, pp. 174-175.
- [59] M. Kapur, *Productive failure. Unlocking deeper learning through the science of failing*, Jossey-Bass, San Francisco, 2025.
- [60] M. Kapur, K. Bielaczyc, Classroom-based experiments in productive failure. In L. Carlson, C. Hölscher, T. Shipley (a cura di), *Proceedings of the 33rd annual conference of the Cognitive Science Society* (pp. 2812-2817), Cognitive Science Society, Austin, 2011.
- [61] L. Cardellini, J. Pascual-Leone, On mentors, cognitive development, education, and constructivism: An interview with Juan Pascual-Leone, *Journal of Cognitive Education and Psychology*, 2004, **4**, 199-219.
- [62] L. Cardellini, The foundations of radical constructivism: An interview with Ernst von Glasersfeld, *Foundations of Chemistry*, 2006, **8**, 177-187.

Archè: la chimica va in scena per raccontare l'evoluzione del concetto di elemento e di atomo

Marco Caruso

I.I.S. "G. Ruffini" di Imperia

e-mail: marco.caruso@ruffini.imperia.it

Abstract. This paper presents *Archè*, a theatre-science project devoted to the historical development of the concept of chemical element. The performance adopts a dialogical and narrative structure that retraces the evolution of this concept from presocratic philosophy and alchemical traditions to the emergence of modern chemistry, the formulation of the periodic law and its interpretation within the quantum model of the atom. The article outlines the structure and contents of the project and discusses its educational potential within secondary school contexts. Particular attention is given to the way key scientific concepts, such as the operational definition of element in modern chemistry, the periodic classification of elements and the quantum interpretation of atomic structure are translated into theatrical language. By integrating historical reconstruction, scientific explanation and performative narration, *Archè* highlights the cultural dimension of chemistry and illustrates the progressive and historically situated nature of scientific knowledge.

Keywords: teatro-scienza; storia della chimica; elemento chimico; atomo; umanesimo scientifico

1. Introduzione

Il progetto teatrale *Archè*, ideato da Giuseppe Roncallo e Graziella Battistin [1], propone un percorso di teatro-scienza dedicato all'evoluzione storica del concetto di elemento chimico. Attraverso una struttura dialogica e narrativa, l'opera ripercorre le tappe fondamentali che conducono dal pensiero presocratico alla tavola periodica e al modello quantistico dell'atomo. Il contributo ne presenta contenuti, struttura e potenzialità didattiche nel contesto della scuola secondaria di secondo grado, evidenziandone la dimensione culturale e approfondendo il modo in cui alcuni passaggi scientifici, come la definizione operativa di elemento nella chimica moderna, la formulazione della legge periodica e la successiva interpretazione quantistica, vengono tradotti in forma narrativa e teatrale nello spettacolo.

2. In cosa consiste *Archè*

Il progetto di teatro-scienza *Archè* è articolato in tre parti, ciascuna della durata di circa cinquanta minuti, dedicate alla storia del concetto di elemento chimico. Il titolo richiama il termine greco archè (principio, origine), con cui i filosofi presocratici indicavano la sostanza fondamentale della realtà. La struttura scenica è dialogica: due colleghi avviano una conversazione informale sulla storia dell'idea di elemento e, nel corso del dialogo, si materializzano i protagonisti delle diverse epoche, filosofi, alchimisti, chimici, che presentano una sintesi del proprio pensiero. Il dispositivo teatrale rende visibile il carattere progressivo e problematico della costruzione del sapere scientifico.

3. Dall'archè presocratico alla legge periodica

Le prime due parti dello spettacolo seguono un percorso cronologico che prende avvio dal pensiero greco, attraversa l'alchimia e giunge alla rivoluzione scientifica. Boyle, Lavoisier, Priestley, Dalton, Avogadro e Mendeleev segnano le tappe della trasformazione del concetto di elemento: da principio qualitativo a entità definita operativamente e ordinata nella legge periodica.

Il punto di partenza è il pensiero presocratico. Talete individua nell'acqua il principio di tutte le cose, Anassimene nell'aria, mentre Empedocle introduce la teoria dei quattro elementi, terra, acqua, aria e fuoco, che resterà dominante per oltre due millenni. In Aristotele questa concezione assume una forma sistematica, collegata alle qualità fondamentali (caldo, freddo, secco, umido). Dal punto di vista della storia della scienza, tali teorie rappresentano il primo tentativo di interpretare la varietà dei materiali osservabili attraverso un numero limitato di principi fondamentali.

Nel corso dei secoli la tradizione alchemica rielabora queste idee, introducendo pratiche sperimentali e un ricco linguaggio simbolico che contribuisce, pur in un quadro teorico ancora lontano dalla chimica moderna, al progressivo accumularsi di conoscenze sui processi di trasformazione della materia. La svolta avviene tra XVII e XVIII secolo con l'affermazione del metodo sperimentale. Robert Boyle critica esplicitamente la concezione aristotelica degli elementi e propone di definire un elemento sulla base di criteri operativi: una sostanza che non può essere ulteriormente decomposta mediante procedimenti chimici noti. Antoine Lavoisier consolida questa prospettiva introducendo un nuovo linguaggio chimico fondato sulla misura e sulla conservazione della massa.

La ricostruzione storica non assume tuttavia la forma di una semplice lezione narrata. In scena sono presenti soltanto i due docenti-attori, che conducono il dialogo alternando spiegazione scientifica e interpretazione teatrale. Attraverso rapidi cambi di costume (ad es., un cappello, una sciarpa) i due interlocutori si trasformano di volta in volta nei protagonisti della storia della chimica: filosofi presocratici, alchimisti, Boyle, Lavoisier, Dalton, o Mendeleev. La dimensione teatrale è sostenuta da un ritmo dialogico vivace, spesso arricchito da battute improvvisate e da inflessioni caricaturali che caratterizzano i personaggi storici, come l'accento francese attribuito a Lavoisier, o quello russo utilizzato per Mendeleev. Sullo sfondo, immagini, parole-chiave e materiali iconografici scorrono su uno schermo multimediale accompagnando l'evoluzione del racconto, mentre interventi musicali e brevi transizioni sonore contribuiscono a creare continuità narrativa e coinvolgimento emotivo. In questo modo il pubblico assiste non soltanto all'esposizione dei contenuti scientifici, ma alla progressiva "messa in scena" della costruzione storica del concetto di elemento.

Nel corso dell'Ottocento la teoria atomica di Dalton e l'ipotesi di Avogadro collegano progressivamente il concetto di elemento alla struttura atomica della materia. Il momento decisivo di questo processo è la formulazione della legge periodica da parte di Dmitrij Mendeleev nel 1869. Ordinando gli elementi secondo la massa atomica crescente, Mendeleev osserva la ricorrenza periodica delle proprietà chimiche e costruisce una tavola capace non solo di classificare gli elementi noti, ma anche di prevedere l'esistenza e le proprietà di elementi ancora sconosciuti.

Come illustrato in figura 1, il percorso è suddiviso in segmenti tematici che coprono l'evoluzione storica dall'antichità al XIX secolo, evidenziando la progressiva definizione del concetto di elemento.

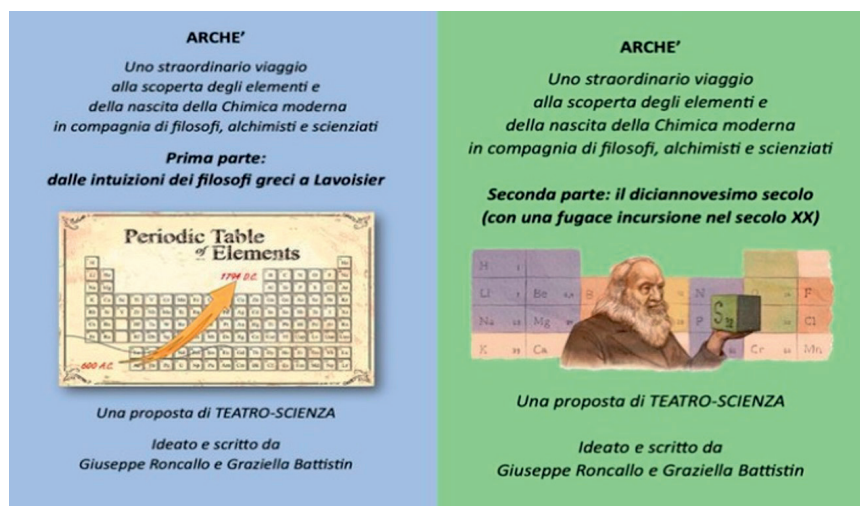


Figura 1. Locandine delle prime due parti di *Archè*

4. La struttura dell'atomo e il modello quantistico

Una terza parte affronta la struttura dell'atomo e il modello quantistico, passaggio fondamentale per l'interpretazione "intima" della legge periodica. La complessità dei contenuti è mediata dall'introduzione di due assistenti virtuali che intervengono nei passaggi più delicati, mantenendo l'equilibrio tra rigore scientifico e accessibilità.

Gli assistenti virtuali diventano così veri e propri dispositivi scenici: interrompono, semplificano, pongono domande o traducono in immagini e metafore alcuni passaggi particolarmente delicati, contribuendo a mantenere dinamico il ritmo dello spettacolo e accessibile al pubblico studentesco il percorso concettuale.

Dal punto di vista scientifico, la periodicità delle proprietà chimiche trova spiegazione nella configurazione elettronica degli atomi. Con lo sviluppo della meccanica quantistica nel XX secolo, attraverso i contributi di Schrödinger, Heisenberg e Pauli, gli elettroni vengono descritti mediante funzioni d'onda e orbitali atomici caratterizzati da numeri quantici. La struttura a livelli energetici e sottolivelli spiega la ricorrenza periodica delle proprietà chimiche degli elementi e fornisce una base teorica più profonda alla Tavola Periodica introdotta da Mendeleev.

Come si osserva in figura 2, immagini, riproduzioni storiche e materiali iconografici supportano la narrazione, favorendo la connessione tra dimensione storica e contenuto disciplinare.

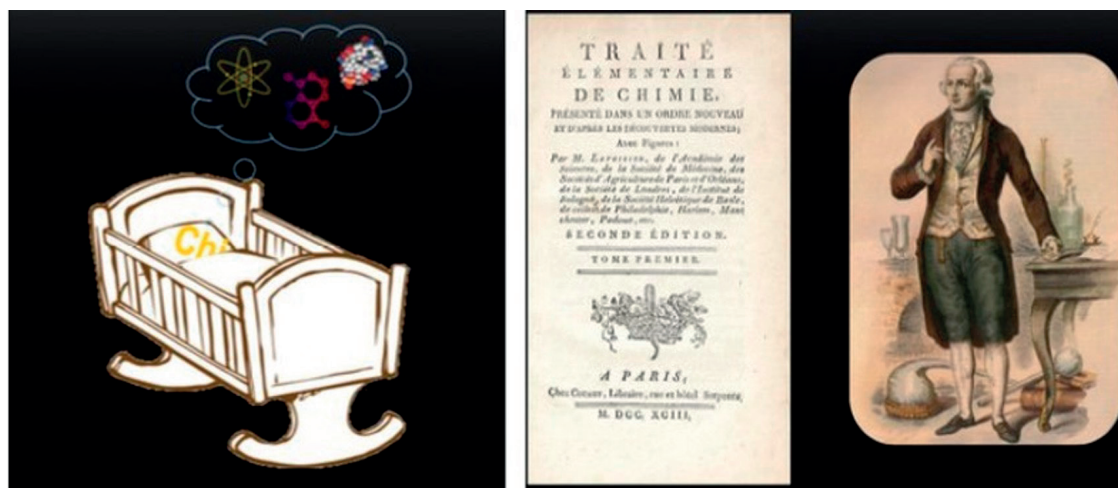


Figura 2. Esempi di materiali visivi e riferimenti storici utilizzati nello spettacolo

5. Teatro-scienza e umanesimo scientifico

Le rappresentazioni, rivolte a studenti e pubblico non specialistico, mostrano come la chimica possa essere raccontata mettendone in luce la dimensione storica e culturale. In tale prospettiva si può richiamare, in senso sobrio, l'idea di umanesimo scientifico: la scienza come componente integrante della cultura e della formazione della persona.

Come evidenziato da Primo Levi [2], la chimica può diventare occasione di riflessione sull'esperienza umana senza rinunciare alla precisione concettuale. In *Archè* questa prospettiva emerge attraverso la rappresentazione degli scienziati come figure storicamente situate, animate da intuizioni, angosciate da errori, aiutate da confronti teorici e progressive revisioni delle proprie idee. La teatralizzazione dei dialoghi e delle trasformazioni concettuali consente agli studenti di percepire il sapere scientifico non come un insieme statico di definizioni, ma come un processo umano, dinamico e culturalmente costruito.

Dal punto di vista didattico, il progetto favorisce la storicizzazione dei concetti, la connessione tra dimensione macroscopica e struttura microscopica della materia e l'educazione alla complessità. La

forma teatrale stimola attenzione e partecipazione, integrandosi con la didattica curricolare e offrendo un canale comunicativo complementare rispetto alla lezione tradizionale.

In molte scuole il teatro viene frequentemente proposto come attività laboratoriale o extracurricolare attraverso la messa in scena di testi narrativi o opere già appartenenti alla tradizione teatrale. Esperienze come *Archè* suggeriscono, invece, la possibilità di utilizzare il linguaggio teatrale anche per la comunicazione e la costruzione dei contenuti disciplinari, trasformando temi scientifici complessi in esperienze narrative accessibili e coinvolgenti. Non si tratta di sostituire l'insegnamento curricolare, né di limitare tali esperienze ai soli studenti che partecipano ad attività teatrali, ma di integrare nella didattica ordinaria modalità espressive differenti, capaci di rendere più efficace e motivante la trasmissione dei contenuti scientifici per l'intero gruppo classe.

6. Conclusione

Archè rappresenta un esempio coerente di integrazione tra linguaggio teatrale e contenuto scientifico. La messa in scena dell'evoluzione del concetto di elemento, fino alla moderna interpretazione quantistica della struttura atomica, restituisce visibilità alla natura dinamica del sapere chimico e alla sua dimensione culturale, contribuendo a rafforzare la consapevolezza del ruolo formativo della disciplina.

Sebbene il presente contributo abbia carattere prevalentemente descrittivo, le rappresentazioni realizzate hanno evidenziato un elevato coinvolgimento degli studenti e una partecipazione attiva durante le attività successive dedicate alla storia della chimica e alla Tavola Periodica. In prospettiva futura potrebbe risultare interessante affiancare allo spettacolo strumenti di osservazione sistematica delle ricadute didattiche e proporre laboratori teatrali ispirati alla storia della scienza, nei quali gli studenti possano sperimentare direttamente forme di narrazione scientifica e comunicazione della chimica.

Un possibile sviluppo didattico potrebbe inoltre consistere nel coinvolgere gli stessi studenti nella progettazione e realizzazione delle attività teatrali. La scrittura di brevi copioni o scene dedicate a episodi della storia della chimica richiederebbe infatti un lavoro di ricerca, selezione e confronto tra fonti differenti, favorendo lo sviluppo di competenze critiche legate alla valutazione dell'attendibilità delle informazioni, particolarmente rilevanti in un contesto in cui le fonti consultate sono prevalentemente digitali e non sempre scientificamente affidabili.

La costruzione collettiva della narrazione teatrale potrebbe così diventare occasione per educare alla consapevolezza nell'uso delle fonti, alla distinzione tra semplice racconto e informazione scientificamente fondata e alla capacità di rielaborare criticamente i contenuti disciplinari.

Parallelamente, la possibilità per gli studenti di interpretare direttamente figure storiche della scienza, immedesimandosi nei diversi protagonisti e nei differenti contesti culturali, contribuirebbe a rafforzare il coinvolgimento emotivo e cognitivo, rendendo più concreta e significativa la comprensione dello sviluppo storico delle idee scientifiche.

Riferimenti bibliografici

- [1] G. Roncallo, G. Battistin, *Archè – Teatro-Scienza* (materiali originali non pubblicati), 2025.
- [2] P. Levi, *Il sistema periodico*, Einaudi, Torino, 1975.

Il sistema periodico tra divulgazione scientifica e materiali didattici

Luciana Massi

Università statale di San Paolo (UNESP), Brasile

e-mail: luciana.massi@unesp.br

Abstract. Scientific didactics and communication have very different objectives and methods. This article aims to analyze and differentiate these two types of materials (science didactic and communication) based on Primo Levi's book, *The periodic table*. A recent edition of the book includes suggested teaching activities that illustrate its specificity in comparison to Levi's original material. I hope this article will help teachers who wish to explore scientific communication in the classroom or incorporate some of these activities into their teaching activities.

Keywords: Primo Levi; Il Sistema Periodico; divulgazione scientifica; materiali didattici

1. Introduzione

La *divulgazione scientifica* (DS) può essere intesa come lo sforzo di rendere accessibili la conoscenza e la cultura scientifica a un vasto pubblico non specializzato. Ultimamente, il termine "divulgazione scientifica" è stato spesso sostituito con "comunicazione scientifica", soprattutto perché il primo, in alcune lingue e principalmente in inglese, ha un significato di "volgarizzazione" o "popolarizzazione" della scienza, che qui desidero evitare. Pur concordando con questa critica, non concordo sul fatto che l'espressione "comunicazione scientifica" sia un sostituto migliore o più chiaro in qualsiasi lingua. Ritengo, infatti, che tale termine sia talmente generico da non esplicitare la specificità della divulgazione, che è rivolta a un vasto pubblico, in quanto può riferirsi sia a un qualsiasi articolo scientifico che a materiale realmente divulgativo. In portoghese e in italiano "divulgare" non significa necessariamente volgarizzare; pertanto, ritengo che adottare il termine "comunicazione", che potrebbe riferirsi anche a una semplice e-mail scambiata tra scienziati, rischi di far perdere il senso di ampliamento dell'atto comunicativo al di là della comunità scientifica che è il fine ultimo della divulgazione. La semplice definizione di DS come attività mirata a rendere accessibili la conoscenza e la cultura scientifica a un vasto pubblico non specializzato, può essere arricchita e differenziata, rifacendosi al contributo di autori come Burns, O'Connor e Stockmayer [1]. Essi definiscono la comunicazione scientifica come "l'uso di competenze, mezzi di comunicazione, attività e dialoghi appropriati per produrre una o più delle seguenti risposte personali alla scienza: consapevolezza, divertimento, interesse, formazione di opinioni e comprensione" (nel testo originale, le iniziali di questa parola corrispondono alle vocali AEIOU). Secondo gli autori citati sopra, tale concetto si differenzia: i) dalla consapevolezza pubblica della scienza, che mira a stimolare atteggiamenti e opinioni positive nei confronti della scienza stessa; ii) dalla cultura scientifica, un ambiente sociale che sostiene e apprezza la scienza; iii) dalla comprensione pubblica della scienza, incentrata sulla comprensione dei contenuti scientifici, dei processi e dei fattori sociali; iv) dall'alfabetizzazione scientifica, situazione in cui le persone sono consapevoli, interessate e coinvolte nella comprensione della scienza.

È possibile notare che la DS ha una certa affinità con un intento educativo, sebbene non sia contenuta entro i confini scolastici. Potremmo affermare che essa si avvicina a ciò che è diventato noto come *istruzione non formale*, un concetto che, secondo Smith [2], è entrato a far parte del dibattito internazionale sulle politiche educative tra la fine degli anni '60 e l'inizio degli anni '70 del secolo scorso e

che può essere considerato correlato ai concetti di *apprendimento ricorrente* e *apprendimento permanente*. L'istruzione non formale si riferisce a un'attività educativa organizzata, che si svolge al di fuori delle istituzioni educative riconosciute, ossia al di fuori del sistema formale consolidato. Tuttavia, Mori e Curvelo [3] criticano l'imprecisione di questo termine, così come quello di istruzione formale e informale, e presentano un modello di differenziazione distribuito su due assi, scolastico/non scolastico e sistematico/non sistematico, e quattro quadranti (Figura 1).

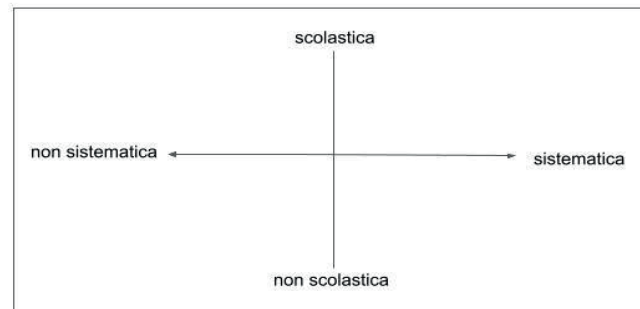


Figura 1. Diagramma delle modalità di istruzione tra le dimensioni scolastica o non scolastica e sistematica o non sistematica (tradotto da Mori e Curvelo [3])

Secondo Mori e Curvelo, l'istruzione scolastica sistematica è la modalità istituzionale, ufficiale e formalizzata dell'istruzione scolastica; l'istruzione scolastica non sistematica – solitamente definita come *curriculum nascosto* – è l'apprendimento che avviene “alle spalle” del lavoro educativo intenzionale dell'insegnante; l'istruzione extrascolastica non sistematica è l'apprendimento che avviene negli spazi tradizionali di convivenza (la casa, la strada, la piazza, ecc.), nelle associazioni civili, nel contatto con manufatti e prodotti culturali; l'istruzione extrascolastica sistematizzata, infine, coincide con quella svolta da diverse istituzioni, enti e aziende che offrono corsi facoltativi, ma con un'organizzazione simile a quella della scuola.

In termini generali, la DS si rivolge a un pubblico non scolastico e non ha finalità educative sistematiche; quindi, dovrebbe rientrare nel quadrante non scolastico e non sistematico. Tuttavia, è possibile trovare materiali e azioni divulgative che si distribuiscono anche nello spazio scolastico. Con queste definizioni intendo chiarire che, in genere, la DS avviene al di fuori della scuola e senza intenzionalità educativa, ossia non inserita in un curriculum ufficiale. Comunque, ciò non le impedisce di partecipare a questo spazio in vari modi, anche come materiale di supporto per l'insegnante o come materiale didattico. Evidentemente, quando è inserita in un contesto di intenzionalità educativa sistematica, la DS deve essere elaborata dall'insegnante con un obiettivo di apprendimento e un contenuto specifico da sviluppare.

Inoltre, è importante sottolineare che la didattica mira all'apprendimento, ovvero allo sviluppo cognitivo dello studente attraverso l'acquisizione di teorie, concetti e spiegazioni scientifiche sulla realtà. Esistono diverse teorie educative e psicologiche che sostengono il lavoro pedagogico intrapreso dall'insegnante e finalizzato a insegnare un contenuto che possa essere appreso dallo studente. Esistono anche diverse forme, tecniche e strategie attraverso le quali l'insegnante sviluppa il proprio lavoro per raggiungere questo obiettivo. La DS non ha lo scopo di insegnare, nel senso tradizionale del termine; essa non ha lo scopo di far apprendere un concetto al pubblico, ma si pone l'obiettivo di facilitare l'accesso ad alcune informazioni. Per promuovere tale accesso, la DS utilizza diverse risorse a seconda del mezzo utilizzato (scrittura, iconografia, patrimonio museale, ecc.). Nel caso della scrittura, si fa uso di alcuni strumenti discorsivi atti a raggiungere un pubblico ampio e rendere più chiaro il messaggio, quali, ad esempio, l'uso di analogie o interpellazioni dirette al lettore (sotto forma di domande o richiami per indirizzare la sua attenzione su parti specifiche della spiegazione). Questa differenziazione evidenzia ancora una volta che la DS, a differenza della didattica, non ha un'intenzionalità educativa sistematica.

Nel presente articolo analizzerò e distinguerò questi due tipi di materiali (didattici e divulgativi) relativi a *Il Sistema Periodico* di Primo Levi [4] (Figura 2), a partire dall'edizione che fu pubblicata da Einaudi Scuola, come materiale di divulgazione scientifica scritto da Primo Levi stesso [5], e che ha visto recentemente una ristampa, a cura di Roberta Mori con la collaborazione di Maria Vittoria Barbarulo, che include attività didattiche [6].

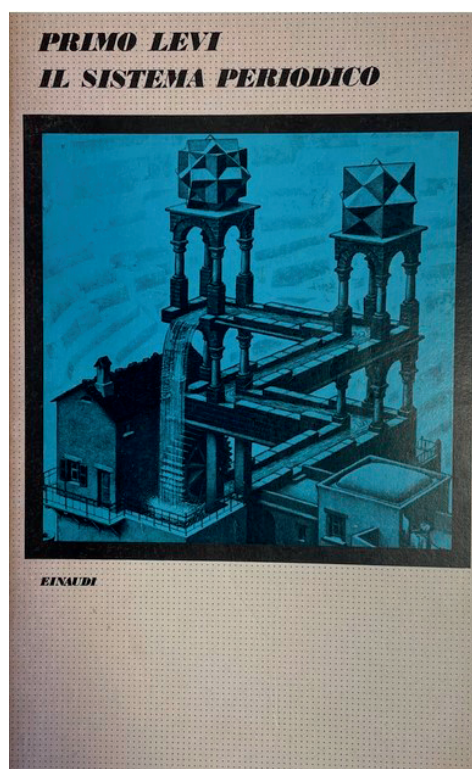


Figura 2. Copertina originale de *Il Sistema Periodico* di Levi [4]

2. Il Sistema Periodico di Levi

Pubblicato nel 1975, *Il Sistema Periodico* [4] è una raccolta di ventuno racconti idealmente collegati alla Tavola Periodica di Mendeleev. Ogni capitolo ha come titolo un elemento della Tavola Periodica che, a sua volta, funge da metafora o è parte integrante, quasi un personaggio, della storia narrata. Secondo Thomson [7], al momento della pubblicazione, il libro fu ben accolto in Italia, ma non vinse alcun premio. La sua traduzione in inglese fu rifiutata da 27 case editrici in Gran Bretagna, forse per timore che il libro fosse troppo ibrido per essere venduto. Thomson riconosce che, sebbene avesse un parziale carattere autobiografico, il libro rimandava a una tradizione di scrittura scientifica, quella di Galileo e Darwin, scomparsa nel XX secolo dopo la specializzazione accademica, e che ha preceduto il lavoro di DS di autori come Richard Dawkins e Stephen Jay Gould. Contrariamente alle aspettative, quando è stato pubblicato in lingua inglese, il libro è diventato un *bestseller*. Possiamo associare questo successo al successivo premio come miglior libro di scienza di tutti i tempi, assegnatogli dalla Royal Institution of Great Britain nel 2006, una delle istituzioni scientifiche più antiche e riconosciute. Il libro *Il Sistema Periodico* di Primo Levi [4] è riconosciuto come un'opera ibrida che abbraccia diversi generi discorsivi: autobiografia, con enfasi sull'aspetto intellettuale e/o scientifico [8, 9]; romanzo di formazione [10]; romanzo giallo [11]; microstoria [12]. Ciononostante, a mio giudizio si tratta anche di un ottimo testo letterario di divulgazione scientifica, come ho già discusso in un altro articolo [13]. L'uso dell'espressione "testo letterario di divulgazione scientifica" rimanda al riconoscimento del fatto che la DS può essere un genere letterario come qualsiasi altro, se pensiamo alle opere letterarie con finalità divulgative.

Alcuni obietteranno che si tratta di un'opera letteraria che fu scritta da Levi senza alcun intento divulgativo, ossia che questo libro non è nato come testo divulgativo, ma solo in seguito la sua ricezione è stata ampia e, con il tempo, ha fatto emergere anche il suo potenziale divulgativo. La mia interpretazione è differente, principalmente perché ritengo che non sia possibile affermare una volta per tutte, in modo univoco, l'intenzionalità dell'autore, il cui testo e la cui interpretazione gli sfuggono sempre, come sostiene Umberto Eco [14], attraverso il concetto di sovrainterpretazione.

Peraltro, questa tesi si basa in parte sulla posizione espressa dallo stesso autore nel presentare l'obiettivo dell'opera: presentare al lettore (un pubblico ampio) il lavoro del chimico con la materia. Ritengo, dunque, che si tratti a pieno titolo di un obiettivo di DS e riconosco in quest'opera di Levi altre caratteristiche tipiche di un lavoro divulgativo. Chiaramente, ciò non implica il controllo dell'autore sulle analisi e le interpretazioni della sua opera, né che egli la identifichi come testo di divulgazione scientifica o altro genere letterario. Sottolineo un brano del capitolo Argento, in cui Levi viene invitato a partecipare a una riunione di ex-studenti universitari, suoi compagni nel corso di chimica, e chiede ai colleghi di raccontargli storie del loro lavoro di chimici, così da poter comporre questo libro:

Gli dissi che andavo in cerca di eventi, miei e d'altri, che volevo schierare in mostra in un libro, per vedere se mi riusciva di **convogliare ai profani il sapore forte ed amaro del nostro mestiere**, che è poi un caso particolare, una versione più strenua, del mestiere di vivere. Gli dissi che **non mi pareva giusto che il mondo sapesse** tutto di come vive il medico, la prostituta, il marinaio, l'assassino, la contessa, l'antico romano, il congiurato e il polinesiano, e **nulla di come viviamo noi trasmutatori di materia**; ma che in questo libro avrei deliberatamente trascurato la grande chimica, la chimica trionfante degli impianti colossali e dei fatturati vertiginosi, perché questa è opera collettiva e quindi anonima ([15], p. 1010 – grassetto mio).

La versione scolastica del libro *Il Sistema Periodico* [5] (Figura 3) è stata realizzata da Levi sempre negli anni '70 del 1900, con l'obiettivo di chiarire i concetti scientifici presenti nel testo. Levi arricchisce il suo racconto con una serie di spiegazioni scientifiche e letterarie, sotto forma di circa 200 note a piè di pagina.



Figura 3. Copertina originale dell'edizione scolastica de *Il Sistema Periodico* di Levi [5]

Una terza versione di quest'opera è stata pubblicata nel 2022 (Figura 4) a cura di Roberta Mori, in collaborazione con Maria Vittoria Barbarulo, docente di chimica [6].

Quest'ultima versione è articolata nelle due seguenti parti.

1. *Il Sistema Periodico* che contiene tutte le note originali di Levi più le note delle nuove curatrici, una tavola degli elementi con informazioni chimiche su di essi, alcune proposte di attività per diverse discipline scolastiche, come la chimica, la letteratura, la storia, e la descrizione dei luoghi frequentati da Primo Levi e citati nel suo testo, per un totale di 379 pagine;
2. *Materiali per il docente: strumenti e risorse per insegnare*, anch'esso basato su *Il Sistema Periodico*, che include percorsi di analisi di testi, suggerendone altri complementari di diversi autori, sulla storia dell'Italia, ecc., percorsi di apprendimento cooperativo sui capitoli ferro, oro, cerio e vanadio e attività di scrittura creativa e chimica creativa, che riportano principalmente esperimenti di laboratorio, per un totale di 114 pagine; inoltre, questa parte contiene un *link* a materiali *online*, che l'insegnante può scaricare e che contengono le risposte corrette per le diverse attività proposte.



Figura 4. Copertina della edizione scolastica de *Il Sistema Periodico* di Levi a cura di Mori e Barbarulo [6]

Secondo la descrizione fornita dai curatori questa edizione presenta i risultati di un laboratorio sviluppato negli ultimi quattro anni sul testo che, in forme diverse (in presenza e a distanza), “raccolge l’eredità del dibattito interdisciplinare sulle potenzialità didattiche dell’opera, maturato su impulso del Centro Internazionale di Studi Primo Levi” in collaborazione con la Società Chimica Italiana [6]. Nel presente articolo, focalizzo la mia analisi sulle attività proposte alla fine della prima parte di tale versione scolastica de *Il Sistema Periodico* [6], poiché esse consentono di esplicitare la differenza tra DS e materiale didattico. Secondo Mori e Barbarulo ([6], p. 286): Le attività, suddivise racconto per racconto, prevedono esercizi di comprensione, di riflessione e approfondimento. Sono, inoltre, presenti attività cooperative che implicano il lavoro di gruppo, di ricerca o di discussione in classe.

Pur essendo presenti attività specifiche di chimica, identificate da un simbolo, ho analizzato tutti gli esercizi e ho individuato altre modalità secondo le quali la chimica viene affrontata nell’opera.

3. Analisi del libro *Il Sistema Periodico tra divulgazione scientifica e materiali didattici*

Nella versione scolastica [6], vengono proposte in totale 168 domande relative ai 21 capitoli del libro di Levi, in 50 delle quali ho identificato argomenti di chimica.

Questi argomenti compaiono in domande di varia natura, che ho classificato nei tipi che presenterò qui di seguito.

1. *Domande di contenuto chimico scolastico in cui era esplicitato un concetto specifico e un livello di insegnamento*

Ho identificato domande di questo tipo in tutti i capitoli, tranne quelli su zinco e ferro. È importante sottolineare che sono presenti anche domande riguardanti la fisica e la biologia, che non sono state prese in considerazione in questa analisi. Un esempio di tale tipo di domanda sarà discusso di seguito.

Le proposte di esperimenti appaiono solo nei capitoli dedicati allo zinco e al potassio. In questi casi la proposta è accompagnata da indicazioni sul livello di insegnamento e sui contenuti trattati. Nel caso dello zinco, l'esperimento è progettato per studiare la reazione di sintesi dello zinco solfato. Nel caso del potassio, la proposta prevede la produzione di un indicatore acido-base a partire dal cavolo rosso.

2. *Domande sulla filosofia della scienza o sulla storia e la filosofia della chimica*

Queste, in particolare, sono presenti nei capitoli dedicati all'argon, al ferro e all'azoto. Fra di esse ho individuato sia domande generali sulle correnti filosofiche, come nel caso dell'azoto, in cui ci si interroga sul vitalismo e il materialismo, che sono rintracciate nel racconto, sia questioni più specifiche sulla chimica, come in argon, dove – insieme alle domande sul contenuto – c'è l'indicazione di una ricerca sul vincitore del premio Nobel, citato nel capitolo stesso, e nel ferro, dove viene ripreso un brano del libro di Levi allo scopo di interrogarsi sui significati attribuiti alla chimica e su come le sue caratteristiche la rendano un sapere antidogmatico.

3. *Domande relative alla visione della chimica, dei chimici o del lavoro di laboratorio svolto dai chimici*

Queste domande stabiliscono relazioni tra la visione proposta dal libro e le percezioni degli studenti, nei capitoli dedicati all'idrogeno, allo zinco, al ferro, al potassio, al nichel, al piombo, al mercurio, allo stagno, all'uranio e all'argento. Di seguito, presenterò un esempio di questo tipo di questione.

4. *Domande riguardanti la chimica e la letteratura*

In queste domande l'interdisciplinarietà viene affrontata attraverso confronti tra le due discipline o il lavoro del chimico e dello scrittore. Esse sono presenti nei capitoli dedicati al nichel, al cromo, all'argento, al ferro e al carbonio. Nel capitolo sul cromo, ad esempio, viene presentato un estratto di un discorso di Levi sui suoi due mestieri affinché gli studenti riflettano sul significato di verbi chimici come “pesa” e “dividi”, “misura” e “giudica su prove”, per spiegare le sue azioni nel contesto della chimica e del lavoro dello scrittore.

Più specificamente, questa interdisciplinarietà si manifesta in domande sui confronti tra elementi chimici e persone/sentimenti in cui le metafore presenti nell'opera vengono discusse ed esplorate. Ciò accade nei capitoli dedicati allo zinco, al piombo, allo zolfo, all'argento e al carbonio. Ad esempio, nel caso dello zolfo allo studente viene chiesto “che cosa evoca lo zolfo nell'immaginario comune” ([6], p. 334).

5. *Questioni relative alle implicazioni della chimica nella società*

Si tratta di questioni che riguardano gli impatti ambientali e sociali e che vengono affrontate nei capitoli riguardanti il carbonio, il nichel, il fosforo, lo zolfo e il vanadio. Ad esempio, nel capitolo dedicato al carbonio, la questione esplora il rapporto tra le emissioni di CO₂ e l'agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile.

In tabella 1 presento una classificazione delle questioni capitolo per capitolo.

Tabella 1. Quantificazione e classificazione del tipo di domanda per capitolo

Capitolo	Numero di domande/totale	Natura delle domande
Argon	1/7	contenuti chimici scolastici storia e filosofia della chimica
Idrogeno	3/6	visione della chimica e del chimico contenuti chimici scolastici
Zinco	3/6	visione della chimica e del chimico confronti tra elementi e persone/sentimenti proposta di esperimento
Ferro	2/10	interdisciplinarietà - chimica e letteratura visione della chimica e del chimico storia e filosofia della chimica
Potassio	4/9	visione della chimica e del chimico contenuti chimici scolastici
Nichel	4/10	contenuti chimici scolastici visione della chimica e del chimico interdisciplinarietà - chimica e letteratura chimica e società
Piombo	2/8	contenuti chimici scolastici visione della chimica e del chimico confronti tra elementi e persone/sentimenti
Mercurio	4/6	visione della chimica e del chimico contenuti chimici scolastici
Fosforo	3/9	contenuti chimici scolastici proposta di esperimento chimica e società
Oro	1/8	contenuti chimici scolastici
Cerio	2/9	contenuti chimici scolastici
Cromo	3/8	contenuti chimici scolastici interdisciplinarietà - chimica e letteratura
Zolfo	3/8	contenuti chimici scolastici chimica e società confronti tra elementi e persone/sentimenti
Titanio	1/7	contenuti chimici scolastici
Arsenico	1/6	contenuti chimici scolastici
Azoto	2/5	contenuti chimici scolastici filosofia della scienza
Stagno	4/8	contenuti chimici scolastici visione della chimica e del chimico confronti tra elementi e persone/sentimenti
Uranio	3/10	contenuti chimici scolastici visione della chimica e del chimico
Argento	6/10	contenuti chimici scolastici visione della chimica e del chimico interdisciplinarietà - chimica e letteratura confronti tra elementi e persone/sentimenti
Vanadio	2/9	contenuti chimici scolastici chimica e società
Carbonio	5/9	contenuti chimici scolastici chimica e società interdisciplinarietà - chimica e letteratura confronti tra elementi e persone/sentimenti

Per illustrare la differenza tra divulgazione scientifica e materiale didattico, discussa nell'introduzione, metterò ora a confronto due brani dello stesso capitolo che esplicitano la natura distinta di questi materiali. Ricordo che il brano di divulgazione scientifica fa parte dell'opera originale di Levi, mentre il materiale didattico fa parte delle attività didattiche proposte dalle curatrici della versione dell'opera pubblicata nel 2022 [6]. Si tratta di un brano del capitolo dedicato allo zolfo in cui Levi racconta la lotta di un personaggio, Lanza, contro una caldaia con un composto di zolfo la cui pressione aumentava con il rischio di esplosione. Levi attribuisce vita alla caldaia che chiude il capitolo dominato da Lanza. Questo brano si riferisce alla fine del capitolo:

Si guardò intorno, con un gran bisogno di ridere e di raccontarla, e con un senso di leggerezza in tutte le membra. Vide per terra la sua sigaretta ridotta ad un lungo cilindretto di cenere: si era fumata da sola. Erano le cinque e venti, spuntava l'alba dietro la tettoia dei fusti vuoti, il termometro segnava 210°. Prelevò un campione dalla caldaia, lo lasciò raffreddare e lo saggiò col reattivo: la provetta rimase limpida qualche secondo, e poi diventò bianca come il latte¹³.

Lanza spense il fuoco, fermò l'agitazione e la ventola, ed aperse il rompivuoto: si sentì un lungo fischio rabbioso, che piano piano si andò placando in un fruscio, in un mormorio, e poi tacque. Avvitò il tubo pescante,¹⁴ mise in moto il compressore,¹⁵ e gloriosamente, in mezzo a fumi bianchi ed all'aspro odore consueto, il getto denso della resina¹⁶ andò a placarsi nella bacinella di raccolta in un nero specchio lucente.

13. **bianca come il latte**: il campione prelevato per il saggio è trasparente e si intorbida, qualche istante dopo l'aggiunta di un reattivo specifico, per la formazione di una sostanza non solubile.

14. **tubo pescante**: è uno strumento utilizzato per il trasferimento di liquidi; nel racconto esso è verosimilmente collegato al compressore (vedi nota successiva) per far fluire la resina prodotta dal serbatoio alla bacinella di raccolta.

15. **compressore**: si tratta di una macchina in grado di comprimere o trasportare l'aria (o un gas / vapore o un fluido o un liquido).

16. **resina**: è il prodotto finale della reazione tra lo zolfo e, presumibilmente, un idrocarburo in cui siano presenti doppi legami (insaturo, come il butadiene, vedi nota 2) che possa fungere da monomero in un processo che ricorda la vulcanizzazione della gomma ([6], p.180).

Nel testo scolastico di Levi [5], i contenuti scientifici fanno parte della narrazione e sono spiegati in modo minimale, in modo da consentire al lettore di comprendere la storia senza che sia necessaria una comprensione approfondita del processo chimico. Tutte le note a piè di pagina sono state inserite dalle curatrici del testo del 2022 [6] e non erano presenti nella versione scolastica di Levi, indicando che l'autore non le ha ritenute necessarie per presentare al pubblico le storie sulla sua professione. In questo brano è già chiara la differenza tra il linguaggio tipico del genere letterario della divulgazione scientifica e il linguaggio scolastico presente nelle note, in cui si utilizzano definizioni chiare con riferimento a processi e contenuti scientifici, come nomi di sostanze (butadiene) e concetti (solubilità). Levi, nella versione scolastica [6], si limita a introdurre i fatti scientifici (ad esempio, la temperatura della caldaia) come parte del contesto narrativo, articolati con l'alba e la vita di Lanza. In tal modo, egli parla della scienza, dei processi scientifici che avvengono nell'industria in questo specifico caso, ma non intende insegnare ai lettori lo specifico tecnico di ciò che viene narrato.

Contrariamente all'intento di Levi, nell'attività didattica sotto riportata – che classificherei come una domanda sul contenuto chimico – il livello di insegnamento è chiaramente specificato, ovvero il “biennio delle scuole secondarie di secondo grado”, e il contenuto chimico è delimitato: le leggi dei gas. Vengono introdotti contenuti affinché lo studente possa recuperare i concetti e c'è un calcolo da fare, applicando la legge di Charles e Gay-Lussac per arrivare alla risposta corretta, che aiuta a comprendere il capitolo ad un livello scolastico di appropriazione dei fatti narrati.

7. Lanza e la legge di Gay-Lussac

(esercizio adatto al biennio delle scuole secondarie di secondo grado e basato sulla conoscenza delle leggi dei gas)

Sulle bombolette spray è presente l'indicazione di pericolo "Contenitore pressurizzato. Può esplodere se riscaldato": la pressione di un gas all'interno di un serbatoio chiuso aumenta, infatti, con la temperatura, rendendo possibile un'esplosione.

La legge di Gay-Lussac (1802) spiega la relazione tra la pressione di un gas e la temperatura assoluta in condizioni isocore (volume costante):

$$P_{(t)} = P_0 (1 + 1/273 \times t)$$

in cui $P_{(t)}$ è la pressione del gas alla temperatura t in °C e P_0 è la pressione del gas alla temperatura di 0°C; esprimendo i valori di temperatura in Kelvin, si deriva la nota formula $P_1/T_1 = P_2/T_2$.

Alle tre di notte la caldaia del racconto raggiunge la temperatura di 200°C e, a quel punto, Lanza decide di azionare la pompa da vuoto: perché effettua questa operazione? ([6], p. 336).

Un altro esempio di esercizio che illustra questa differenziazione si trova nel capitolo dedicato all'argento; in questo caso contiene un brano del testo nella versione curata da Mori e Barbarulo [6]:

2. La letteratura e i «trasmutatori di materia»

«Non mi pareva giusto che il mondo sapesse tutto di come vive il medico, la prostituta, il marinaio, l'assassino, la contessa, l'antico romano, il congiurato e il polinesiano, e nulla di come viviamo noi trasmutatori di materia». Così dice il narratore a Cerrato, aggiungendo che nel libro che stava progettando (Il sistema periodico stesso) avrebbe voluto comunicare «ai profani il sapore forte e amaro del nostro mestiere».

a. Dopo la lettura di questo racconto – ma anche degli altri precedenti – quali ti sembra che siano gli "avvenimenti" più ricorrenti nel "mestiere del chimico"?

[...]

c. Il mestiere del chimico è «un caso particolare, una versione più strenua, del mestiere di vivere»: motiva questa affermazione commentando i passi dei racconti de Il Sistema Periodico che hai letto finora e che più ti sembrano significativi.

Ti vengono in mente altri mestieri per i quali è possibile sviluppare un discorso simile? Rispondi facendo riferimento alla tua esperienza o a quella di persone che conosci ([6], p. 355).

Con questa domanda gli studenti sono invitati a esprimere chiaramente una visione della chimica identificando – a partire dal testo di Levi, ma anche dalle loro esperienze personali – quali sono gli "avvenimenti" più ricorrenti nel "mestiere del chimico". Si tratta di una domanda che non mobilita un concetto specifico, ma sviluppa una discussione sulla natura della scienza che fa parte del contenuto scientifico scolastico. L'obiettivo è quello di portare gli studenti a comprendere come la scienza viene vissuta e declinata dai chimici e sviluppata nei laboratori scientifici e industriali. Contrariamente a questa intenzionalità esplicita nelle domande e nelle indicazioni delle organizzatrici, Levi utilizza un linguaggio letterario per riferirsi al lavoro del chimico attraverso i racconti della sua vita e delle esperienze di altri chimici; spetta al lettore organizzare e sistematizzare le caratteristiche di questo mestiere, se ne ha interesse o è motivato a farlo, quando il testo viene portato nel contesto scolastico.

4. Conclusioni

Questo articolo si poneva l'obiettivo di analizzare e differenziare due tipi di materiali (didattici e divulgativi) a partire dal libro *Il Sistema Periodico* di Levi nelle sue due versioni scolastiche, curate rispettivamente da Levi stesso, e da R. Mori e M.V. Barbarulo [5, 6]. Attraverso il confronto di alcuni brani dell'opera è stato possibile differenziare le attività divulgative, senza scopo didattico, dalle attività propriamente didattiche. È stata effettuata l'analisi di 50 esercizi che riguardavano la chimica attraverso i vari capitoli del testo leviano. Tale analisi ha portato a riconoscere domande di diversa natura: domande di contenuto chimico scolastico, in cui era specificato un concetto specifico e un livello di insegnamento (è importante sottolineare che erano anche presenti domande che riguardavano la fisica e la biologia, che non sono state prese in considerazione in questa analisi); proposte di esperimenti; domande sulla filosofia della scienza o, in

particolare, sulla storia e la filosofia della chimica; domande sulla visione della chimica, dei chimici o del lavoro in laboratorio svolto dai chimici, che stabilivano relazioni tra la visione proposta dal libro e le percezioni degli studenti; domande che riguardavano la chimica e la letteratura, in cui l'interdisciplinarietà era affrontata attraverso confronti tra le due discipline o il lavoro del chimico e dello scrittore; confronto tra elementi chimici e persone/sentimenti in cui venivano messe in discussione ed esplorate le metafore presenti nell'opera; domande sulle implicazioni della chimica nella società, che includono l'impatto ambientale e sociale. L'analisi contribuisce anche a rivelare il potenziale di quest'opera come eccellente materiale di divulgazione scientifica. Esplicita, infatti, ciò che Lima e Giordan ([16], p. 384) intendono come approcci alla cultura scientifica "più adeguati alla promozione dell'azione della società nelle sfere della scienza e della tecnologia", trattandosi di narrazioni di fantasia o saggi che riconoscono "la scienza come un'impresa umana inserita nella storia – quindi determinati dai valori della loro epoca" e che contemplano "complesse relazioni sociali, nonché le rotture e le continuità dello sviluppo scientifico e tecnologico".

È mio auspicio che questo materiale sia di aiuto agli insegnanti che desiderano esplorare la DS in classe o incorporare parte di queste attività nel loro insegnamento.

Ringraziamenti

La prima bozza di traduzione dal portoghese di questo testo è stata realizzata con lo strumento deepLtranslator. Ringrazio la Prof.ssa Elena Ghibaudo e il Prof. Mariano Venanzi per l'aiuto nella revisione della traduzione del testo. Si ringrazia anche la São Paulo Research Foundation (FAPESP), Brasil, Process Number 2023/12333-6, per avere finanziato in parte questo studio.

Riferimenti bibliografici

- [1] T. W. Burns, D. J. O'Connor, S. M. Stockmayer, Science communication: a contemporary definition, *Public Understanding of Science*, 2003, **12**, 183-202.
- [2] M. K. Smith, *What is non-formal education?* 2001 (<https://infed.org/dir/welcome/what-is-non-formal-education/>).
- [3] R. C. Mori, A. A. Curvelo, Dermeval Saviani's thought and education in science museums, *Educ. Pesqui*, 2016, **42** (2), 491-506.
- [4] P. Levi, *Il Sistema Periodico*, Einaudi, Torino, 1975.
- [5] P. Levi, *Il Sistema Periodico*, collana Letture per la scuola media, edizione scolastica, Einaudi scuola, Torino, 1975.
- [6] P. Levi, *Il Sistema Periodico* (a cura di R. Mori, M. V. Barbarulo), Mondadori Education, Milano, 2022.
- [7] I. Thomson, A life scientific, *The Financial Times*, 7 aprile 2012, pp. 1-4.
- [8] M. Bertoldi, La costruzione de Il Sistema Periodico di Primo Levi, *Ticontre: Teoria Testo Traduzione*. 2016, **6**, 65-80.
- [9] E. Mattioda, Idrogeno, in *Il sistema periodico di Primo Levi: Letture* (a cura di F. Magro, M. Sambi), Padova University Press, Padova, 2022, pp. 59-66.
- [10] R. S. C. Gordon, Dal Cosmo all'atomo: Popular Science e l'economia di scala in Primo Levi, in *Il sistema periodico. Primo Levi chimico e scrittore* (a cura di V. Aquilanti, A. Dolfi, M. L. Meneghetti), Bardi Edizioni, Roma, 2022, pp. 199-219.
- [11] P. Benzoni, Uranio, in *Il sistema periodico di Primo Levi: Letture* (a cura di F. Magro, M. Sambi), Padova University Press, Padova, 2022, pp. 261-284.
- [12] P. S. P. Caldas, A micro-história de Primo Levi: Um estudo sobre A Tabela Periódica, *Revista de História e Estudos Culturais*. 2021, **18**, 37-59.
- [13] L. Massi, G. S. Lima, Science Communication as Praxis: Analysis of 'The Periodic Table' by Primo Levi, *Substantia*, 2025, 9(2), 111-120.
- [14] U. Eco, *Interpretazione e sovrainterpretazione: Un dibattito con Richard Rorty, Jonathan Culler e Christine Brooke-Rose*, Bompiani, Milano, 2002 (ed. orig. inglese 1992).
- [15] P. Levi, *Opere complete, I-II*, (a cura di M. Belpoliti), Einaudi, Torino, 2016.
- [16] G. S. Lima, M. Giordan, Da reformulação discursiva a uma práxis da cultura científica: reflexões sobre a divulgação científica, *História, Ciências, Saúde-Manguinhos*, 2021, **28**(2), 375-392.

Valorizzare il patrimonio degli strumenti scientifici storici per la conoscenza e per la didattica: il progetto Va3SCoDi

Luca Rocca, Gaetano Angelici e Valentina Domenici

Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Università di Pisa

e-mail: valentina.domenici@unipi.it

Abstract. This contribution aims to present a project funded by Regione Toscana about the valorization of historical scientific instruments for culture and education (label of the project: Va3SCoDi). This project concerns the collection of instruments of the Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale and it involves several scientific museums, such as the Museo Galilei in Florence, the Museum of instruments of Physics in Pisa and the Natural History Museum in Rosignano Marittimo. In this paper, the first steps of the project will be reported focusing on the cataloguing of several instruments that were part of the *Gabinetto di Chimica* and *Gabinetto di Fisica Sperimentale* from the 1800 to the 1970.

Keywords: cultura scientifica; musei scientifici; collezioni scientifiche storiche; didattica delle scienze; storia della scienza

1. Introduzione

Gli strumenti scientifici storici, come anche il patrimonio tecnico e industriale, sono stati gli ultimi tra i beni demoetnoantropologici a rientrare nella famiglia dei *beni culturali* (1998 – legge n. 88 “Norme sulla circolazione dei beni culturali”) e, quindi, a ricevere un ufficiale riconoscimento della loro importanza come testimonianza di civiltà. In primo luogo, questi sono oggetti di difficile definizione: il termine stesso è stato coniato solamente nel XIX secolo, mentre in precedenza erano comuni termini quali *strumenti ottici*, *strumenti filosofici*, *matematici*, etc. In maniera molto ampia possiamo fare riferimento alla definizione che Paolo Brenni ha dato per l'enciclopedia Treccani, ossia gli strumenti scientifici storici sono “*tutti quegli oggetti tecnologici necessari all'avanzamento e all'insegnamento delle scienze nonché quelli propri a professioni o ad attività il cui svolgimento implica operazioni di misura, di calcolo, di osservazione o di controllo*” [1]. Si tratta di un patrimonio vastissimo al quale vanno aggiunti i reperti industriali e tutti gli strumenti necessari alla manifattura o alla trasformazione di beni. Molti di questi beni sono oggi conservati in musei e collezioni pubbliche e private, ma solo una piccolissima percentuale è stata adeguatamente catalogata e inserita nel Catalogo Generale dei Beni Culturali: 16.900 catalogati, ma si stima ve ne siano dieci volte tanto [2]. Come riportano diversi autori, molte collezioni di strumenti scientifici, così come di altri beni legati alle scienze, quali reagentari, vetrerie, ma anche documenti storici, manuali di funzionamento e quaderni di appunti di scienziati, si trovano all'interno di istituti tecnici o professionali, istituti di ricerca e dipartimenti universitari [3-6]. Purtroppo, non tutte queste realtà sono facilmente accessibili e, in alcuni casi, non sono nemmeno visitabili; per questo non è sempre semplice avere una corretta percezione della diffusione e della ricchezza di questo patrimonio. Negli ultimi anni, l'aspetto educativo e il potenziale dei musei storici scientifici e delle collezioni, in termini di formazione e apprendimento, sono stati al centro dell'attenzione di educatori e formatori, anche grazie al diffondersi di nuove idee in campo educativo. Ad esempio, i musei sono considerati a tutti gli effetti ambiti di apprendimento non formale, assai efficaci nell'ottica del *life-long learning*, ovvero l'apprendimento che copre tutto l'arco della vita e che avviene non necessariamente in contesti formali e codificati, ma anche in modo involontario, durante una visita a un museo o in una associazione culturale [7-10]. La diffusione dell'approccio STEAM

(*Science, Technology, Engineering, Art and Mathematics*) nell'apprendimento e nell'insegnamento delle scienze ha reso i musei e le collezioni ancora più protagonisti, essendo luoghi ideali dove affrontare tematiche interdisciplinari con metodologie attive, favorendo la partecipazione dei visitatori, il lavoro cooperativo ed esperienze laboratoriali innovative [8-10]. La filosofia educativa STEAM è stata alla base di alcuni progetti, realizzati nell'ambito del corso di insegnamento *Fondamenti e metodologie didattiche per l'insegnamento della chimica* [11,12], che hanno portato alla realizzazione da parte degli studenti frequentanti di una pagina web dedicata alla collezione storica del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Università di Pisa [13] e di un'iniziativa conclusiva del progetto dedicata alle scuole secondarie di II grado in cui, a partire dagli strumenti storici scientifici, gli studenti universitari hanno preparato laboratori dimostrativi e presentazioni divulgative di cui abbiamo raccontato in un precedente articolo [14]. È in questo contesto che è nata l'idea di un progetto di ricerca per valorizzare, a scopo culturale e didattico, la collezione degli strumenti storici scientifici a Pisa.

2. Il progetto di ricerca 'Va3SCoDi'

Il progetto 'Va3SCoDi' (Valorizzazione degli Strumenti Storici Scientifici per la Conoscenza e per la Didattica, il cui logo è riportato in figura 1) è stato finanziato dalla Regione Toscana lo scorso marzo 2025 con una borsa di ricerca biennale [15].



Figura 1. Logo del progetto Va3SCoDi e del sito che raccoglie il materiale didattico e divulgativo prodotto nell'ambito del progetto [15]

Il progetto è stato promosso da un gruppo di ricercatori dell'Università di Pisa, di cui fanno parte gli autori di questo contributo, insieme ad alcuni partner esterni, in particolare il Museo Galileo di Firenze, la Fondazione Galileo Galilei di Pisa e il Museo di Storia Naturale di Rosignano Marittimo.

Nella prima fase del progetto, l'attenzione si è concentrata sulla documentazione e sulla catalogazione degli oltre cento oggetti della collezione presente nel Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Università di Pisa, che include strumenti scientifici storici, oggetti di vetreria e un piccolo reagentario. L'obiettivo è quello di giungere a una ufficializzazione della collezione, con la realizzazione delle schede tecniche degli oggetti esposti in vista di un loro successivo inserimento nel catalogo nazionale dei beni culturali [2]. Un altro obiettivo del progetto è quello di rendere fruibile la collezione sia ai ricercatori ed esperti del settore sia al pubblico generico, garantendo al contempo un livello più alto di conservazione. A tal scopo è stato realizzato un sito web in continuo aggiornamento che contiene anche una sezione divulgativa dove pubblicare contenuti di approfondimento legati ad alcuni degli strumenti storici contenuti nella collezione [15].

Nella prima fase della ricerca, inoltre, è stato possibile ricostruire gli inventari storici, conservati in frammenti nell'Archivio dell'Università di Pisa, che ci hanno restituito un quadro abbastanza definito degli strumenti che erano in uso nel Gabinetto di Chimica e nel Gabinetto di Fisica Sperimentale dai primi anni del 1800 sino al 1970, quando i diversi istituti di chimica sono confluiti nell'attuale Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale.

Integrando al lavoro di catalogazione digitale la ricerca storica, in una seconda fase del progetto, verranno sviluppate varie attività e percorsi didattici, con l'obiettivo di restituire a questi oggetti la loro dimensione narrativa, come testimoni materiali delle tappe fondamentali dell'evoluzione del pensiero scientifico. Una delle idee alla base del progetto è che il progresso scientifico non va vissuto

in maniera passiva, ma occorre mantenere un atteggiamento inquisitorio nei confronti dei mezzi che vengono utilizzati, senza dare per scontato la loro esistenza. A questo scopo diviene fondamentale interrogarsi sulla creazione di questi strumenti, sul contesto socioculturale, sulla necessità che ne ha dettato la realizzazione e di come questi oggetti hanno influenzato la cultura. Lo strumento scientifico non è più solo un oggetto dedicato a un fine, ma un sistema complesso dotato di una vita culturale e di qualità artistiche in grado di raccontare una storia che può essere utilizzata per formare studenti favorendo un atteggiamento critico e costruttivo.

3. “Leggere” gli strumenti scientifici storici

Le collezioni di strumenti scientifici dell’Università di Pisa sono molto estese e contano all’interno del Sistema Museale d’Ateneo diverse centinaia di oggetti. Il Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale contribuisce a questo patrimonio con un centinaio di strumenti che coprono un periodo di tempo che va dal 1890 al passato più recente. Per fare un esempio vediamo come, partendo da due strumenti della collezione è possibile andare a ricostruire l’attività di ricerca svolta nei laboratori dell’Università e quali erano gli interessi e le attività di chi vi lavorava. Questi strumenti sono conservati in due teche di legno ed esposti nell’atrio del Dipartimento di fronte alle bacheche principali della collezione. Si tratta di uno spettrogoniometro e di un saccarimetro/polarimetro.

Lo strumento mostrato in figura 2 è uno *spettrogoniometro*, vale a dire uno spettroscopio montato su un apparato che permette di effettuare spostamenti angolari noti e, quindi, di andare a misurare angoli di interesse con estrema precisione.



Figura 2. Spettrogoniometro Hildebrand früher August Lingke & Co. Freiberg 1892; fase di raccolta fotografica dello strumento, con e senza teca, e verifica dello stato di conservazione

Questo strumento in particolare si basa sul modello elaborato da Eilhard Mitscherlich (1794-1863) i cui studi hanno portato alla scoperta del fenomeno dell’isomorfismo cristallografico nel 1819 [16]. Eilhard aveva apportato delle modifiche, in particolare l’aggiunta di una scala a nonio circolare, al goniometro a riflessione inventato dal chimico inglese William Hyde Wollaston (1766-1828) nel 1809 [17]. Sullo strumento è possibile vedere la firma della ditta costruttrice che riporta: “*Hildebrand früher August Lingke & Co. Freiberg in Sachsony 1892*”. La famiglia Lingke, famiglia patrizia presente a Freiberg dal XVI secolo, aveva iniziato a dedicarsi alla costruzione di strumenti matematici e di misura con Wilhelm Friedrich Lingke (1784-1867), il quale diventò poi il proprietario della ditta che prenderà il suo nome, fondata nel 1791 dal suo maestro Studer [18]. Il figlio di Wilhelm Friedrich Lingke fece pratica nelle officine del padre, studiando contemporaneamente mineralogia presso l’Università di Freiberg e fu lui a guidare la ditta tra il 1859 e il 1873, anno in cui fu ceduta a Max Hilde-

brand (1839-1910) [19], genio della meccanica, ideatore di vari strumenti per il rilievo topografico, ed esploratore [20]. Il nome della ditta come riportato sullo strumento presente nella collezione del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Università di Pisa è stato adottato nel 1889.

Lo spettroscopio è uno strumento che consente la semplice osservazione dello spettro puro della radiazione incidente, con le relative rilevazioni metriche delle lunghezze d'onda. Questo tipo di strumento veniva usato spesso in mineralogia e in ottica per la misura degli angoli dei cristalli. Lo strumento, infatti, permette di misurare l'angolo diedro tra le pareti di un prisma.

Usando il metodo dell'angolo di minima deviazione, lo strumento permette anche la misura dell'indice di rifrazione del vetro di cui è fatto il prisma, nonché misure di tipo spettroscopico. Lo spettrometro è di ottone laccato (lacca storica a base di resine terpeniche, coloranti naturali disciolti in alcool etilico) ad eccezione del pesante treppiede che è di ghisa verniciata in nero. Lo strumento è costituito da diversi elementi (Figura 3): A) un collimatore fissato al treppiede; B) un disco circolare sul cui bordo argentato è incisa una scala divisa in gradi e quarti di grado, girevole intorno a un asse verticale, passante per il suo centro, al quale può venire fissato; C) una piattaforma porta prismi girevole attorno all'asse dello strumento indipendentemente o solidalmente con il disco circolare graduato; D) un cannocchiale, girevole intorno all'asse, al quale può venire bloccato; E) una doppia alidada, solidale con il supporto del cannocchiale, costituita da due indici con nonio e oculare per la lettura, i cui lembi scorrono, da parti diametralmente opposte, sul bordo del disco graduato. Una volta che il cannocchiale (o il disco graduato) è stato bloccato all'asse dello strumento, prima di effettuare la lettura sui due noni, per migliorare la precisione delle misure, è necessario aggiustare il puntamento mediante un'apposita vite micrometrica. La combinazione delle letture fatte sui due noni (F), essendo questi diametralmente opposti, elimina l'eventuale errore di eccentricità dell'alidada.

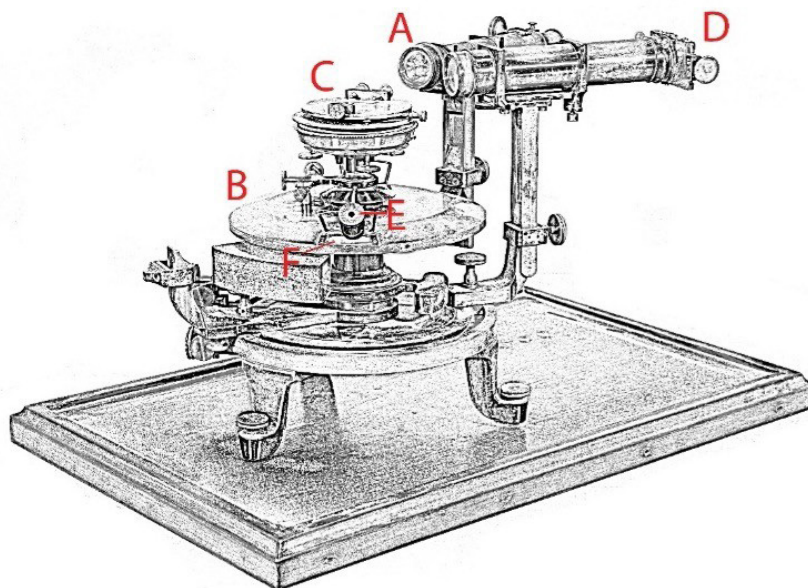


Figura 3. Schema dello spettrogoniometro (per la spiegazione delle lettere, vedere il testo)

Il collimatore è costituito da una fenditura verticale, munita di vite di regolazione, posta nel piano focale anteriore di una lente convergente collimatrice. Illuminando la fenditura con una sorgente posta lungo l'asse del collimatore, la lente collimatrice genera un fascio di luce parallelo che l'obiettivo del cannocchiale fa convergere nel proprio piano focale posteriore producendo un'immagine della fenditura che l'oculare, accomodato su quel piano, consente di osservare. La piattaforma è costituita da

due dischi sovrapposti e può essere fissata all'asse dello strumento: uno dei due dischi poggia sull'altro mediante due viti salienti e un perno con molla, fra loro equidistanti, che consentono di disporlo perpendicolare all'asse dello strumento.

In figura 4 possiamo apprezzare uno strumento che per molti anni è stato di grande importanza analitica e merceologica: si tratta di un polarimetro a penombra, chiamato poi comunemente saccarimetro, visto il suo utilizzo principale.

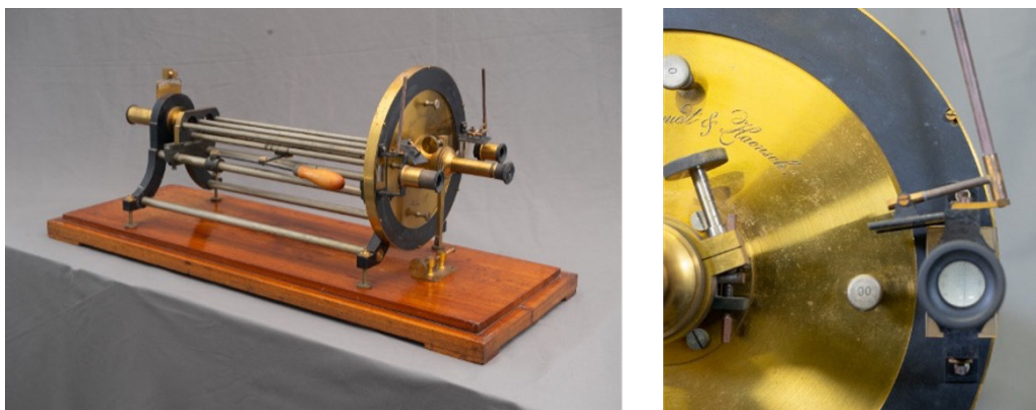


Figura 4. Saccarimetro/Polarimetro Franz Schmidt & Haensch, circa 1890

Questo strumento, parte della collezione di strumenti scientifici storici del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Università di Pisa, può essere datato tra il 1890 e il 1900 ed è uno dei primi esemplari realizzato dalla compagnia "*Franz Schmidt & Haensch*" di Berlino. Franz Schmidt (1825-1888) era un costruttore di strumenti di precisione di Berlino e nel 1864 decise di mettersi in società con il costruttore di strumenti meccanici e ottici Wilhelm Herrmann Haensch (1832-1896), un sodalizio che ebbe molto successo. Possiamo ricordare in particolare la costruzione del primo interferometro su commissione e disegno di Albert A. Michelson (1852-1931) per la misura della velocità della luce, seguito dal lavoro svolto nel 1890 con il chimico Karl Ventzke, che lavorava presso la *Schicklersche Zuckerfabrik*, importante ditta di lavorazione dello zucchero della Germania [21]. A Ventzke si deve la diffusione dei metodi polarimetrici per l'analisi quantitativa del saccarosio, tant'è che la scala di misura utilizzata viene chiamata *scala Ventzke*, in onore dell'impostazione originale da lui proposta: un grado Ventzke corrisponde a una centesima dell'angolo di rotazione ottica in un campione standard di saccarosio puro in colonna da 200 mm a 17,5 °C [22]. Le collaborazioni della ditta nell'ambito della polarimetria continuarono poi nel 1905 insieme ad Alfred Werner (1866-1919), con il quale fu realizzato un *polarimetro circolare* che lo studioso utilizzò per verificare le sue teorie sulla disposizione spaziale dei complessi inorganici, studi che gli valsero il premio Nobel per la chimica nel 1913 [23]. La ditta è attiva ancora oggi: polarimetri e saccarimetri rappresentano tuttora strumenti di misura di grande importanza.

Lo strumento presente nella collezione del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Università di Pisa (Figura 5) è costituito da una solida struttura in ghisa verniciata di nero (A), dotata di quattro piedini in ottone regolabili che permettono il corretto posizionamento livellato dello strumento. In primo piano possiamo vedere il disco (B), in ottone laccato e in parte verniciato in nero, che costituisce l'analizzatore, con al centro un cannocchiale (C) per osservare la cella contenente il campione. Si vedono anche due oculari (D), sempre in ottone, che permettono di leggere la scala a nonio (E) presente dentro al disco e di effettuare la misura. La scala riportata va da -25 a +100 gradi Ventzke. Tra i due sostegni in ghisa possiamo vedere la sede che ospita il campione (F) e anche un secondo tubo parallelo (G). Particolarità di questo strumento è infatti la presenza di due sedi per campioni, che possono traslare sul piano a mezzo di una leva di cui si vede in foto il pomello in legno

(H): in questo modo è possibile tenere sempre presente il riferimento per la taratura dello strumento. Per effettuare la misura si utilizzava una lampada al sodio, posta all'estremità opposta dell'analizzatore. Il fascio luminoso attraversa un primo prisma di Nicol, il campione e un successivo prisma di Nicol che può essere fatto ruotare insieme all'analizzatore. Per ruotare l'analizzatore si possono usare i tre pomelli metallici che sono presenti sulla sua superficie. Il punto di estinzione è determinato utilizzando il sistema di Lippich a doppio prisma [24].

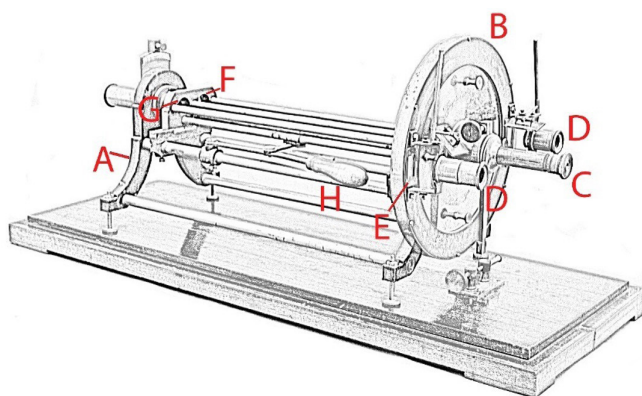


Figura 5. Schema del polarimetro (per la spiegazione delle lettere, vedere il testo)

Entrambi gli strumenti descritti sfruttano le interazioni luce-materia per indagare la natura delle sostanze. Possiamo supporre un'attività di laboratorio incentrata sulle analisi di sostanze sia organiche che inorganiche, supposizioni che trovano riscontro se andiamo a confrontarle con le fonti archivistiche in nostro possesso. Dagli inventari storici conservati presso l'Archivio Generale dell'Università di Pisa si legge che questi strumenti sono stati donati al dipartimento da Raffaello Nasini (1854-1931), figura chiave della chimica italiana dei primi anni del 1900 e discendente di una scuola chimica che, come vedremo, si è sviluppata intorno all'analisi chimica delle sostanze.

4. Una breve storia della chimica pisana fino ai primi decenni del XX secolo

Come scrive lo storico Marco Beretta [25], a Pisa l'insegnamento della chimica iniziò nel 1614, grazie alla nascita di un laboratorio di preparazioni associato all'Orto botanico; tuttavia, la prima vera cattedra di chimica nacque solo nel 1757, quando il primo granduca di Toscana, Ferdinando II, la istituì e chiamò il medico fiorentino Antonio Nicola Branchi, proprietario della Spezieria del Cinghiale a Firenze, come primo titolare. Il laboratorio di chimica era ancora molto legato alle scienze mediche e di fatto rimase un laboratorio di preparazioni mediche e farmaceutiche fino al 1833.

Nel frattempo, dopo la morte di Antonio Nicola Branchi avvenuta nel 1810, la cattedra fu ricoperta dal figlio, Giuseppe Branchi, che, pur non avendo lasciato lavori scientifici significativi, ebbe a cuore il rinnovamento dell'insegnamento della chimica, accogliendo le nuove idee di Lavoisier e Berthollet [25]. Come ricorda il chimico e divulgatore Gianni Fochi [26], proprio nel 1833 il laboratorio di chimica pisano fu trasferito nell'edificio in via Santa Maria n. 26, oggi sede della '*Domus Galileiana*', che ha custodito a lungo molta parte della strumentazione e dei documenti di archivio legati alle cattedre di chimica e di fisica a Pisa.

Giuseppe Branchi continuò a coprire la cattedra di chimica fino al 1841, quando si ritirò dall'insegnamento, e per qualche tempo la cattedra fu temporaneamente affidata a uno dei massimi esponenti della fisica italiana del 1800, Carlo Matteucci. Pur non essendo un chimico, Matteucci era esperto di elettrochimica e pubblicò diversi lavori di chimica organica e 'fisiologica' su diverse riviste, compresa la prestigiosa '*Annales de Chimie*'.

Nel 1842 pare sia stato proprio Matteucci a chiamare a Pisa un chimico già molto noto, Raffaele Piria [27], per ricoprire l'incarico di docente di chimica. È a Piria che viene attribuita la nascita della scuola di chimica italiana, non solo per le sue originali e innovative ricerche nel campo della chimica organica, ma anche per aver formato quelli che poi sarebbero divenuti famosi e importanti chimici italiani, come Stanislao Cannizzaro, Cesare Bertagnini, Sebastiano De Luca, e molti altri ancora. Raffaele Piria insegnò a Pisa lasciando importanti tracce, dal 1842 al 1855, anno in cui si spostò all'Università di Torino, non senza rimpianti, probabilmente anche a causa dell'ostilità del governo del granducato nei suoi confronti, per il supporto che aveva dato alle insurrezioni contro gli austriaci del 1848.

La sua cattedra fu coperta dagli allievi Cesare Bertagnini (dal 1856 al 1857, quando morì prematuramente di malattia) e Sebastiano De Luca (dal 1857 al 1862). Con De Luca fu istituita anche la cattedra di chimica agraria.

Dopo che De Luca si trasferì a Napoli nel 1862, fu ancora un altro allievo di Raffaele Piria, il chimico Paolo Tassinari, a continuare l'insegnamento della chimica a Pisa. Qui vi rimase per quarantuno anni, fino al 1903, dopo aver rivoluzionato l'insegnamento e soprattutto i laboratori. Tassinari è ricordato per la cura e l'attenzione alla preparazione teorica e pratica dei suoi allievi. Raffaello Nasini, illustre chimico di cui parleremo a breve, ricorda nella commemorazione per il grande maestro [28] che Tassinari aveva predisposto alcune aule per le esercitazioni, cosa assai inusuale fino ad allora, e che queste esercitazioni erano aperte non solo agli iscritti del corso di chimica, ma in generale a tutti i cultori della materia. Nasini lo definisce anche uno dei migliori chimici analisti dell'epoca in Italia [28] e la sua fama è testimoniata da incarichi molto delicati, come quello che lo portò ad analizzare il liquido fuoriuscito dalla ferita che Garibaldi si era procurato combattendo in Aspromonte nel 1862: tale analisi fu fondamentale per individuare la posizione esatta della pallottola che aveva ferito Garibaldi [29]. Tassinari tenne a Pisa anche un corso di chimica 'docimastica' (ovvero merceologica) e tradusse diverse opere a scopo didattico, come il famoso 'Sunto' dell'amico Stanislao Cannizzaro [30]. Durante tutti gli anni in cui Tassinari fu attivo a Pisa, molti chimici importanti frequentarono i suoi laboratori, tra questi il chimico e musicista russo Aleksandar Borodin, il chimico agrario Sesto Faustini, che per molti anni a partire dal 1876 fu il docente di chimica agraria a Pisa, e Raffaello Nasini. Quest'ultimo sostituì Tassinari dopo un breve intervallo in cui un altro allievo del maestro, Ubaldo Antony, coprì la cattedra e precisamente fino al 1906, anno in cui Antony si trasferì al Politecnico di Milano.

Raffaello Nasini è stato un importante chimico italiano, ritenuto il fondatore della chimica fisica in Italia [31-34], uno dei primi a fare studi sui gas nobili e sulla radioattività delle acque termali. Raffaello Nasini era stato studente del Tassinari e, subito dopo la laurea nel 1878, si era trasferito a Roma per lavorare nel laboratorio di Stanislao Cannizzaro, dove rimase fino al 1891 con una interruzione di due anni, in cui si trasferì a Berlino nel laboratorio di Hans Heinrich Landolt. Negli anni romani, Nasini conobbe altri futuri prominenti chimici italiani, come Augusto Piccinini e Giacomo Ciamician, di cui divenne cognato e con cui ebbe una intensa e lunga amicizia. Dal 1897 al 1905 Raffaello Nasini si spostò a Padova, dove contribuì allo sviluppo della chimica fisica e inaugurò un nuovo corso in elettrochimica, oltre a diventare rettore dell'Università di Padova dal 1900 al 1905. Durante la sua attività ricevette la stima e i finanziamenti di Ludwig Mond (1839-1909), chimico e industriale di fama, che farà dono a Nasini proprio dei due strumenti che abbiamo descritto [33]. Tornato a Pisa nel 1906, Raffaello Nasini rimase a insegnare chimica generale e chimica fisica fino al 1929, anno in cui si ritirò dall'insegnamento. In questi stessi anni, Nasini intraprese una fruttuosa e intensa collaborazione con la famiglia De Larderel e con il principe Ginori Conti, proprietari dei soffioni di Larderello che presto, proprio grazie a Nasini, si trasformarono in una impresa industriale di rilievo nazionale.

5. Considerazioni finali

Attraverso il progetto di ricerca Va3SCoDi vogliamo portare le collezioni di strumenti scientifici storici, e in particolare quella del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Università di Pisa, a rivestire un ruolo attivo come attori culturali all'interno dei luoghi di istruzione e in generale di conservazione. A titolo di esempio, in questo articolo, abbiamo scelto di focalizzare l'attenzione su due

strumenti storici molto particolari, uno spettrogoniometro e un polarimetro/saccarimetro databili intorno al 1890-1892. Questi strumenti sono esposti in una zona molto frequentata del Dipartimento, vicino all'aula magna, e attirano l'attenzione di studenti e visitatori soprattutto per la loro bellezza. Non molti però conoscono il loro funzionamento, a cosa sono serviti e chi li ha utilizzati. Questo contributo ci ha permesso di raccontare un po' della loro storia e dei principi di funzionamento, ma anche di valorizzare aspetti tecnici legati alla fabbricazione di strumenti scientifici di altissima qualità nella seconda metà del XIX secolo, ricordando i legami tra vari ambiti della scienza e della tecnica, il contesto particolare della scuola chimica pisana e la figura di Raffaello Nasini.

Possiamo concludere che la strumentazione scientifica storica si colloca in un ruolo privilegiato per riuscire a funzionare da trasformatore epistemico in modo da rendere tangibili i progressi che sono stati compiuti dall'umanità nel campo della scienza e della tecnologia. Crediamo anche che l'inserimento delle collezioni all'interno di questa catena di valori sia funzionale a garantire delle migliori condizioni di conservazione, tenendo viva l'attenzione su tale eccezionale patrimonio culturale che purtroppo risulta spesso trascurato.

Riferimenti bibliografici

- [1] P. Brenni, Gli strumenti della scienza e la loro produzione, *Enciclopedia Treccani*, Il Contributo italiano alla storia del Pensiero - Tecnica, 2013.
- [2] Catalogo generale dei beni culturali; beni scientifici e tecnologici (<https://catalogo.beniculturali.it/search/typeOfResources/ScientificOrTechnologicalHeritage>).
- [3] I. Morisetti, E. Servida, L. Ronzon, Da gabinetti scientifici a musei scolastici: il patrimonio dei licei scientifici per co-costruire nuove competenze e relazioni. *Scientia*, 2024, **1** (<https://www.rivistascientia.it/it/articolo/12251/da-gabinetti-scientifici-a-musei-scolastici>).
- [4] A. Franza, G. Pratesi, Learning Sciences from the Past: Recovery, Study, and Cataloging of a Historical Natural History School Museum, *Educ. Sci.*, 2024, **14**(1), 80 (<https://www.mdpi.com/2227-7102/14/1/80>).
- [5] C. Maurizio, Alla scoperta dei Musei delle Scienze: un supporto alle discipline STEM, *La Tecnica della Scuola*, 07/02/2024 (<https://www.tecnicadellascuola.it/alla-scoperta-dei-musei-delle-scienze-un-supporto-alle-discipline-stem>).
- [6] Autori vari, *La chimica nei musei. Creatività e conoscenza* (a cura di V. Domenici, L. Campanella), Pisa University Press, Pisa, 2020.
- [7] L. F. Bernarduzzi, E. M. Bernardi, School, museum, university: a community for science education, *Nuovo Cimento C - Colloquia and Communications in Physics*, 2023, **46**(6) (<https://www.sif.it/riviste/sif/ncc/econtents/2023/046/06/article/17>).
- [8] V. Domenici, Progettazione di attività didattiche STEAM in ambito museale durante i due anni di pandemia Covid-19, *La chimica nella scuola (CnS)*, 2022, **2**, 38-40 (<https://chimicanellascuola.it/index.php/cns/article/view/37/37>).
- [9] 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>).
- [10] 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>).
- [11] Pagina web dedicata al progetto speciale di didattica "Realizzazione di progetti di didattica con approccio STEM in ambito museale" (<https://smslab.dcci.unipi.it/progetti-stem.html>).
- [12] Pagina web dedicata alla giornata conclusiva del Progetto speciale di didattica "Insegnare (e imparare) la chimica attraverso i musei e le collezioni di strumenti scientifici" (<https://www.dcci.unipi.it/giornata-collezione-strumenti-2024.html>).
- [13] Sito alla pagina della collezione di strumenti del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale (<https://ricerca.dcci.unipi.it/instrument-museum.html>).

- [14] V. Domenici, G. Angelici, Insegnare (e imparare) la chimica attraverso i musei e le collezioni di strumenti scientifici, *La chimica nella scuola (CnS)*, 2025, **3**, 13-24 (<https://chimicanellascuola.it/index.php/cns/article/view/250>).
- [15] Sito alla pagina del progetto Va3SCoDi (<https://va3scodi.dcci.unipi.it/index.php>).
- [16] E. Mitscherlich, Ueber die Kristallisation der Salze in denen das Metall der Basis mit zwei Proportionen Sauerstoff verbunden ist, *Abhandlungen der Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, Jg.1818-1819, pp. 427-437.
- [17] W. H. Wollaston, Description of a reflective goniometer, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1809, **99**, 253-258.
- [18] W. Fischer, Neue Deutsche Biographie, vol. 14, voce "Lingke, Wilhelm Friedrich", 1985.
- [19] J. B. Te Pas, Max Hildebrand, late August Lingke & Co. G.m.b.H., *Bulletin of the Scientific Instrument Society*, 1998, **58**, 19-21.
- [20] M. Hildebrand, Früher August Lingke & Co. G.m.b.H., Freiberg, 1932.
- [21] G. Eggleston, B. Legendre, M. Godshall, Sugar and Other Sweeteners, in Kent and Riegel's Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology, Springer, Boston, 2017 (https://doi.org/10.1007/978-0-387-27843-8_35).
- [22] D. Singerman, A Doubt is at Best an Unsafe Standard: Measuring Sugar in the Early Bureau of Standards, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 2007, **112**(1), 53-66 (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27110454/>).
- [23] G. Jackson, J. A. McKeon, S. Cortez, Alfred Werner's inorganic counterparts of racemic and meso-meric tartaric acid: A milestone revisited, *Inorg. Chem.*, 2004, **43**(20), 6249-6254.
- [24] C. Koester, Half-shade eyepieces for the AO Baker interference microscope, *Journal of the Optical Society of America*, 1959, **49**, 560-562.
- [25] M. Beretta, La Chimica, in *Storia dell'Università di Pisa. 1737-1861*, Edizioni Plus Università di Pisa, 2001, vol. 2:3, pp. 883-887.
- [26] G. Fochi, La chimica pisana, *Annali di Storia delle Università Italiane*, 2010, **14**, 207.
- [27] A. Focà, F. Cardone, *Raffaele Piria, medico, chimico, patriota, innovatore della Chimica in Italia*, Laruffa editore, Reggio Calabria, 2003.
- [28] R. Nasini, Paolo Tassinari, in *La chimica italiana* (a cura di G. Scorano), 2008, pag. 19 (<https://www.soc.chim.it/sites/default/files/Chimici%20Italiani.pdf>).
- [29] M. Taddia, Il chimico di Garibaldi. Paolo Tassinari e l'arte dell'analisi, *La Chimica e l'Industria*, 2009, **10**, 124.
- [30] S. Cannizzaro, *Sunto di un corso di filosofia chimica*, Università di Genova, 1858.
- [31] A. Macchioni, Raffaello Nasini: an eclectic chemist heralding the interdisciplinary essence of inorganic chemistry, *Eur. J. Inorg. Chem.*, 2019, **5**, 546-549 (<https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ejic.201801390>).
- [32] E. Mariani, Raffaello Nasini: le ricerche sui gas nobili e sulla radioattività, in *Memorie e Rendiconti di Chimica, Fisica, Matematica e Scienze Naturali*, Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, 1998, serie 5, Volume XXII, pag. 25-33.
- [33] G. Fochi, Cento anni fa il primo metallo-carbonile binario: l'opera di Ludwig Mond e il contributo di Raffaello Nasini, in *Memorie e Rendiconti di Chimica, Fisica, Matematica e Scienze Naturali*, Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, 1990, serie 5, volume XIV, pag. 359-365.
- [34] A. Bassano, Raffaello Nasini, la chimica fisica e l'idrologia medica, in *Memorie e Rendiconti di Chimica, Fisica, Matematica e Scienze Naturali*, Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, 2013, serie 5, volume XXXVII - Tomo II°, sezione Scienze Fisiche, pag. 225-237.

Siamo “polvere di stelle”: come la chimica costruisce l’Universo

Giuseppe Bellomo¹

e-mail: Giuseppe.bellomo2@studio.unibo.it

Abstract. This work examines the connection between Chemistry and Astronomy, showing how the chemical composition of matter is the result of cosmic evolution. Primordial nucleosynthesis produced only the lightest elements, while successive generations of stars synthesized heavier elements through nuclear fusion. Supernovae explosions and Neutron Stars mergers dispersed these elements into the interstellar medium, enabling the formation of chemically enriched stars and planetary systems. The Sun is discussed as a second-generation star whose composition reflects this cumulative process. Finally, the study considers the future evolution of the Sun and the fate of the Earth, highlighting that planetary systems and their chemistry represent temporary stages in the continuous evolution of matter in the Universe.

Keywords: nucleosintesi; evoluzione stellare; supernovae; stelle di neutroni; la fine della Terra

1. Introduzione

Chimica e astronomia vengono spesso considerate discipline distinte: la prima si occupa della struttura e delle trasformazioni della materia su scala microscopica, mentre la seconda studia l’Universo su scale spaziali e temporali immensamente più ampie. Questa distinzione, tuttavia, è in larga parte convenzionale. La composizione chimica della materia osservabile sulla Terra è, infatti, il risultato diretto di processi avvenuti nel corso della storia cosmica e non può essere compresa appieno senza inserirla nel contesto della sua origine. Gli atomi che costituiscono pianeti, atmosfere e organismi viventi non sono entità immutabili, ma il prodotto di condizioni fisiche ben definite, caratterizzate da temperature estreme, densità incredibilmente elevate, intensi campi gravitazionali e tempi dell’ordine di miliardi di anni. Sotto questo punto di vista, la chimica rappresenta una disciplina profondamente legata con l’evoluzione dell’universo in cui la possibilità che certi elementi o strutture esistano, persistano o si trasformino dipende in modo inequivocabile dall’ambiente in cui si trovano. Questo lavoro analizza il legame profondo tra le due discipline mostrando come l’origine, l’abbondanza e la distribuzione degli elementi siano il risultato di una lunga evoluzione che procede da miliardi di anni. In quest’ottica, il Sole, la Terra e più in generale il sistema solare non rappresentano né un punto di partenza né un punto di arrivo, ma una configurazione temporanea della materia all’interno di un ciclo estremamente più vasto.

2. Nucleosintesi primordiale e condizioni iniziali della chimica cosmica

La storia del legame tra chimica e astronomia inizia nei primissimi istanti dell’universo, in un’epoca in cui le condizioni fisiche erano radicalmente diverse da quelle osservabili oggi. Nei primi secondi dopo il Big Bang, lo spazio era caratterizzato da temperature superiori a 10^{10} kelvin e da densità estremamente elevate. In queste condizioni, la materia non poteva esistere sotto forma di atomi o

¹ Giuseppe Bellomo, laureato in Fisica e Astronomia, è attualmente laureando in Didattica e Comunicazione delle Scienze Naturali presso l’Alma Mater Studiorum-Università di Bologna. Insegna Matematica e Fisica presso il Liceo Artistico “R. Cottini” di Torino e divulga temi e curiosità astronomiche sui suoi canali social con il nome *Astrodoc999*.

nuclei stabili: protoni e neutroni si formavano e si distruggevano continuamente all'interno di un plasma dominato da particelle elementari e radiazione. Con l'espansione dell'Universo e il conseguente raffreddamento, si creò però, per la prima volta, la possibilità di ottenere una struttura nucleare stabile. Quando la temperatura scese al di sotto del miliardo di kelvin, protoni e neutroni poterono combinarsi formando i primi nuclei atomici. Questa fase, nota come nucleosintesi primordiale, avvenne tra circa il primo e il ventesimo minuto dopo il Big Bang. I protoni, già formati nei primi istanti e molto più abbondanti dei neutroni, erano stabili: per questo gran parte di essi non trovò neutroni con cui legarsi, e il Prozio (^1H cioè l'isotopo di idrogeno costituito da un solo protone e privo di neutroni), rimase l'elemento dominante dell'universo. Solo una piccola parte di protoni riuscì a catturare un neutrone, formando deuterio, il primo "mattoncino" fondamentale per i processi successivi. Una volta che l'universo si raffreddò ulteriormente le reazioni poterono proseguire con efficienza, portando alla formazione di elio-3, elio-4 e piccole tracce di litio-7.

Il risultato finale di questa fase fu una composizione chimica sorprendentemente semplice, ma molto ben definita: circa il 75% di idrogeno e il 25% di elio, con tracce minime di litio. Questa distribuzione non fu arbitraria, ma il risultato diretto dell'equilibrio tra tre fattori fondamentali: la temperatura dell'universo, la densità della materia e la rapidità dell'espansione cosmica. Una variazione anche minima di uno solo di questi parametri avrebbe prodotto un universo chimicamente molto diverso, con conseguenze radicali sull'evoluzione successiva delle strutture cosmiche. La nucleosintesi primordiale impose, quindi, limiti estremamente rigidi: il breve tempo disponibile prima che l'espansione diluisse la materia impedì qualsiasi percorso verso una chimica più complessa. Questo spiega perché elementi fondamentali come carbonio, ossigeno e altri fino al ferro non possano avere avuto origine primordiale, ma debbano necessariamente essere stati prodotti in fasi successive. Un aspetto fondamentale di questo stadio è che esso ha stabilito le condizioni per tutta la chimica futura, poiché l'abbondanza di alcuni elementi rispetto ad altri ha determinato la formazione e la composizione di nubi di gas da cui si sono formate le prime stelle e ha influenzato direttamente la loro evoluzione. In particolare, la scarsità di elementi più pesanti ha limitato fortemente i meccanismi di raffreddamento delle nubi stesse, rendendo più difficile il collasso gravitazionale e favorendo, nelle prime epoche cosmiche, la formazione di astri molto massicci. Ogni ulteriore processo, dalla fusione nucleare nelle stelle fino alla nascita dei pianeti, è stato dunque vincolato da questo stato iniziale della materia.

3. Dalla materia primordiale alle stelle di Popolazione III

Una volta conclusa la nucleosintesi primordiale, l'universo entrò in una fase radicalmente diversa della sua evoluzione, durante la quale la composizione chimica rimase sostanzialmente invariata per centinaia di milioni di anni e le strutture su larga scala iniziarono molto lentamente a formarsi sotto l'azione della gravità. In questo periodo, la materia era costituita quasi esclusivamente da idrogeno ed elio neutri, distribuiti in modo pressoché uniforme, con leggere fluttuazioni di densità ereditate dalle prime fasi dell'espansione. Queste fluttuazioni, seppur inizialmente minime, giocarono un ruolo importante. Le lievi variazioni di densità presenti nel gas primordiale furono amplificate dalla gravità: le regioni appena più dense esercitavano infatti un'attrazione gravitazionale leggermente maggiore, catturando ulteriore materia e diventando progressivamente più compatte a tal punto da innescare la formazione delle prime nubi. Tale processo segnò l'inizio della transizione da un universo chimicamente semplice, ma strutturalmente omogeneo, a un cosmo in cui la materia cominciava a organizzarsi in sistemi complessi. Un fattore determinante di questa fase, come accennato precedentemente, fu l'assenza quasi totale di elementi pesanti. Gli atomi di idrogeno ed elio hanno strutture elettroniche molto semplici, con pochi stati eccitati disponibili, per cui possono emettere radiazione solo attraverso un numero limitato di transizioni energetiche e riescono a dissipare calore in modo poco efficiente. In assenza di un raffreddamento adeguato, la pressione termica ha contrastato il collasso gravitazionale, rallentando la formazione delle prime strutture compatte. Inoltre, il raffreddamento del gas primordiale fu possibile praticamente solo grazie all'idrogeno molecolare, H_2 , capace di emettere radiazione a queste temperature. Tuttavia, la sua formazione era rara e inefficiente, quindi il gas

riusciva a perdere energia molto lentamente. Si impose dunque un vincolo fondamentale: solo nubi molto massicce potevano accumulare una quantità sufficiente di materia da superare la pressione termica e collassare sotto il proprio peso. Di conseguenza, le prime stelle che si formarono non furono simili a quelle osservabili attualmente, ma oggetti estremamente massicci oggi noti come stelle di Popolazione III. Esse hanno rappresentato la prima generazione di oggetti celesti del nativo universo caratterizzate dall'assenza totale di metalli. Ciò fece sì che la loro composizione rispecchiasse direttamente quella fissata dalla nucleosintesi primordiale, mentre il limitato raffreddamento radiativo ne favorì la crescita fino a valori probabilmente compresi tra alcune decine e qualche centinaio di masse solari (Figura 1).



Figura 1. Probabile confronto fra una stella di Popolazione III e il Sole

Inoltre, tali dimensioni portarono a temperature interne estremamente elevate, sufficienti a innescare rapidamente le reazioni di fusione nucleare. Le stelle di Popolazione III ebbero, quindi, vita molto breve, dell'ordine di pochi milioni di anni, rispetto ai miliardi di anni tipici delle stelle di massa minore. Pur essendo formate quasi esclusivamente da idrogeno ed elio, esse furono i primi ambienti in cui divenne possibile la produzione sistematica di elementi più pesanti. La fine della vita delle stelle di Popolazione III fu altrettanto importante quanto la loro formazione: molte di esse terminarono il proprio ciclo vitale in violente esplosioni, disperdendo nello spazio interstellare gli elementi prodotti durante la loro esistenza. Il materiale arricchito si mescolò poi al gas primordiale circostante, modificandone la composizione chimica e rendendo possibile la formazione di nuove generazioni stellari con caratteristiche differenti.

Esse hanno pertanto segnato il passaggio da un cosmo dominato da una chimica estremamente semplice a un ambiente in cui la varietà degli elementi ha cominciato ad aumentare progressivamente. Senza questa prima generazione stellare, non sarebbe stato possibile alcun ulteriore sviluppo, né tanto meno la formazione di stelle simili al Sole.

4. Evoluzione stellare: stelle di Popolazione II e I

Con la dispersione nel mezzo interstellare degli elementi prodotti dalle stelle di Popolazione III, l'universo entrò in una nuova fase della propria evoluzione. Il gas, pur rimanendo dominato da idrogeno ed elio, non fu più chimicamente primordiale: la presenza anche di quantità molto piccole di elementi più pesanti modificò in modo sostanziale il comportamento fisico della materia e, di conseguenza, i processi di formazione ed evoluzione successiva. Questo arricchimento segnò la transizione verso

la formazione di nuove stelle, che si svilupparono in ambienti a basso contenuto metallico, ma non del tutto privi di elementi più pesanti. Dal punto di vista fisico, la presenza soprattutto di carbonio e ossigeno introdusse nuovi canali di raffreddamento radiativo. Atomi e ioni con strutture elettroniche più complesse poterono emettere radiazione in modo più efficiente rispetto all'idrogeno e all'elio, consentendo al gas di dissipare energia più rapidamente durante il collasso gravitazionale. Una conseguenza diretta di questo processo fu la nascita di stelle con una distribuzione di masse diverse da quella delle generazioni precedenti chiamate stelle di Popolazione II. Queste ultime erano formate sia da oggetti celesti di grande massa, capaci di evolvere rapidamente, sia da astri di massa intermedia o piccola, caratterizzate da tempi di vita molto più lunghi. Questa diversificazione ha avuto un impatto fondamentale sulla chimica dell'universo, poiché ha determinato quali reazioni nucleari sarebbero potute avvenire e su quali scale temporali. All'interno delle stelle di Popolazione II, la fase di sequenza principale è stata (e lo è tutt'ora) dominata dalla fusione dell'idrogeno in elio. Nelle stelle meno massicce la fusione dell'idrogeno procede soprattutto tramite la catena protone-protone, mentre in quelle con massa maggiore diventa dominante il ciclo carbonio-azoto-ossigeno (CNO). Anche in questo caso la storia cosmica lascia un'impronta decisiva: le reazioni nucleari che una stella può sostenere dipendono direttamente dalla composizione del gas da cui hanno avuto origine. Questi elementi non rimangono necessariamente confinati nel nucleo: processi di mescolamento interno, come i fenomeni convettivi, possono trasportare parte del materiale sintetizzato verso gli strati più esterni dell'astro, arricchendone l'involucro superficiale. Nei corpi celesti più massicci l'evoluzione prosegue dunque oltre la fusione dell'elio: l'aumento della temperatura e della densità nel nucleo permette l'attivazione di stadi successivi, in cui vengono coinvolti nuclei via via più pesanti. L'interno di questi oggetti assume così una struttura a strati concentrici, ciascuno sede di una specifica reazione di fusione. Il continuo arricchimento del mezzo interstellare porta, infine, alla formazione delle stelle di Popolazione I, tipiche delle regioni più giovani delle galassie, come il disco della Via Lattea. Tali oggetti celesti si formano in ambienti ricchi di metalli e mostrano una chimica molto più complessa rispetto alle generazioni precedenti. La maggiore quantità di metalli favorisce un raffreddamento ancora più efficiente del gas, rendendo possibile la formazione di stelle di massa relativamente piccola, come il Sole, con tempi di vita dell'ordine di miliardi di anni. Chimicamente, le stelle di Popolazione I svolgono un ruolo complementare rispetto alle stelle massicce delle popolazioni precedenti. Pur non raggiungendo le condizioni estreme necessarie per produrre gli elementi più pesanti, contribuiscono in modo significativo alla distribuzione di elementi intermedi attraverso venti stellari e fasi evolutive avanzate. Questo processo arricchisce ulteriormente il mezzo e prepara il materiale da cui si formeranno i sistemi planetari. Se le stelle di Popolazione III avviano la chimica complessa, quelle di Popolazione II la ampliano e la diversificano, mentre le stelle di Popolazione I ne consolidano i risultati su scale temporali molto lunghe. Questo intreccio costituisce il contesto indispensabile per capire perché certi elementi siano abbondanti nell'Universo e perché altri richiedano invece condizioni ancora più estreme per formarsi.

5. La soglia energetica del ferro e l'esplosione di supernova

L'evoluzione delle stelle più massicce conduce inevitabilmente a una fase in cui la produzione di energia nucleare non è più in grado di sostenere l'equilibrio idrostatico. Come discusso nel paragrafo precedente, nelle stelle sufficientemente massicce l'aumento progressivo della temperatura e della densità nel nucleo consente l'innescio di reazioni nucleari successive alla fusione dell'elio. Queste reazioni coinvolgono nuclei sempre più pesanti e avvengono in fasi via via più brevi, riflettendo una crescente instabilità dell'intero sistema stellare. Il punto fondamentale di questa evoluzione è la produzione del ferro: i nuclei di questo gruppo occupano infatti una posizione particolare, poiché possiedono la massima energia di legame per nucleone. Ciò significa che fonderli non libererebbe energia ma ne richiederebbe. Quando nel nucleo di un astro massiccio si accumula una quantità significativa di questo elemento, la fusione non può più sostenere la gravità: la pressione termica crolla rapidamente e il core comincia a collassare. In questa fase, l'evoluzione stellare non è

più governata da un equilibrio quasi statico, ma da un processo dinamico estremamente rapido che provoca il collasso della parte interna in tempi dell'ordine di frazioni di secondo. A causa di questo violentissimo processo la gravità comprime la materia fino a densità enormi, tali che gli elettroni vengono forzati a combinarsi con i protoni attraverso reazioni di cattura elettronica, producendo neutroni ed emettendo neutrini. Tale fenomeno riduce ulteriormente la pressione interna, accelerando il collasso. La materia a questo punto perde quasi del tutto la struttura atomica ordinaria e i nuclei vengono compressi in uno stato ancora più denso, dominato dalle interazioni nucleari fondamentali. Il collasso non procede, però, indefinitamente: quando infatti la densità del nucleo raggiunge valori comparabili a quelli dei nuclei atomici, la materia diventa praticamente incompressibile e il brusco arresto del collasso produce un'onda d'urto che si propaga verso l'esterno. Inizialmente, tale onda tende a smorzarsi, ma l'enorme flusso di neutrini prodotti durante il collasso trasferisce energia agli strati circostanti, contribuendo a riattivare e rafforzare l'onda stessa. Il risultato finale è l'esplosione della stella in supernova (Figura 2) che rappresenta uno degli eventi più energetici dell'universo. In pochi secondi viene rilasciata un'energia paragonabile a quella emessa da una stella come il Sole nell'arco di tutta la sua vita. Gli strati esterni dell'astro vengono espulsi nello spazio interstellare a velocità di migliaia di chilometri al secondo, trasportando con sé gli elementi prodotti durante le diverse fasi dell'evoluzione.

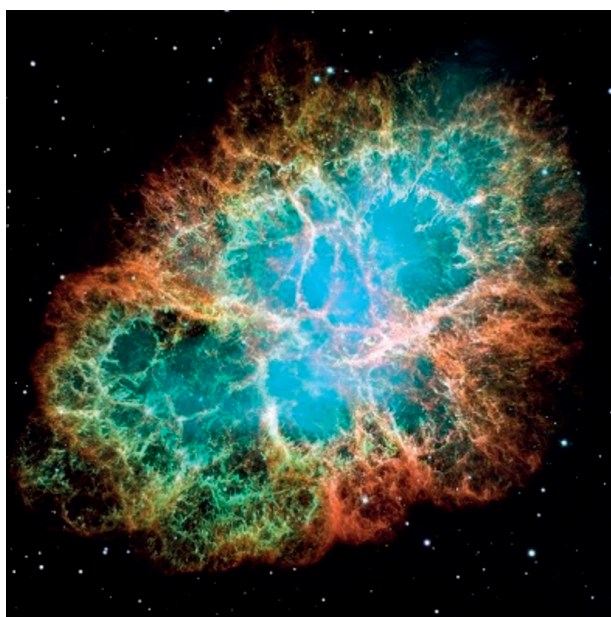


Figura 2. Ciò che resta della Supernova del Granchio (SN 1054) osservata per la prima volta a partire dal 4 luglio 1054

Dal punto di vista chimico, le supernovae hanno un ruolo insostituibile, perché liberano nel mezzo interstellare tutti gli elementi prodotti durante la vita della stella, dal carbonio fino al ferro. Questo materiale arricchito si mescola al gas circostante, modificandone la composizione e rendendo possibile la formazione di generazioni future di oggetti celesti con un contenuto metallico progressivamente più elevato.

6. Stelle di neutroni: oltre il confine della chimica classica

Quando la massa del nucleo che collassa risulta inferiore alla soglia critica oltre la quale la pressione di degenerazione dei neutroni non può più garantire l'equilibrio idrostatico (limite di Tolman-Oppenheimer-Volkoff), il collasso gravitazionale si arresta, portando alla formazione di una stella di neutroni che rappresenta uno degli stati più estremi della materia osservabili nell'universo (Figura 3).

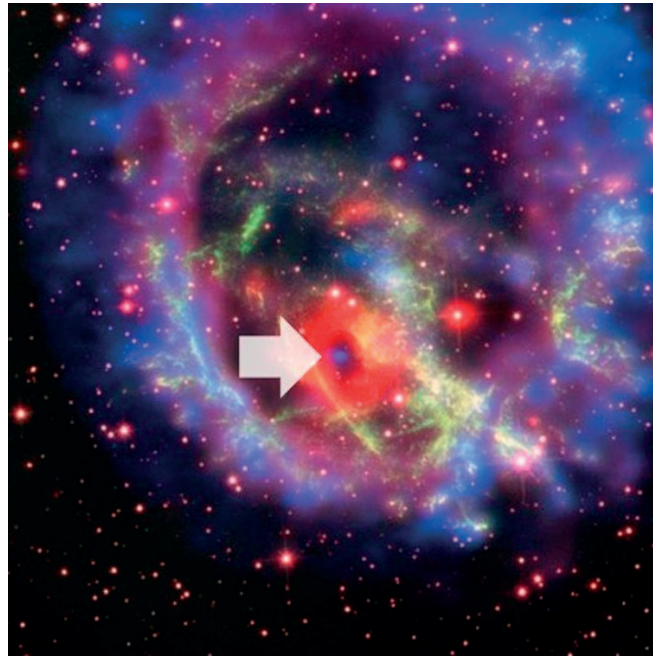


Figura 3. Stella di Neutroni isolata nella Piccola Nube di Magellano; immagine in falsi colori (Hubble Telescope)

In questa stella, la materia non è più organizzata in atomi o nuclei distinti, ma assume una struttura completamente nuova, governata da interazioni fondamentali che operano su scala subnucleare. Durante il collasso che segue l'esplosione di supernova, la gravità comprime il nucleo residuo fino a densità comparabili a quelle dei nuclei atomici, dell'ordine di $10^{14}/10^{15}$ g/cm³. In queste condizioni estreme il risultato è una materia composta quasi interamente da neutroni, con una piccola frazione di protoni ed elettroni residui, necessari a mantenere l'equilibrio elettrico. Dal punto di vista concettuale, una stella di neutroni (Figura 3) può essere vista come un gigantesco nucleo atomico esteso su scala macroscopica in cui, a differenza dei nuclei ordinari, la sua stabilità è garantita non solo dalla fisica delle interazioni nucleari, ma soprattutto dalla pressione di degenerazione dei neutroni stessi, conseguenza diretta del principio di esclusione di Pauli. Tale pressione permette alla stella di opporsi al collasso gravitazionale, stabilendo un equilibrio tra la gravità e le proprietà quantistiche della materia degenerare.

La chimica ordinaria, basata sulle interazioni tra elettroni e nuclei, non è più applicabile e anche la fisica nucleare classica perde gran parte del suo significato, poiché i nuclei non esistono più come entità separate. Tuttavia, proprio questa condizione estrema apre la strada a nuovi processi di trasformazione della materia, che non possono avvenire in nessun altro ambiente dell'universo. Le regioni esterne di tali oggetti presentano una struttura stratificata in cui nuclei estremamente ricchi di neutroni sono immersi in un mare di elettroni degeneri e in cui la materia assume configurazioni che in Astronomia vengono chiamate esotiche. Un aspetto di fondamentale importanza delle stelle di neutroni riguarda il loro ruolo nella nucleosintesi degli elementi più pesanti. Qualora due stelle di neutroni formassero infatti un sistema binario, la perdita di energia tramite onde gravitazionali ne provocherebbe il progressivo avvicinamento fino alla fusione. Nell'impatto, parte del materiale estremamente ricco di neutroni, viene strappato ed espulso nello spazio interstellare; inoltre, anche il disco di accrescimento, che si forma attorno a ciò che è rimasto della stella, produce ulteriori espulsioni di materia. In queste condizioni, i processi di cattura neutronica rapida risultano particolarmente efficienti, dando origine a elementi pesanti ben oltre il ferro. Le osservazioni di questi eventi, accompagnate da emissioni elettromagnetiche note come Kilonovae, hanno fornito una conferma diretta del fatto che le fusioni fra stelle di neutroni sono uno dei principali meccanismi di produzione di elementi pesanti come oro, platino e altri metalli rari, mentre dal punto di vista dell'evoluzione cosmica rappresentano una fase in cui la materia ha raggiunto uno dei massimi livelli di densità e complessità consentiti dalle leggi fisiche conosciute.

7. Il Sole come risultato dell'evoluzione chimica del nostro universo

Il Sole rappresenta un esempio particolarmente istruttivo per cogliere il legame tra chimica ed evoluzione stellare. Pur essendo una stella relativamente giovane ancora lontana dalle fasi avanzate della propria evoluzione, mostra nella sua composizione circa il 2% di elementi come carbonio, azoto e ossigeno, ma anche tracce di magnesio, sodio, calcio e ferro. Questo dato osservativo, apparentemente scontato, fornisce invece un'informazione fondamentale sulla sua storia e sull'ambiente in cui si è formata. Dal punto di vista evolutivo, il Sole è attualmente una stella di sequenza principale di massa relativamente piccola, che trae la propria energia esclusivamente dalla fusione dell'idrogeno in elio attraverso la catena protone-protone. Le condizioni fisiche nel suo nucleo, sebbene sufficienti a sostenere questo processo, non permettono ancora la fusione dell'elio né, tanto meno, la produzione diretta di elementi più pesanti. Come discusso nei paragrafi precedenti, questi elementi vengono sintetizzati solo in fasi evolutive più avanzate o all'interno di stelle di massa maggiore. Il fatto che il Sole contenga quantità apprezzabili di questi elementi (Figura 4) implica che essi fossero già presenti nel gas da cui esso si è formato, dimostrando incontrovertibilmente che si sia evoluto a partire da un mezzo interstellare già arricchito chimicamente da generazioni stellari precedenti, in particolare da stelle massicce che hanno concluso la propria evoluzione come supernovae. La presenza di elementi pesanti ha favorito un raffreddamento più efficiente del gas e ha reso possibile la formazione di un disco protoplanetario più denso. È inoltre importante sottolineare che il Sole non ha ancora fornito un contributo significativo all'arricchimento chimico del cosmo. Solo nelle fasi evolutive future, quando entrerà nello stadio di gigante rossa ed espellerà parte dei suoi strati esterni, potrà restituire al mezzo interstellare una frazione degli elementi ereditati, prodotti e rielaborati nel suo interno, rappresentando un caso significativo di come l'evoluzione chimica dell'universo sia un processo cumulativo in cui ogni generazione stellare acquisisce i prodotti di quelle precedenti e li riutilizza come punto di partenza.

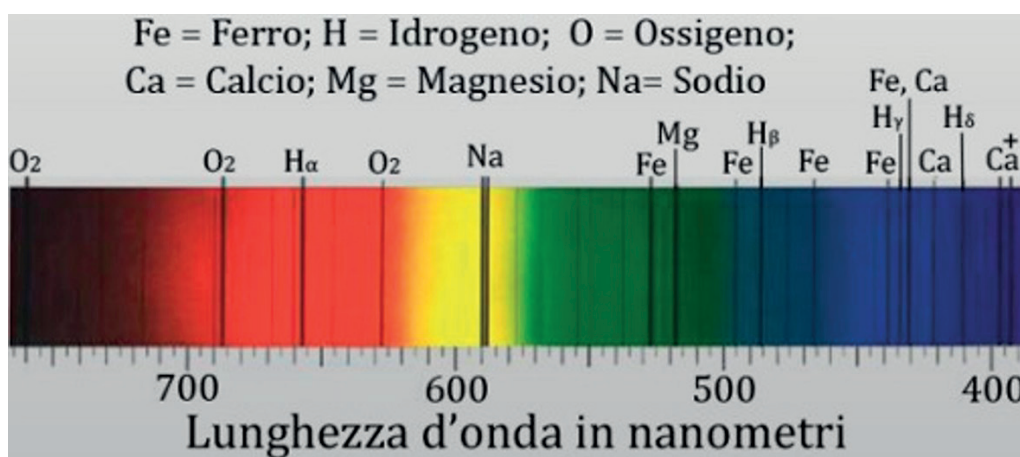


Figura 4. Spettro solare in cui si vedono le linee di assorbimento di elementi più pesanti dell'idrogeno e dell'elio

8. Siamo polvere di stelle, torneremo polvere di stelle: evoluzione e fine della Terra

La storia della chimica cosmica non si conclude con la formazione dei pianeti o con l'emergere della vita, ma prosegue fino alla dissoluzione delle strutture che essa stessa ha reso possibili. La Terra, come ogni oggetto celeste, non rappresenta uno stato finale, ma una fase transitoria di un processo molto più ampio il cui destino è intimamente legato all'evoluzione della nostra stella che ha fornito l'energia necessaria alla stabilità dell'intero sistema e che, in futuro, ne determinerà anche la fine. Il Sole si trova oggi approssimativamente a metà del suo ciclo evolutivo e, quando l'idrogeno del nucleo

sarà esaurito, l'equilibrio che ha garantito la sua stabilità verrà meno. A quel punto, il nucleo inizierà a contrarsi sotto l'azione della gravità, mentre gli strati esterni si espanderanno facendolo entrare nella fase di gigante rossa e aumentando enormemente le proprie dimensioni e luminosità. Le temperature superficiali diminuiranno, ma l'energia totale emessa crescerà in modo significativo. Questo cambiamento avrà conseguenze devastanti per i pianeti interni. La Terra, molto prima di essere fisicamente inglobata dal Sole in espansione, diventerà un ambiente completamente inospitale (Figura 5).

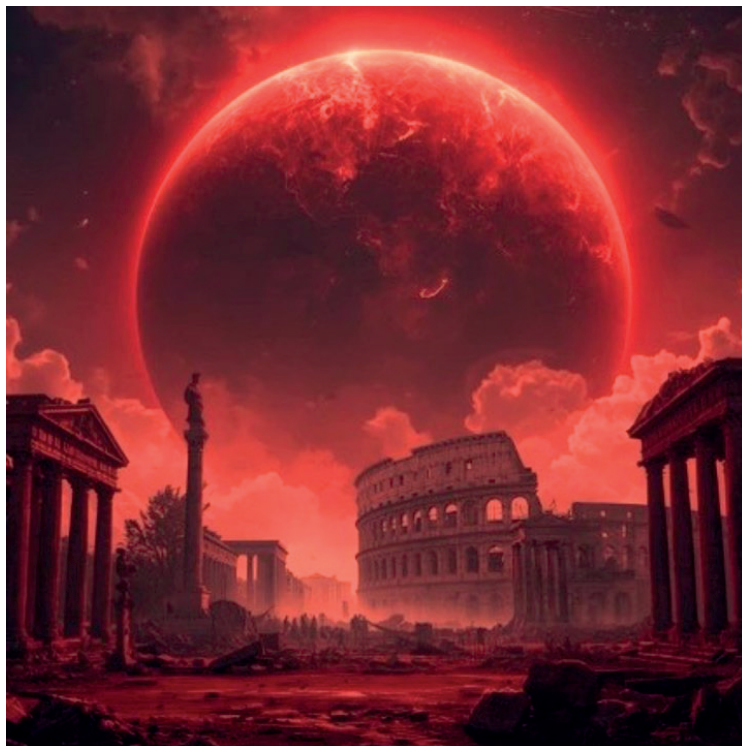


Figura 5. Immagine artistica sul possibile futuro della Terra durante la fase di gigante rossa del Sole

L'aumento della luminosità dell'astro porterà all'evaporazione degli oceani, alla distruzione dell'atmosfera e all'impossibilità di mantenere praticamente qualsiasi forma di vita e, nelle fasi più avanzate di questa evoluzione, l'espansione potrebbe raggiungere o superare l'orbita terrestre disintegrando il nostro pianeta. Indipendentemente dai dettagli dell'evoluzione orbitale, il suo ed il nostro destino è comunque segnato: ormai priva di atmosfera e strutturalmente alterata, essa sarà ridotta a un corpo roccioso sterile, sottoposto a intense radiazioni e a forze gravitazionali estreme in cui i suoi materiali costituenti (silicati, metalli e composti chimici un tempo organizzati in strutture complesse) verranno progressivamente dispersi o trasformati. Parallelamente, nel nucleo del Sole avrà luogo la fusione dell'elio, con la produzione soprattutto di carbonio e ossigeno. Sebbene la nostra stella non sia sufficientemente massiccia da proseguire oltre questa fase, contribuirà comunque all'evoluzione chimica del sistema solare. Attraverso intensi venti stellari, una parte significativa della sua massa verrà espulsa nello spazio, formando una nebulosa planetaria; in questo processo, elementi prodotti o rielaborati nel corso della sua vita verranno restituiti al mezzo interstellare. Sotto questo punto di vista, il suo destino non rappresenta un'eccezione, ma si inserisce nel quadro più ampio dell'evoluzione cosmica. Gli atomi che oggi costituiscono le rocce, l'acqua e gli organismi viventi non verranno distrutti, ma semplicemente riorganizzati pronti a essere incorporati in nuove stelle, nuovi pianeti e, potenzialmente, in altre forme più complesse. La celebre affermazione secondo cui "siamo polvere di stelle" trova così il suo significato più intimo e completo: la fine del nostro pianeta non sarà un epilogo poiché la materia che oggi forma i nostri corpi, i nostri affetti e tutto ciò che conosciamo, verrà

dispersa come seme, pronta a intrecciarsi con altre storie cosmiche. Forse, in un futuro impossibile da immaginare, tornerà a brillare in nuove stelle, a posarsi su nuove terre, a dar vita ad altri occhi rivolti al cielo. Tutto muterà e in questo continuo fluire resterà lieve, ma indelebile, anche la traccia del nostro passaggio.

Riferimenti bibliografici di approfondimento

A. Cimatti, F. Fraternali, C. Nipoti, *Introduction to galaxy formation and evolution: from primordial gas to present-day galaxies*, Cambridge University Press, UK, 2019.

P. C. Clark, S. C. O. Glover, R. S. Klessen, V. Bromm, Gravitational fragmentation in turbulent primordial gas and the initial mass function of population III stars, *The Astrophysical Journal*, 2011, **727**(2), 110.

F. Santoro, J. M. Shull, Critical metallicity and fine-structure emission of primordial gas enriched by the first stars, *The Astrophysical Journal*, 2006, **643**(1), 26.

H.-T. Janka, Explosion mechanisms of core-collapse supernovae, *Annual Review Nuclear and Particle Science*, 2012, **62**, 407 (<https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-102711-094901>).

S. Wanajo, H.-T. Janka, B. Müller, Electron-capture supernovae as the origin of elements beyond iron, *The Astrophysical Journal Letters*, 2011, **726**, L15 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2041-8205/726/2/L15/pdf>).

V. Lipunov, *Astrophysics of neutron stars*, Springer-Verlag, Berlin, 2011.

F. K. Thielemann, M. Eichler, I. V. Panov, B. Wehmeyer, Neutron star mergers and nucleosynthesis of heavy elements, *Annual Review Nuclear and Particle Science*, 2017, **67**, 253 (<https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-101916-123246>).

Dal peso atomico al numero atomico: un nuovo criterio ordinatore per gli elementi della Tavola Periodica

Matteo Chioccioli e Antonio Testoni

Gruppo Tematico Epistemologia e Storia della Chimica della Società Chimica Italiana
e-mail: matteo.chioccioli@gmail.com; antonio.testoni55@gmail.com

Abstract. The periodic table is an icon of chemistry and an essential component of every school curriculum. However, the fundamental concepts underpinning this extraordinary scientific framework are often overlooked in both schools and universities due to their deceptive simplicity. Even the transition from atomic weight to atomic number as the basis for organizing elements is sometimes glossed over in textbooks with a few oversimplified sentences. This work aims to provide teachers with an overview of the 19th-century debates among eminent chemists over three key notions central to Mendeleev's system: atomism, atomic weight, and the nature of elements. Furthermore, we illustrate that the transition to a new organizing principle was not a sudden shift but an extended process requiring new experimental data, updated atomic models, and a great deal of imagination. We also highlight the fact that the introduction of atomic number sparked a *paradigmatic shift* in the periodic system; it provided Mendeleev's construction with a more solid foundation by anchoring it to the atom's internal structure and ultimately led to a redefined concept of a chemical element.

Keywords: Tavola Periodica; atomismo; elemento chimico; peso atomico; numero atomico

1. Introduzione

Questo nostro lavoro è incentrato sulle premesse teoriche che hanno portato alla nascita del sistema periodico di D. I. Mendeleev e sull'evoluzione temporale dei criteri di classificazione degli elementi chimici. L'argomento è di notevole interesse per l'insegnamento scolastico superiore, perché permette di indagare e approfondire con gli studenti una serie di concetti chiave della chimica che solitamente sono trattati in modo molto superficiale nei libri di testo, in considerazione della loro *apparente semplicità*. A conferma di quanto appena detto, nei manuali di chimica la questione del passaggio dal peso atomico al numero atomico viene spesso liquidata in modo molto sbrigativo, con frasi che suonano pressappoco così: "nella Tavola Periodica di Mendeleev, come abbiamo visto, gli atomi erano ordinati secondo il loro peso atomico crescente. Le conoscenze successive sulla struttura atomica hanno portato a ordinare gli elementi in funzione del loro numero atomico".

In questi testi, in particolare, non viene detto niente riguardo al *come* e al *perché* sia avvenuto questo cambiamento radicale nel criterio di classificazione degli elementi chimici e ben poco circa il *contesto* nel quale è maturata e si è sviluppata l'idea del sistema periodico di Mendeleev. È, invece, fondamentale mostrare innanzitutto agli studenti come si è giunti a questa grande costruzione, che rappresenta quasi un'icona della scienza chimica, per poi passare a chiarire gli eventi che hanno determinato un ripensamento del principio ordinatore.

2. Le premesse teoriche del sistema periodico basato sul peso atomico

Occorre, innanzitutto, dire che la Tavola Periodica è stata il frutto maturo dell'*atomismo ottocentesco*, sviluppatosi in ambito chimico, quando i modelli fisici erano del tutto inadeguati per rappresentare la realtà atomico/molecolare.

L'atomismo costituisce uno dei grandi trionfi della *razionalità* e della *creatività* umana, ha segnato un intero secolo, l'Ottocento, e ha gettato le basi per gli sviluppi successivi della disciplina. E proprio l'idea ottocentesca di *atomo*, nata in ambito chimico, costituisce una delle nozioni chiave per comprendere la genesi del sistema periodico di Mendeleev, insieme a quelle di *peso atomico* e di *elemento chimico*.

Si tratta di tre concetti che, come emergerà dalla lettura di questo lavoro, non sono stati definiti una volta per tutte, ma sono stati rielaborati più volte nel corso dell'Ottocento.

2.1 L'idea ottocentesca di atomo

Iniziamo il nostro percorso dando un breve sguardo all'atomismo, originatosi in ambito chimico, che ha avuto in J. Dalton il principale artefice. Con Dalton (1803), abbiamo una nuova e moderna concezione di *atomo*, che potremo definire *scientifico*, e che rappresenta un superamento radicale dell'idea di atomo filosofico proveniente dalla tradizione degli atomisti greci. A proposito dell'atomismo daltoniano, è interessante leggere le parole dello storico C. C. Gillispie [1]: “La chimica è la scienza che *per prima*, ha rivestito di *significato scientifico* l'antica concezione atomistica e l'ha fatta diventare una *teoria scientifica* e non solo un sistema filosofico. Senza quella teoria lo sviluppo della chimica moderna, e non solo, sarebbe semplicemente impensabile”.

Nello specifico, gli atomi postulati da Dalton erano delle entità microscopiche *modellate* sulla chimica di A. L. Lavoisier. Il modello atomico da lui proposto era, infatti, perfettamente integrato con la nuova definizione operativa di *elemento chimico*, o principio, o sostanza semplice introdotta da Lavoisier nel suo “*Traité Élémentaire de Chimie*”, cioè il termine ultimo a cui arriva l'analisi chimica. Infatti, come scrive il chimico francese [2]: “Se attribuiamo al nome di elementi o di principi dei corpi l'idea del termine ultimo al quale arriva l'analisi, tutte le sostanze che non siamo ancora riusciti a decomporre con alcun mezzo, sono per noi degli elementi”.

E anche in questo caso, come già detto per Dalton, si può affermare che la proposta di Lavoisier sugli elementi chimici rappresentò un radicale superamento dell'idea filosofica dei quattro elementi proveniente dall'antichità; una visione degli elementi, quella di Lavoisier, che era, invece, molto concreta. Dalton riteneva, in particolare, che gli elementi, così come erano stati definiti da Lavoisier, fossero veramente delle sostanze non più decomponibili, perché pensava che ciascun elemento fosse costituito a livello microscopico da *atomi tutti uguali, indivisibili e diversi da elemento a elemento sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo, in quanto aventi un peso atomico diverso*. E fu proprio la proposta di associare agli atomi una grandezza fisica misurabile, il *peso atomico*, che rappresentò una delle principali novità dell'ipotesi daltoniana rispetto alle precedenti idee di atomo. Con tale ipotesi gli atomi acquisirono, infatti, una consistenza e una realtà fisica. Dalton riteneva, in particolare, che nella formazione dei composti, gli atomi si combinassero *interi e inalterati*, secondo rapporti definiti e costanti, caratteristici della sostanza considerata. Il fondamento della nuova teoria atomistica era costituito, pertanto, dall'ipotesi di una precisa relazione tra la composizione costante in peso delle sostanze composte a livello macroscopico, così come espressa dalla legge di Proust, e il rapporto tra i pesi atomici degli elementi costituenti a livello microscopico. Proprio partendo da questi presupposti, Dalton arrivò, con un procedimento del tutto innovativo, a determinare il *peso atomico relativo* di vari elementi (relativo in quanto riferito al peso atomico dell'idrogeno preso convenzionalmente uguale ad 1) e a stilare una prima tabella di tali *pesi atomici*.

La determinazione dei *pesi atomici* rappresentò, tuttavia, un grosso problema anche per la stessa credibilità della nascente teoria atomica, almeno fino al successivo contributo di S. Cannizzaro. Molti pesi atomici determinati da Dalton si riveleranno, infatti, sbagliati perché il procedimento da lui seguito per il calcolo del *peso atomico* si basava, da un lato, su dati analitici di composizione non sempre accurati e, dall'altro, su ipotesi di formule chimiche che spesso erano errate. Caso emblematico è quello della formula dell'acqua alla quale, in accordo con il *principio della massima semplicità*, Dalton attribuì una formula che, oggi, potremo pensare come HO, ipotizzando che una particella d'acqua fosse costituita da un atomo di idrogeno e uno di ossigeno.

Va detto, però, che la teoria atomistica di Dalton incontrò delle resistenze nella comunità dei chimici per tutto l'Ottocento non solo per quanto riguarda la determinazione dei pesi atomici, ma anche per

quello che concerne il significato stesso che si dovesse attribuire al termine *atomo*. E questo *scetticismo* di molti chimici verso la teoria daltoniana emerge chiaramente dal seguente brano del chimico britannico A. W. Williamson, che ci fornisce una fotografia abbastanza fedele di quelle che erano le idee dei chimici sugli atomi e la teoria atomica nella seconda metà dell'Ottocento [3]: “Ci sono *differenze* considerevoli, per non dire *contraddizioni*, tra le affermazioni fatte da diversi chimici sull'argomento della *teoria atomica*. [...] Sembra certamente strano che uomini così abituati a studiare costantemente la natura mediante esperimenti, come fanno i chimici, si avvalgano di un tale sistema di idee. Penso di non esagerare quando dico che, da un lato, *tutti i chimici usano la teoria atomica, e che, dall'altro, un numero considerevole di loro la vede con diffidenza, alcuni con decisa antipatia*”.

Ed è interessante notare che questo articolo di Williamson sia proprio del 1869, cioè dello stesso anno in cui Mendeleev propose la prima versione del suo sistema periodico degli elementi. D'altra parte, sembra che lo stesso Mendeleev fosse *cauto*, e addirittura *scettico*, sulla reale esistenza degli atomi in senso daltoniano [4], tanto che arrivò persino a scrivere [5]: “A me sembra che sostituendo la denominazione *peso atomico* con quella di *peso elementare* si potrebbe pervenire a rimuovere l'idea di atomo quando il discorso verte sugli elementi”.

Tuttavia, per comprendere appieno i brani di Williamson e Mendeleev, è necessario approfondire come la comunità dei chimici nel corso dell'Ottocento abbia accolto il concetto di atomo e la teoria daltoniana nel suo insieme. Desta, infatti, una certa perplessità il fatto che i chimici utilizzavano la teoria atomica, i pesi atomici, e anche le formule di struttura, senza credere alla reale esistenza degli atomi e alla natura corpuscolare della materia.

Illuminante in questo senso è un brano di A. Kekulé, che chiarisce bene l'apparente ambiguità con cui i chimici ottocenteschi trattavano il concetto di atomo. Scrive, infatti, il chimico tedesco [6]: “Che gli atomi esistano o no è un problema che compete alla metafisica, ma è di scarso significato in Chimica. Ciò che invece è importante è stabilire se l'ipotesi atomica sia *utile* per spiegare i fenomeni chimici. [...] Io posso affermare senza esitazioni che, da un punto di vista filosofico, *non credo nella reale esistenza degli atomi*, nel loro significato letterale di particelle indivisibili di materia. [...] Come chimico, comunque, considero l'ipotesi degli atomi, non solo utile, ma assolutamente essenziale, e credo che gli *atomi chimici* esistano, purché con questo termine si indichino *particelle di materia che rimangono indivisibili nel corso delle trasformazioni chimiche*. [...] Anche se un giorno il progresso scientifico porterà a una teoria della costituzione di questi atomi – cosa che costituirebbe un notevole progresso nella filosofia generale della materia – farà poca differenza in Chimica, perché *l'atomo chimico rimarrà sempre l'unità chimica*”.

Arrivati a questo punto, per fare maggiore chiarezza su tale questione così centrale dal punto di vista epistemologico per comprendere le origini del sistema periodico, può essere utile riprendere la distinzione terminologica utilizzata anche dallo storico della chimica A. J. Rocke in un suo famoso testo del 1984 [7]. Si può, infatti, distinguere tra quello che potremmo chiamare un *atomismo fisico*, quale quello introdotto da Dalton, e sostenuto da chi credeva nella reale esistenza fisica degli atomi come particelle ultime della materia, e un *atomismo chimico*, che emerge dalle parole di Kekulé, ed è basato sull'idea *pratica* di una porzione di materia che rimane inalterata nelle trasformazioni chimiche e nella formazione dei composti, senza però ritenere accettabile l'ipotesi che essa costituisca l'unità fisica nella quale può essere scomposta la materia a livello microscopico. Se si vuole, tale distinzione richiama quella filosofica che si ha tra realismo (*scientific realism*) e strumentalismo (*instrumentalism o anti-realism*), due approcci antitetici di guardare al reale valore delle teorie scientifiche. Come si può, infatti, leggere in un testo di P. K. Feyerabend [8]: “Realismo e strumentalismo offrono due interpretazioni alternative della scienza e, più in generale, della conoscenza dei fatti. Secondo il realismo, tale conoscenza descrive realmente le caratteristiche del mondo. Secondo lo strumentalismo, invece, anche una teoria completamente corretta non descrive nulla, ma funziona come strumento per prevedere i fatti che costituiscono il suo contenuto empirico”.

Occorre sottolineare che la contrapposizione sopra citata, tra *atomismo fisico* in senso daltoniano e *atomismo chimico*, si estese per larga parte dell'Ottocento, tanto che la maggior parte dei chimici ragionava

proprio in termini di *atomo chimico*. D'altra parte, l'idea di atomo in senso fisico si affermerà nella comunità scientifica solo alla fine del secolo, dopo la scoperta dell'elettrone. Alla luce di quanto detto, la comprensione dei brani di Williamson e Mendeleev dovrebbe ora risultare più immediata. Il chimico russo si avvicinò, infatti, a un'idea di *atomo chimico* nella costruzione del suo sistema periodico.

Ma, nonostante questa contrapposizione che potremmo definire *ontologica* sul significato che si dovesse attribuire al concetto di atomo, c'era comunque un aspetto che accomunava l'atomismo daltoniano e i fautori di un atomismo chimico: l'idea che esistesse per ogni elemento un *peso atomico* unico, cioè un'*unità chimicamente indivisibile e quantificabile*, che entra in combinazione con unità simili di altri elementi nella formazione dei composti e che si mantiene inalterata nelle trasformazioni chimiche. In estrema sintesi, si può dire che tutti i chimici utilizzavano i *pesi atomici* perché *erano utili*, soprattutto nel campo della stechiometria, anche se, come già anticipato, fino al lavoro di Cannizzaro non arrivarono all'accettazione di un sistema unico di pesi atomici e molecolari.

2.2 I pesi atomici e il contributo di Cannizzaro

In questo scenario si inserì, infatti, lo straordinario contributo di Cannizzaro, il quale, applicando con rigore e genialità il principio di Avogadro, fece finalmente chiarezza distinguendo nettamente le molecole dagli atomi. Egli non concepiva l'atomo come un'entità esistente allo stato isolato, bensì come la componente minima, indivisibile e costante di un elemento all'interno di una molecola. Questa rigorosa distinzione pose fine a decenni di confusione e permise finalmente di calcolare pesi atomici *esatti*, riducendo la loro determinazione a una ricerca matematica basata su rapporti semplici e sul massimo comune divisore. Si arrivò così a una definizione *macroscopica* e pienamente operativa di atomo che consolidò la teoria atomica e spianò definitivamente la strada alla Tavola Periodica di Mendeleev.

Il procedimento innovativo per la determinazione dei pesi atomici relativi venne presentato dal chimico italiano nel suo testo fondamentale, il "Sunto di un corso di filosofia chimica" pubblicato nel 1858. Da ricordare che un estratto del Sunto fu distribuito durante il primo congresso della chimica moderna svoltosi a Karlsruhe nel settembre 1860, dal professor A. Pavesi, amico e ammiratore dell'opera di Cannizzaro.

Così Cannizzaro riassume nel Sunto il *procedimento operativo* messo a punto per la determinazione dei pesi atomici degli elementi [9]: "[...] si trova quella più piccola quantità di ciascun elemento che entra sempre intera nelle molecole che ne contengono, ed alla quale si dà con ragione il nome di *atomo*. Per trovare dunque il *peso atomico* di ciascun elemento, bisogna prima conoscere i pesi di tutte, o della maggior parte delle molecole ove è contenuto, e la composizione loro".

Va, inoltre, sottolineato che tale proposta operativa era slegata da qualsivoglia volontà di confermare o smentire l'ipotesi daltoniana di una struttura microscopica particellare della materia. I pesi atomici erano per Cannizzaro il risultato del trattamento di *dati sperimentali*. Infatti, attraverso una serie di operazioni sperimentali esattamente definite, Cannizzaro arrivava a determinare in modo univoco una caratteristica dell'atomo, la sua massa relativa, comunemente detta peso atomico. Fu anche per questo motivo che le idee di atomo e di peso atomico proposte da Cannizzaro furono in breve tempo accettate sia dai sostenitori di un atomismo fisico che dai fautori di un atomismo chimico. Di tutto ciò era perfettamente consapevole lo stesso Cannizzaro, quando scriveva [10]: "Ma i concetti di molecola e d'atomo nati in questa maniera sono *spogliati* d'ogni immagine di forma, di grandezza, di distanza, di *continuità* o *discontinuità*. La sola proprietà intimamente legata a questo concetto è la *ponderabilità*, cioè la massa, la definizione stessa della materia".

Il significato del contributo di Cannizzaro sui pesi atomici è ben riassunto da F. Abbri, quando scrive [11]: "Cannizzaro fu il primo a costruire un sistema di pesi atomici e di formule che incorporava rilevanti dati fisici allora disponibili [...] con lo scopo di *saldare* la frattura fra atomismo chimico e referente fisico [...] presentando la chimica come scienza unitaria che parlava a pieno titolo della *struttura della materia*".

Saranno proprio i pesi atomici determinati secondo il procedimento operativo definito da Cannizzaro, cioè *slegati da ogni ipotesi sulla natura corpuscolare della materia*, che costituiranno la base su cui Mendeleev costruirà il suo sistema di classificazione degli elementi. Mendeleev fu, infatti, uno dei primi e più entusiasti sostenitori dell'ipotesi di Cannizzaro sui pesi atomici, che lui stesso aveva

appreso al congresso di Karlsruhe del 1860. Ma, per comprendere pienamente la genesi della Tavola Periodica, non è sufficiente aver chiaro le idee di atomo (atomo chimico) e di peso atomico (risultato del procedimento operativo proposto da Cannizzaro) che sono alla base del sistema di classificazione di Mendeleev. C'è, infatti, un altro tassello da aggiungere a questo puzzle: riguarda l'idea stessa di elemento chimico che aveva in testa Mendeleev quando costruì il suo sistema periodico.

2.3 L'idea di elemento chimico secondo Mendeleev

Si deve osservare innanzitutto, che il chimico russo giunse a ridefinire la concezione di *elemento chimico*, non identificandolo più con la sostanza semplice (indecomponibile) di Lavoisier, ovvero con il termine ultimo a cui arriva l'analisi chimica. Mendeleev, in particolare, propose un dualismo nella sua visione degli elementi chimici, distinguendo, da un lato, l'idea di *sostanza semplice*, che si avvicina al concetto di elemento secondo Lavoisier e che può essere identificata con la manifestazione materiale di un elemento chimico allo stato libero, e, dall'altro, la concezione di *elemento chimico* vero e proprio, che sarebbe un'essenza immutabile della sostanza semplice che si mantiene inalterata quando si formano i composti e durante una trasformazione chimica e che risulta caratterizzata dal peso atomico. In un certo senso, Mendeleev con questa nozione sembra quasi rivitalizzare quell'idea filosofica degli elementi che si aveva nell'antichità. Una visione di elemento, questa di Mendeleev, che è però perfettamente coerente con l'idea di *atomo chimico*.

Il seguente testo di Mendeleev è particolarmente esplicativo di questa sua visione sugli elementi [12]: "L'idea principale con la quale si può giungere a spiegare la legge della periodicità consiste proprio nella *differenza radicale* dei concetti di elemento e di sostanza semplice. [...] Gli elementi non vanno soggetti a varietà e a trasformazioni reciproche e appaiono, stando alle attuali risultanze, *l'essenza immutabile di una sostanza* che invece muta (sotto il profilo chimico, fisico, meccanico), *essenza* che entra a far parte sia dei corpi semplici sia di quelli composti. Questa concezione ci presenta gli elementi chimici come qualcosa di *astratto* , dato che non siamo in grado né di vederli né di sapere alcunché di essi. [...] Non si tratta di un corpo concreto, quanto piuttosto di una *sostanza ponderabile* . [...] All'elemento corrisponde il concetto di *atomo* . Così il carbonio è un elemento, mentre carbone, diamante e grafite sono sostanze semplici".

Questa visione, che Mendeleev sviluppò sugli elementi chimici, rappresentava anche un tentativo di proporre una soluzione a un problema ancora aperto nella chimica della seconda metà dell'Ottocento, al quale né Lavoisier né Dalton avevano saputo dare una risposta. Se, infatti, le cose fossero effettivamente come ipotizzato da Lavoisier, cioè (1) se l'elemento è il termine ultimo a cui arriva l'analisi chimica e (2) la massa nelle reazioni rimane costante, perché la qualità e la quantità degli elementi rimane sempre la stessa anche dopo una trasformazione chimica, come è possibile spiegare il fatto che, quando si combinano l'idrogeno e l'ossigeno, uno combustibile l'altro comburente, si forma l'acqua che spegne il fuoco, o combinando il sodio e il cloro si ottiene il cloruro di sodio, cioè il normale sale da cucina? Secondo Mendeleev questo accade perché ciò che rimane inalterato in una trasformazione chimica non è la sostanza semplice di Lavoisier, ma l'elemento chimico, cioè quell'*essenza immutabile* della sostanza semplice, caratterizzata dal peso atomico.

È proprio su questa idea *astratta* di elemento chimico che Mendeleev baserà il suo sistema periodico, che è, infatti, un sistema di classificazione degli elementi, e non delle sostanze semplici così come definite da Lavoisier, elementi che furono classificati dal chimico russo secondo le loro proprietà chimiche e il loro peso atomico crescente. Come è noto, tuttavia, per far tornare le cose, Mendeleev fu costretto a fare delle forzature nella sua sistematica, quando, per posizionare correttamente alcuni elementi sulla base delle loro proprietà chimiche, invertì la posizione di alcuni elementi (casi emblematici, le coppie cobalto-nichel e tellurio-iodio), basandosi sull'assunto che i loro pesi atomici non fossero stati determinati in modo accurato.

Tuttavia, questa geniale costruzione basata sul peso atomico, che aveva consentito di prevedere l'esistenza di elementi chimici non ancora scoperti e aveva saputo integrare, senza vacillare, la scoperta dei gas nobili, fu messa in discussione da una serie di eventi e risultati scientifici emersi tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento.

3. Il passaggio a un nuovo criterio ordinatore degli elementi

Un ripensamento dei fondamenti teorici del sistema periodico si rese necessario, in particolare, in seguito alle scoperte: (1) dell'*elettrone*, che metteva in discussione l'idea dell'atomo come entità indivisibile, (2) della *radioattività* e dei *decadimenti radioattivi*, che avevano come conseguenza quella *trasmutazione* degli elementi così a lungo sognata dagli alchimisti, e degli *isotopi*, che mostravano come a uno stesso atomo/elemento corrispondessero pesi atomici diversi. A questi risultati va, inoltre, aggiunta l'elaborazione dei primi *modelli atomici*. Tutti questi eventi portarono, innanzitutto, a un ripensamento dell'idea, fino a quel momento ritenuta indiscussa, di considerare gli atomi *entità chimiche indivisibili e immutabili* e, conseguentemente, a ripensare il ruolo del peso atomico quale parametro ordinatore della tavola periodica.

Un contributo fondamentale per l'identificazione di un nuovo criterio ordinatore degli elementi venne dal giovane scienziato inglese H. G. J. Moseley, allievo di E. Rutherford. Fu proprio Rutherford a scrivere sulla rivista *Nature* il ricordo di Moseley all'indomani della sua prematura scomparsa, avvenuta nel 1915 durante la Prima Guerra Mondiale nella battaglia di Gallipoli, in Turchia. Nell'occasione, lo scienziato neozelandese sottolineò l'importanza del lavoro di Moseley con queste parole [13]: "Non vi è alcun dubbio che la sua dimostrazione, secondo cui le proprietà di un elemento sono determinate dal suo numero atomico, costituisca una scoperta di grande e vasta portata, [...], destinata con ogni probabilità ad affermarsi come una delle grandi conquiste nello sviluppo della nostra conoscenza della costituzione degli atomi".

Tuttavia, per arrivare a comprendere a pieno l'importanza decisiva del lavoro sperimentale di Moseley, occorre che si facciano almeno due premesse fondamentali, riguardanti, da un lato, gli studi che furono intrapresi intorno al modello atomico di Rutherford e, dall'altro, il fondamentale contributo del fisico amatoriale olandese A. van den Broek.

3.1 Il ruolo degli studi condotti intorno al modello atomico di Rutherford

Innanzitutto, un percorso, che porti alla comprensione del lavoro di Moseley, non può che avere come punto di partenza il 1911. In quell'anno, infatti, Rutherford, basandosi sui risultati sperimentali ottenuti dai suoi due assistenti H. Geiger e E. Marsden, pubblicò un articolo in cui fornì una geniale interpretazione dello scattering a grandi angoli delle particelle alfa, causato dalla loro collisione con una sottile lamina metallica d'oro [14]. Un'interpretazione, quella di Rutherford, che si basava su un nuovo modello atomico planetario, dove la maggior parte della massa e l'intera carica positiva erano concentrati in una piccolissima regione di spazio al centro dell'atomo, che Rutherford in seguito chiamò *nucleo*. Nell'articolo del 1911, in particolare, attraverso la formalizzazione matematica del suo modello atomico, Rutherford elaborò anche una formula con cui si poteva calcolare il numero y di particelle alfa deviate di un determinato angolo, in funzione di una serie di variabili. Per gli scopi del nostro lavoro, è fondamentale sottolineare che per Rutherford tale numero y risultava proporzionale al quadrato della *carica nucleare*, indicata nell'articolo come N_e ($y \propto N_e^2$). La carica nucleare, a quel tempo, era però una variabile incognita dell'atomo e della quale si potevano fare solo delle *ipotesi*.

Una prima importante ipotesi sull'entità della carica nucleare fu formulata, in modo indipendente, dallo stesso Rutherford e dal fisico C. Barkla su basi sperimentali. Secondo questa ipotesi, la *carica nucleare*, N_e , sarebbe stata approssimativamente uguale a metà del peso atomico A dell'elemento ($N_e \approx A/2$). In particolare, se questa ipotesi sulla carica nucleare fosse stata corretta, in accordo con la relazione di Rutherford del 1911 ($y \propto N_e^2$), il numero y di particelle alfa deviate di un certo angolo sarebbe risultato proporzionale al quadrato del peso atomico A ($y \propto A^2$), anche utilizzando lamine di metalli diversi (assumendo lo stesso numero di atomi per unità di volume). Detto in altri termini, ciò significava che, mantenendo inalterate le condizioni sperimentali e cambiando solo la lamina metallica, il rapporto tra il numero di particelle deviate y e il quadrato di A avrebbe dovuto mostrare un valore *costante* ($y/A^2 = \text{costante}$), poiché l'unica variabile dipendente dalla natura dell'elemento scelto è proprio la carica nucleare.

Geiger e Marsden, per verificare l'attendibilità di questa ipotesi sull'entità della carica nucleare, effet-

tuarono una serie di misure di scattering di particelle alfa, utilizzando lamine di un numero limitato di diversi elementi metallici [15]. I valori calcolati dai due fisici per i rapporti y/A^2 , attraverso due serie successive di esperimenti, sono riportati nella Tabella 1.

Tabella 1. Valori determinati da Geiger e Marsden per lo scattering di particelle alfa da parte di lamine di vari metalli (riproduzione tratta da E. Scerri [16])

Element	scattering per atom/ A^2	
	Experiment 1	Experiment 2
Cu	3.7	3.95
Ag	3.6	3.4
Sn	3.3	3.4
Pt	3.2	3.4
Au	3.4	3.1

La tabella mostra chiaramente che tali rapporti non risultarono del tutto costanti; tuttavia, le discrepanze vennero ritenute da Geiger e Marsden compatibili con gli errori sperimentali e l'accordo con quanto previsto dal modello di atomo nucleare di Rutherford fu considerato *accettabile*.

In realtà, un'attenta analisi di questi valori evidenzia la necessità di una proposta più convincente sull'entità della carica nucleare, rispetto alla semplice approssimazione a metà del peso atomico. Ma il lavoro dei due fisici, e più in generale del gruppo di ricerca guidato da Rutherford, aveva come finalità una prima verifica sperimentale del modello di atomo nucleare e, per questo obiettivo, i valori ottenuti sembravano più che accettabili; tra i loro interessi principali non c'era sicuramente quello di rivedere il criterio ordinatore degli elementi chimici nella Tavola Periodica.

Questo obiettivo diventerà, invece, fondamentale per il fisico amatoriale olandese van den Broek.

3.2 Il contributo del fisico amatoriale van den Broek

Economista di formazione, van den Broek aveva iniziato a interessarsi al sistema periodico degli elementi e alle problematiche connesse alla struttura dell'atomo a partire dal 1903.

Il suo contributo sulla Tavola Periodica non seguì, tuttavia, un percorso lineare e per ricostruirlo occorre necessariamente analizzare una serie di articoli che egli pubblicò tra il 1907 e il 1913, caratterizzati da geniali balzi in avanti e continui ripensamenti.

Nel primo di questi lavori del 1907 [17], il fisico olandese prendeva in considerazione un lavoro preliminare di Rutherford sulle particelle alfa dell'anno precedente, dove il fisico neozelandese aveva avanzato delle ipotesi sulla natura delle particelle alfa, che non era stata ancora chiarita. All'epoca, infatti, era noto solamente il rapporto massa/carica per queste particelle, che risultava quasi il doppio di quello determinato per gli ioni idrogeno. Conseguentemente, le particelle alfa potevano essere sia ioni con una carica elettrica uguale a quella dello ione idrogeno e peso atomico 2, sia ioni elio, di peso atomico uguale a 4 e carica doppia di quella di uno ione idrogeno [18]. Il fisico amatoriale olandese, nel suo lavoro del 1907, optò per l'ipotesi, poi rivelatasi non corretta, secondo la quale queste entità avrebbero avuto una massa pari a metà di quella di un atomo di elio, propendendo, quindi, per l'esistenza di particelle di peso atomico uguale a 2.

Sulla base di questa assunzione, van den Broek chiamò *alphon* queste presunte particelle di massa atomica 2 e avanzò l'ipotesi che tutti gli atomi fossero costituiti da multipli interi di questa unità fonda-

mentale. In questo modo elaborò una tavola periodica (Tabella 2) basata sull'idea dell'*alphon*, in cui ogni elemento differiva dal precedente in termini di peso atomico proprio di un valore pari a due unità. Così facendo, van den Broek si spingeva con la propria immaginazione ben oltre quello che era stato l'intento originario di Rutherford, portando le idee dello scienziato neozelandese sulle particelle alfa nel *regno della Tavola Periodica* e della classificazione degli elementi. Questo rappresenta sicuramente un bell'esempio del ruolo dell'*immaginazione* nella scienza che, invece, troppo spesso viene presentata nell'insegnamento come una disciplina arida, fredda, noiosa e puramente nozionistica.

Tabella 2. Tavola Periodica di van den Broek del 1907 (riproduzione tratta da E. Scerri [19]).

	VII	0	I	II	III	IV	V	VI
1	2* (α)	4 He	6 Li	8 Be	10 B	12 C	14 N	16 O
2	18 F	20 Ne	22 Na	24 Mg	26 Al	28 Si	30 P	32 S
3	34 Cl	36 Ar	38 K	40 Ca	42 Sc	44 Ti	46 V	48 Cr
4	50 Mn	52	54	56 Fe	58 Co	60 Ni	62	64
5	66	68	70 Cu	72 Zn	74 Ga	76 Ge	78 As	80 Se
6	82 Br	84 Kr	86 Rb	88 Sr	90 Y	92 Zr	94 Nb	96 Mo
7	98	100	102	104 Ru	106 Rh	108 Pd	110	112
8	114	116	118 Ag	120 Cd	122 Jn	124 Sn	126 Sb	128 Te
9	130 J	132 Xe	134 Cs	136 Ba	138 La	140 Ce	142 Nd	144 Pr
10	146	148	150 Sa	152	154 Gd	156	158 Tb	160
11	162	164	166 Er	168 Tu	170 Yb	172	174 Ta	176 W
12	178	180	182	184 Os	186 Ir	188 Pt	190	192
13	194	196	198 Au	200 Hg	202 Tl	204 Pb	206 Bi	208
14	210	212	214	216	218	220	222	224
15	226	228	230	232 Ra	234	236 Th	238	240 U

* Theoretical atomic weight.

Dopo il lavoro del 1907, il problema della classificazione degli elementi diventò ancora più centrale per van den Broek, come dimostra un suo brevissimo lavoro del 1911 apparso sulla rivista *Nature* [20]. Va detto che, rispetto al 1907, van den Broek aveva nel frattempo abbandonato l'idea originale dell'*alphon* come *building block* degli elementi chimici, mantenendo però l'ipotesi secondo la quale un elemento differisce da quello che lo affianca nel *suo* sistema periodico di due unità di peso atomico. Su queste basi, nel lavoro del 1911, van den Broek avanzò la proposta di integrare nel proprio sistema periodico l'ipotesi di Rutherford e Barkla, già discussa in precedenza, secondo la quale la carica nucleare sarebbe stata approssimativamente uguale a metà del peso atomico A. Ancora una volta, come già aveva fatto nel caso dell'*alphon*, van den Broek fece un balzo in avanti decisivo con la propria immaginazione, utilizzando una proposta formulata senza alcun riferimento al sistema periodico, per valutare l'ordinamento degli elementi chimici.

L'introduzione di questa uguaglianza, che van den Broek assunse essere esatta, nel *suo* sistema periodico ebbe però una fondamentale conseguenza. Poiché, infatti, ogni elemento si differenziava da quello che lo affianca di un peso atomico pari a due, con questa identità, ogni elemento veniva a differire da quello che lo segue, e da quello che lo precede, di *una sola unità di carica nucleare*. Per usare le parole dello stesso van den Broek: “ad ogni possibile carica permanente per atomo appartiene un possibile elemento”. Detto in altri termini, cioè significava implicitamente che la carica nucleare dell'atomo (non ancora definita numero atomico) corrispondeva alla posizione di un elemento nella tavola periodica e poteva, quindi, rappresentare un efficace criterio

ordinatore degli elementi. Se si vuole, questa è una prima *implicita scoperta* di quello che sarà in seguito chiamato *numero atomico*, Z . Un interessante commento a questo proposito è stato fatto dal fisico e storico della scienza A. Pais, che così scrive a proposito del lavoro di van den Broek [21]: “Così pur basato su una versione non corretta della Tavola Periodica e su una non corretta relazione tra Z e A , la priorità del numero atomico Z come criterio ordinatore della tavola periodica entrò nella fisica per la prima volta”.

Arrivati a questo punto del nostro percorso, va però detto che, nonostante il fondamentale passo in avanti compiuto da van den Broek, in questo lavoro del 1911, l'entità della carica nucleare era ancora strettamente legata al valore del peso atomico dell'elemento. Il passo in avanti decisivo verso un pieno riconoscimento della carica nucleare come possibile criterio ordinatore degli elementi, il cui valore è però slegato da quello del peso atomico, venne compiuto da van den Broek in un successivo articolo, pubblicato sempre su *Nature*, nel novembre 1913 [22].

In questo lavoro del 1913, il fisico amatoriale olandese utilizzò i già citati dati di Geiger e Marsden sullo scattering di particelle alfa da parte di diverse lamine metalliche. L'obiettivo era di verificare la propria intuizione sulla relazione tra la carica nucleare e la posizione di un elemento nel sistema periodico di Mendeleev, già presente in forma implicita nel suo lavoro del 1911. L'idea avanzata da van den Broek era, in pratica, quella di ricalcolare i rapporti trovati dai due collaboratori di Rutherford, utilizzando però una carica nucleare che fosse uguale al numero seriale dell'elemento nel sistema periodico (parametro che indicò con M , per riconoscenza verso Mendeleev), ma completamente indipendente dal valore del peso atomico A . Voleva verificare se, in questo modo, i rapporti fossero risultati realmente più costanti. Come auspicato, i rapporti fra il numero di particelle deviate di un certo angolo y e M^2 risultarono *effettivamente costanti*, in accordo con quanto previsto dal modello di Rutherford, con una deviazione standard minore del 2%. Sulla base di questi risultati, van den Broek trasse le seguenti conclusioni: “Se adesso in questi valori si introduce il numero M , relativo alla posizione che ciascun elemento occupa nel sistema di Mendeleev, anziché il valore di A , cioè il peso atomico, si ottiene una *reale costante*; quindi, l'ipotesi proposta [che la carica nucleare sia uguale al numero di serie dell'elemento] è valida per la serie di Mendeleev, ma la carica nucleare *non* è uguale alla metà del peso atomico”.

Il contributo di van den Broek fu decisivo per il successivo lavoro di Moseley, che conferì alla congettura del fisico olandese quella solidità che solo la concretezza sperimentale poteva darle. Come, infatti, scriverà in seguito lo stesso Moseley [23]: “Il mio lavoro è stato intrapreso con l'esplicito scopo di verificare l'ipotesi di van den Broek”.

3.3 Il lavoro sperimentale di Moseley

Per verificare l'ipotesi di van den Broek, occorreva ovviamente che Moseley determinasse per via sperimentale la *carica nucleare* dell'atomo. Tuttavia, questo passaggio chiave del lavoro di Moseley risulta pienamente comprensibile solo alla luce degli esperimenti con i raggi X condotti in quel periodo. Alcuni anni prima, in particolare, Barkla aveva scoperto che ogni elemento, opportunamente bombardato con un fascio di elettroni ad alta energia o con radiazioni X, emette raggi X contraddistinti da una caratteristica lunghezza d'onda [24]. Per questi studi, Barkla fu insignito del premio Nobel per la fisica nel 1917. L'interpretazione di tali raggi X emessi dagli elementi venne fornita attraverso il modello a orbite elaborato nel 1913 da N. Bohr, sulla base del modello di atomo nucleare di Rutherford. Secondo questa interpretazione, una radiazione esterna espelle un elettrone da un livello energetico interno dell'atomo; la lacuna così creata viene colmata da un elettrone di un livello superiore che, compiendo una transizione verso il basso, emette raggi X caratteristici dell'elemento, la cui energia corrisponde alla differenza tra i due livelli coinvolti.

Basandosi sui lavori di Barkla e Bohr, Moseley condusse i suoi esperimenti con l'esplicito intento di riuscire a collegare gli spettri a raggi X emessi da elementi metallici con una qualche proprietà fisica fondamentale degli atomi. Con una tecnica innovativa, da lui stesso messa a punto, Moseley riuscì a

registrare una serie di spettri X caratteristici per diversi elementi metallici, quando venivano bombardati con elettroni ad alta energia, utilizzando come reticolo di diffrazione un cristallo di ferrocianuro di potassio [25]. Tali spettri presentavano una parte continua e alcune righe, la più intensa delle quali rappresentava la cosiddetta K_α (Figura 1).

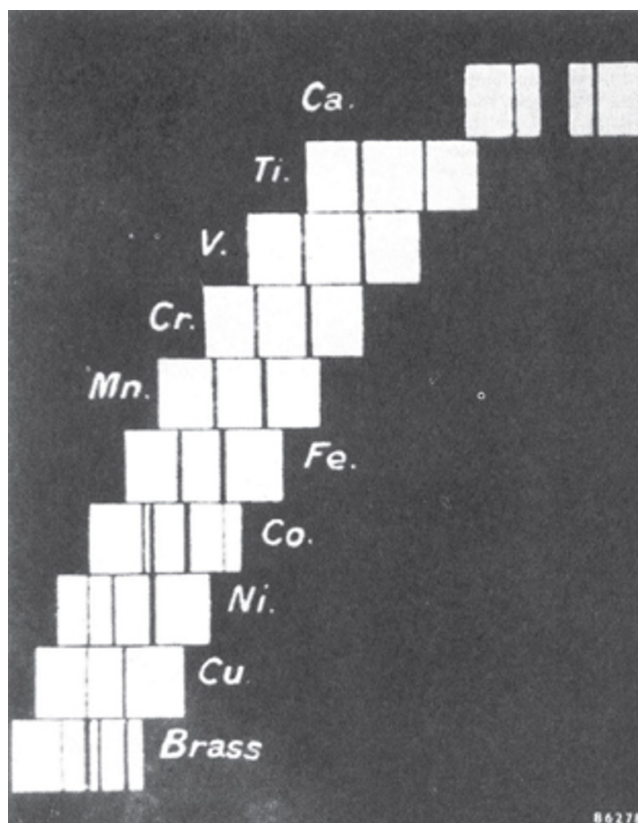


Figura 1. Immagine degli spettri a raggi X ottenuti da Moseley; le righe più intense corrispondono alla transizione K_α [26]

Moseley determinò accuratamente, elemento per elemento, le frequenze, ν della riga K_α negli spettri dei metalli analizzati. Secondo il modello atomico di Bohr tale riga è prodotta dalla transizione elettronica dal livello $n = 2$ al livello $n = 1$ dell'atomo nucleare. Rielaborando i dati trovati sperimentalmente, Moseley ricavò una relazione lineare tra la radice quadrata delle frequenze, ν , caratteristiche delle righe K_α , e la posizione degli elementi nella tavola periodica di Mendeleev, cioè a quello che da allora in poi sarà rinominato *numero atomico*, Z . Questa semplice relazione lineare, che aveva la forma del tipo $\nu = a(Z-b)$, è nota oggi come *legge di Moseley*, dove a e b sono due costanti di cui Moseley determinò il valore. In questo modo, Moseley aveva trovato un parametro caratteristico dell'atomo, determinabile per via sperimentale, che aumentava regolarmente muovendosi lungo il sistema periodico degli elementi. Si trattava di capire a cosa corrispondesse questo parametro.

Rapidamente Moseley riconobbe che questa quantità non poteva che essere la *carica positiva del nucleo*, riuscendo nel proprio intento di collegare gli spettri dei raggi X con una proprietà atomica e a confermare contemporaneamente il modello nucleare di Rutherford e l'ipotesi di van den Broek. Queste le parole di Moseley nel suo lavoro del 1913 [25]: "Abbiamo qui una prova che nell'atomo c'è una grandezza fondamentale, che cresce per intervalli regolari quando si passa da un elemento a quello vicino. Questa grandezza può essere solo la *carica positiva del nucleo centrale*, della cui esistenza abbiamo già avuto una prova definitiva [...] Essa è uguale al numero del posto occupato dall'elemento nel sistema periodico".

In questo modo, con la tecnica messa a punto da Moseley si era finalmente in grado di determinare i valori della carica nucleare degli atomi degli elementi da una serie di misure sperimentali di raggi X. I valori ottenuti da una prima serie di misure sono riportati nella Tabella 3.

Tabella 3. Misure delle cariche nucleari ottenute da Moseley (riproduzione tratta da S. Weinberg [27])

Elemento	Carica nucleare (in unità di carica elettronica)	Peso atomico
Calcio	20,00	40,09
Scandio	non misurata	44,1
Titanio	21,99	48,1
Vanadio	22,96	51,06
Cromo	23,98	52,0
Manganese	24,99	54,93
Ferro	25,99	55,85
Cobalto	27,00	58,97
Nichel	28,04	58,68
Rame	29,01	63,57
Zinco	30,01	65,37

Com'era prevedibile, le cariche nucleari risultavano tutte multipli interi della carica dell'elettrone, quello che, invece, non era del tutto previsto è che la carica nucleare aumentasse semplicemente di una unità nel passare da un elemento a quello di peso atomico immediatamente superiore. Inoltre, come si scoprì in seguito, tale schema risultava valido anche per altri elementi che non erano stati studiati inizialmente da Moseley.

Alla luce di questa fondamentale scoperta, si era così in grado di riesaminare alcune delle criticità del sistema periodico elaborato da Mendeleev. In particolare, rimaneva il problema dell'inversione di alcune coppie di elementi ordinati in base al loro peso atomico (le coppie cobalto-nichel, tellurio-iodio, alle quali si era aggiunta dopo la scoperta dei gas nobili, la coppia argon-potassio). Ebbene, dopo la scoperta di Moseley, si trovò che se queste coppie di elementi venivano ordinate secondo la successione dei valori crescenti della loro carica nucleare: l'inversione fatta da Mendeleev, una sorta di forzatura, risultava pienamente giustificata. Il *numero atomico*, Z , era così entrato a pieno titolo nel sistema periodico ed era diventato il nuovo criterio ordinatore degli elementi chimici.

4. Conseguenze della scoperta di Moseley

Come prima grande conseguenza del passaggio dal peso atomico alla carica nucleare (numero atomico) come criterio ordinatore degli elementi, si realizzò, come sottolineato dal filosofo francese G. Bachelard, un vero e proprio *sconvolgimento semantico* in seno alla Tavola Periodica [28]: "All'inizio questo numero atomico era un vero numero ordinale; era, insomma, il numero che fissava il posto di sostanze elementari nelle serie delle diverse linee orizzontali della tavola di Mendeleev. *Filosoficamente* il progresso compiuto al livello della nozione di numero atomico è consistito precisamente nel suo passaggio da funzione *ordinale* [cioè primo, secondo, ...] alla funzione *cardinale* [1, 2, ...]. Ci si è potuti rendere conto che con questa nozione, non solo si ordinavano gli elementi ma si *contava* qualcosa".

In pratica ciò significa che, se con il peso atomico si era potuto stabilire l'ordine degli elementi, cioè quale elemento precedeva l'altro, con il numero atomico si poteva andare alla conta degli elementi:

stabilire cioè, per la prima volta, il *numero* degli elementi compresi fra il primo e l'ultimo e quanti ne restavano ancora da scoprire: ($Z = 43, 61, 72, 75, 85, 87$).

Si può, inoltre, aggiungere che l'introduzione del numero atomico ha fornito alla sistematica di Mendeleev un fondamento più profondo e meno intuitivo del peso atomico, ancorandola cioè alla nozione di *struttura atomica* della materia. Questo passaggio è stato cruciale per l'evoluzione della chimica moderna e per una comprensione sempre più profonda dell'intima natura della materia. Infatti, come affermato dallo storico della scienza H. Kragh [29]: “Le *radici storiche* della moderna teoria della struttura atomica si trovano non solo nello sviluppo della fisica, ma anche nello sviluppo della chimica. *Tra i fenomeni chimici che hanno maggiormente influenzato la teoria atomica, il sistema periodico degli elementi è il più importante.* L'esistenza di regolarità nelle proprietà degli elementi, come riassunte nella Tavola Periodica, è stata una fonte di enigma e di *ispirazione* per molti scienziati che volevano conoscere i meccanismi e le cause sottostanti che *immaginavano* esistessero. Lo schema di classificazione di Mendeleev ha svolto un ruolo *euristico* nelle prime versioni della struttura atomica”. Il brano suggerisce, in sostanza, che idee come quella secondo la quale gli elettroni siano disposti a gusci/strati all'interno degli atomi sia scaturita da intuizioni chimiche derivate dalla Tavola Periodica di Mendeleev; tale stratificazione rispecchia, infatti, la distribuzione periodica degli elementi. Ciò sottintende anche che questa fondamentale concezione della moderna teoria atomica non è una conseguenza della meccanica quantistica, come spesso riportato nei manuali, ma è *antecedente* a essa e all'introduzione dei numeri quantici, e ne costituisce quasi una premessa necessaria.

Infine, a conclusione di questo excursus sui fondamenti della Tavola Periodica e sull'evoluzione dei criteri di ordinamento degli elementi chimici, è importante evidenziare che con la determinazione sperimentale della carica nucleare si era finalmente trovata anche quella *proprietà degli elementi che si conserva inalterata quando questi vanno a formare le sostanze composte e durante le trasformazioni chimiche*. Come importante conseguenza, ciò ha permesso di arrivare a una nuova e più moderna concezione di elemento chimico, dove con questo termine si può indicare: *una classe di nuclei aventi tutti lo stesso numero atomico* [30].

Riferimenti bibliografici

- [1] C. C. Gillispie, *Il Criterio dell'oggettività. Un'interpretazione della storia del pensiero scientifico*, Il Mulino, Bologna, 1981.
- [2] A. L. Lavoisier, *Trattato Elementare di Chimica*, opera originale pubblicata nel 1789 (<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b8615746s/f66.item>).
- [3] A. W. Williamson, On the atomic theory, *J. Chem. Soc.*, 1869, **22**, 328-365.
- [4] P. Thyssen, Mendeleev's Periodic Law and the 19th Century Debates on Atomism, in *Chemistry without Atoms* (Eds. K. Ruthenberg, P. Thyssen), Königshausen & Neumann, Würzburg, 2025.
- [5] D. I. Mendeleev, La legge della periodicità degli elementi chimici, 1871, in *Il sistema periodico degli elementi* (a cura di S. Tagliagambe), Tecknos Edizioni, Roma, 1994.
- [6] A. Kekulé, On some points of chemical philosophy, *The Laboratory*, 1867, **1**, 304.
- [7] A. J. Rocke, *Chemical Atomism in the Nineteenth Century: From Dalton to Cannizzaro*, Ohio State University Press, Columbus, 1984.
- [8] P. K. Feyerabend, *Realism, Rationalism & Scientific Method: Philosophical Papers*, Cambridge University Press, 1981, p. 176-202 (chapter: *Realism and Instrumentalism*).
- [9] S. Cannizzaro, *Sunto di un corso di filosofia chimica* (1858); *commento e nota storica di Luigi Cerutti; introduzione di Leonello Paoloni*, Sellerio editore, Palermo, 1991.
- [10] S. Cannizzaro, Sui limiti e sulla forma dello insegnamento teorico della chimica, *Gazzetta Chimica Italiana*, 1872, vol. II, 305-333.
- [11] F. Abbri, L'atomismo chimico, in *Storia della Scienza moderna e contemporanea* (a cura di P. Rossi), TEA, Milano, 2000, vol. II, 269-300.
- [12] D. I. Mendeleev, La legge della periodicità degli elementi chimici (1898), in D. I. Mendeleev, *Il sistema periodico degli elementi* (a cura di S. Tagliagambe), Teknos Edizioni, Roma, 1994

- [13] E. Rutherford, Henry Gwyn Jeffreys Moseley, *Nature*, 1915, **96**, 33-34.
- [14] E. Rutherford, The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom, *Philosophical Magazine*, 1911, **21** (Series 6, n. 125), 669-688.
- [15] H. Geiger, E. Marsden, The Laws of deflection of α -particles through large angles, *Philosophical Magazine*, 1913, **25** (Series 6, n. 148), 604-628.
- [16] E. Scerri, *A Tale of Seven Scientists and a New Philosophy of Science*, Oxford UP, 2016, p. 52.
- [17] A. van den Broek, Das α -Teilchen und das periodische System der Elemente, *Annalen der Physik*, 1907, **328**, 199-203.
- [18] S. Weinberg, *La scoperta delle particelle subatomiche*, Zanichelli Editore, 1986, p. 114.
- [19] E. Scerri, *A Tale of Seven Scientists and a New Philosophy of Science*, Oxford UP, 2016, p. 45.
- [20] A. van den Broek, The number of possible elements and Mendel  ff's "cubic" periodic system, *Nature*, 1911, **87**, 78.
- [21] A. Pais, *Inward Bound: Of matter and forces in the physical world*, Oxford UP, 1988.
- [22] A. van den Broek, Intra-Atomic Charge, *Nature*, 1913, **92**, 372-373.
- [23] H. G. J. Moseley, Atomic Models and X-Ray Spectra, *Nature*, 1914, **92**, 554.
- [24] J. I. Solov'ev, *L'evoluzione del pensiero chimico dal '600 ai giorni nostri*, Biblioteca della EST, Mondadori, 1976.
- [25] H. G. J. Moseley, The High-Frequency Spectra of the Elements, *Philosophical Magazine*, 1913, vol. 26 (Series 6, n. 156), 1024-1034.
- [26] H. G. J. Moseley, The High-Frequency Spectra of the Elements. Part II, *Philosophical Magazine*, 1914, vol. 27 (Series 6, n. 160) 703-713.
- [27] S. Weinberg, *La scoperta delle particelle subatomiche*, Zanichelli, Bologna, 1986, p. 134.
- [28] G. Bachelard, *Il materialismo razionale*, Dedalo Edizioni, Bari, 1993, p. 116.
- [29] H. Kragh, The first subatomic explanations of the periodic system, *Foundations of Chemistry*, 2001, **3**, 129-143.
- [30] W. Jensen, Logic, History, and the Chemistry Textbook II. Can We Unmuddle the Chemistry Textbook? *J. Chem. Educ.*, 1998, **75**, 817-828.

Arsenico *double-face* e un po' di gossip

Franco Alhaique

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

Abstract. This paper provides an overview of the dual nature of arsenic: on one side, arsenic as the king of poisons through the ages, on the other side, past, present and future perspectives of arsenic in medicine. Outlines on arsenic in cosmetics, together with hints on arsenic pollution of groundwater, are also given.

Keywords: arsenico; veleno; veneficio; inquinamento; medicinali arsenicali; salvarsan; antitumorali; antibiotici

Tutto è veleno: nulla esiste di non velenoso.
Solo la dose fa in modo che il veleno non faccia effetto
(Paracelso)

Sul vecchio “Rocci”, il vocabolario Greco-Italiano del mio liceo classico, alla voce φάρμακον [-ου, τό] è scritto: “*farmaco, giovevole o malefico, secondo il contesto*”; quindi l’arsenico, di cui coglieremo entrambe le caratteristiche, rientra perfettamente in questa definizione.

Proviamo quindi a seguire come, nel corso della lunga storia dell’arsenico e del suo utilizzo, i due contesti, il “malefico” e il “giovevole”, si siano continuamente intersecati e sovrapposti tra loro a seconda del risultato finale da raggiungere: guarigione o morte.¹

1. Le origini

Il nostro racconto parte da molto lontano, sia dal punto di vista geografico che temporale. Siamo nel subcontinente indiano, attorno al V secolo a.C.: la medicina Ayurvedica prevedeva l’uso terapeutico di due minerali contenenti arsenico, il realgar (As_4S_4)² e l’orpimento (As_2S_3), già in precedenza conosciuti e utilizzati come pigmenti, rispettivamente rosso e giallo.

Secoli più tardi, nell’antica Cina, secondo il libro di medicina tradizionale *Shen Nong Ben Cao Jing* (dinastia Han Orientale 25-220 d.C.), gli stessi minerali, insieme all’anidride arseniosa (As_2O_3 , triossido di diarsenico) venivano usati, sia per la cura delle ulcere cutanee, sia in forma orale per il trattamento delle febbri ricorrenti come la malaria³: un successo, come vedremo, veramente mondiale, durato a lungo anche nelle epoche successive.

¹ In questa rivista sono già apparsi due articoli dedicati specificamente all’arsenico: R. Cervellati, *Arsenico: fra storia e leggenda* (CnS, 2019, 5, 43-56) e F. Alhaique, *Il verde di Parigi: un pigmento killer* (CnS, 2025, 5, 45-52). In questa sede si è cercato di affrontare l’argomento “arsenico” seguendo un approccio diverso e trattando quasi esclusivamente le caratteristiche Veleno/Farmaco.

² A volte viene riportata la formula minima AsS che però non tiene conto della effettiva struttura presente nella cella elementare dei cristalli monoclinali del realgar.

³ J. Liu et al., Mineral arsenicals in traditional medicines: Orpiment, realgar, and arsenolite, *J. Pharmacol. Exp. Ther.*, 2008 May 7, 326(2), 363-368 (doi: 10.1124/jpet.108.139543).

Se ci spostiamo dall'Oriente al bacino del Mediterraneo, possiamo ricordare che in Grecia, sin dai tempi di Ippocrate di Coo (460-377 a.C.), così come più tardi in ambito "romano" con Plinio il Vecchio (24-79 d.C.) e Galeno (129-216 d.C.), entrambi gli effetti "malefico" e "giovevole" dei minerali di arsenico erano ben noti;^{4,5} tuttavia, la tradizione racconta che l'arsenico ebbe il suo maggior successo come veleno, tanto da identificarlo come "Il re dei veleni e il veleno dei re".

In questo senso, emblematico è l'episodio riportato da Tacito: Agrippina, per consentire al figlio Nerone di diventare imperatore, uccise Britannico, aggiungendo acqua fredda avvelenata a una bevanda volutamente servita troppo calda. Scrive infatti lo storico latino nei suoi *Annali*: "*fervore aspernabatur, frigida in aqua adfunditur venenum*".⁶ Cosa poteva essere quel veleno incolore e insapore, probabilmente a base di arsenico? Quasi certamente si trattava di anidride arseniosa, nota anche come "arsenico bianco", una polvere facilmente ottenibile per trattamento ad alta temperatura di orpimento e realgar, che non erano adatti per un veneficio a causa della loro intensa colorazione.

2. Medio Evo e Rinascimento

Anche in epoca medievale, il contesto "malefico" ha decisamente prevalso sul "giovevole". Il veleno era diventato un'arma strategica nelle mani dei potenti, un mezzo rapido e discreto per eliminare gli avversari. Intrighi di corte e banchetti che terminavano con morti sospette erano frequenti. Le famiglie più ricche e nobili, così come la corte papale, si dotarono di assaggiatori delle vivande da servire a tavola e talora anche il vasellame da portata veniva custodito in contenitori dei quali solo i più fidati dipendenti possedevano la chiave.⁷

Ma è con l'inizio del XV secolo che l'arsenico diventa un veleno "popolare", più conosciuto come "Cantarella", un nome associato a quello della famiglia Borgia: Rodrigo, diventato papa con il nome di Alessandro VI, e i figli Cesare (Figura 1, sinistra) e Lucrezia, bollata come spietata avvelenatrice, secondo l'immaginario collettivo, probabilmente per il ritratto a tinte fosche che ne hanno fatto Victor Hugo⁸ e Gaetano Donizetti,⁹ ma certamente accusata ingiustamente e pienamente riabilitata da Maria Bellonci.¹⁰

C'è un'aura di truce mistero attorno all'effettiva composizione della Cantarella: pare che questo veleno fosse preparato cospargendo d'arsenico le viscere di suini in decomposizione che, una volta essiccate e macinate, fornivano una polvere bianca dall'aspetto simile allo zucchero; ma non mancano descrizioni di preparazioni ben più truculente, sulle quali non è il caso di soffermarsi.

Malgrado i fatti di cronaca abbiano sempre una certa fascinazione, noi non ci soffermiamo oltre, perché dobbiamo considerare anche l'altra faccia della medaglia. Infatti, in estremo oriente, e in modo particolare in Cina, l'uso terapeutico del giallo *Cihuang* e del rosso *Xionghuang* (cioè orpimento e realgar), insieme all'arsenico bianco, continuano a trovare sempre più ampia applicazione anche come antisettici, come sedativi e per la cura di tumori cutanei;³ il medico/filosofo persiano Avicenna (980-1037) nel suo "Canone della medicina" dedica all'arsenico un posto di rilievo, inquadrandolo nel contesto della farmacologia e della tossicologia.

⁴ C. Monneret, *L'arsenic, poison et remède, L'actualité chimique*, maggio-giugno 2017, 418-419.

⁵ D. M. Jolliffe, *A history of the use of arsenicals in man*, *J. R. Soc. Med.* 1993, **86**, 287-289.

⁶ C. Tacito, *Annales*, Libro 13, Paragrafo XVI. Tacito non indica il tipo di veleno usato, ma accenna ai sintomi, specificando che Nerone sosteneva che si trattasse dei soliti attacchi convulsivi, di cui Britannico soffriva fin da bambino (*quo prima ab infantia adflicaretur*), sintomi che, successivamente, sono stati attribuiti all'effetto dell'arsenico.

⁷ B. Del Bo, *Arsenico e altri veleni. Una storia letale nel Medioevo*, Il Mulino, Bologna, 2024.

⁸ V. Hugo, *Lucrece Borgia*, dramma in tre atti (1833).

⁹ G. Donizetti, *Lucrezia Borgia*, prima rappresentazione alla Scala nel 1833.

¹⁰ M. Bellonci, *Lucrezia Borgia. La sua vita e i suoi tempi* (1939), vincitore del Premio Viareggio; recentemente ristampato nella collana Oscar Mondadori, Milano, 2022.



Figura 1. John Collier, *A Glass of Wine with Caesar Borgia*, 1893, Museum and Art Gallery, Ipswich (sinistra); Evelyn de Morgan, *The Love Potion*, 1903, The De Morgan Collection, London (destra)

Andando avanti nel tempo, incontriamo, in pieno Rinascimento, un personaggio che occupa un posto rilevante nella storia della medicina: Paracelso (1493-1541), un alchimista svizzero che, sviluppando i suoi studi sull'azione tossica e terapeutica dell'arsenico, insieme a quella di altri elementi, come il mercurio, l'antimonio e lo zolfo, giunse a identificare nella dose il fattore discriminante fra rimedio e veleno. Formulò, pertanto, la massima riportata come sottotitolo di questo lavoro *"Omnia venenum sunt: nec sine veneno quicquam existit. Dosis sola facit, ut venenum non fit"*.¹¹

3. Età Moderna

Se nella Roma di fine Quattrocento il veneficio con arsenico era, per così dire, di moda, a Venezia la situazione non era molto diversa. Nel XVI secolo i membri del Gran Consiglio della Serenissima assoldavano spesso avvelenatori di professione i quali, secondo un tariffario prestabilito, eliminavano i nemici della repubblica.

L'arte dell'omicidio con arsenico fu anche esportata in Francia (almeno così si racconta) da Caterina de' Medici, che andò in sposa a Enrico II di Valois (futuro re di Francia) e che, secondo una leggenda, aveva avvelenato alcuni avversari regalando loro guanti profumati impregnati di arsenico; anche se, secondo la tradizione storiografica, usò mezzi molto più spicci nel corso della Strage degli Ugonotti (Notte di San Bartolomeo, 23-24 agosto 1572).^{12,13}

Ma torniamo alle faccende di casa nostra. Nella seconda metà del XVII secolo una fattucchiera palermitana, Giulia Tofana (o Toffana), ebbe grande successo, anche a Roma, con una pozione, chiamata appunto "Acqua Tofana", a base di anidride arseniosa, limatura di piombo, limatura di antimonio e succo estratto dalle bacche della belladonna, spacciata come filtro d'amore (Figura 1, destra), ma che si era rivelata utilissima anche per affrettare l'acquisizione di una eredità e per mogli che volevano liberarsi dai mariti. Se l'attività di Giulia terminò con la sua condanna a morte per aver ucciso 600 persone (secondo gli atti giudiziari dell'epoca), a ereditare il segreto dell'acqua letale fu la figliastra Girolama Spana che, insieme ad altre quattro "comari", aveva organizzato una specie di società a delinquere per preparare e dispensare il veleno.

¹¹ Paracelsus (Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim), *Responsio ad quasdam accusationes & calumnias suorum aemulorum et obtrectatorum. Defensio III. Descriptionis & designationis novorum Receptorum*.

¹² A. Fernández, Caterina de' Medici la "regina nera", *Storica - National Geographic*, 5 gennaio 2025.

¹³ A. Savino, Da accessorio profumato ad arma avvelenata: i guanti di Caterina de' Medici, *Life and People*, 2023, **30**, 12 (<https://lifeandpeople.it/2023/12/30/storia-leggenda-guanti-profumati-avvelenati-caterina-de-medici/>).

4. Età contemporanea

Se oggi andassi in farmacia a chiedere dell'anidride arseniosa certamente non me la darebbero, ma fino al XVII secolo era proprio lì, anzi nella spezieria, che era possibile rifornirsi di quella polvere bianca velenosa, all'aspetto simile allo zucchero,¹⁴ e sempre nella stessa spezieria si doveva andare per comprare lo zucchero, quello vero. Una miscela dei due prodotti non dava sospetti e certamente portava a una "dolce" morte. Purtroppo, non mancarono anche avvelenamenti involontari. Raccontano le cronache che a metà 1800, a Bradford, Inghilterra, ci furono 21 vittime a causa di pastiglie alla menta vendute da una bancarella del mercato e accidentalmente contaminate da arsenico. La sostanza velenosa era stata utilizzata per errore al posto del gesso in polvere, che veniva a sua volta usato al posto dello zucchero per la contraffazione dei prodotti alimentari¹⁵ (Figura 2). Pare che all'epoca si parlasse di "arsenico e vecchi dolcetti", ma non ne sono sicuro e chiedo scusa, forse a causa dell'età avanzata faccio confusione con un film di Frank Capra, in cui l'arsenico veniva servito sciolto nel vino di sambuco.¹⁶



Figura 2. Illustrazione satirica del Punch (1858) "Il grande preparatore di pastiglie"; fonte immagine: John Leech/Wikimedia Commons

La miscela di zucchero e arsenico ci porta a "Il Sistema Periodico" di Primo Levi. Alla voce "arsenico", lo scrittore racconta di un ciabattino che era andato da lui per farsi analizzare dello zucchero, che gli era stato donato da un infido concorrente, e di come Levi vi avesse individuato la presenza di arsenico, prima dall'odore agliaceo sviluppato per incenerimento e poi dal precipitato giallo del solfuro:

Pesai un grammo di zucchero nel crogiolo di platino (pupilla dei nostri occhi) per incenerirlo sulla fiamma: si levò nell'aria polluta del laboratorio l'odore domestico ed infantile dello zucchero bruciato, ma subito dopo la fiamma si fece livida e si percepì un odore ben diverso, metallico, agliaceo, inorganico, anzi, controorganico: guai se un chimico non avesse naso. A questo punto è difficile sbagliare: filtrare la soluzione, acidificarla, prendere il Kipp, far passare idrogeno solforato. Ecco il precipitato giallo di solfuro, è l'anidride arseniosa ...".¹⁷

¹⁴ Anche Romeo acquista dallo speziale di Mantova il veleno per uccidersi (W. Shakespeare, *Romeo e Giulietta*, atto V).

¹⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/1858_Bradford_sweets_poisoning

¹⁶ *Arsenico e vecchi merletti* (Arsenic and Old Lace) è una commedia scritta da Joseph Kesselring nel 1939 e nota soprattutto per l'omonimo film con Cary Grant come protagonista.

¹⁷ P. Levi, *Il Sistema Periodico*, Einaudi, Torino, 1975, pag. 43.

Certamente i lettori meno giovani ricorderanno, con nostalgia, il laboratorio di analisi sistematica qualitativa con le sue puzze e la precipitazione dell'arsenico al secondo gruppo.

Dall'odore di aglio ricordato da Levi si arriva a quello del pelargonio caratteristico della Lewisite (Figura 3); si tratta di un liquido oleoso ad azione vescicante che attacca i polmoni e provoca avvelenamento per l'assorbimento attraverso la pelle. Sviluppato alla fine del primo conflitto mondiale, deve il suo nome al chimico e soldato statunitense W. L. Lewis che ne descrisse la sintesi.

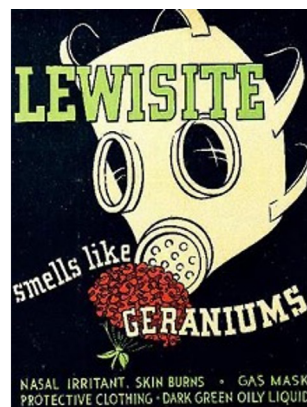
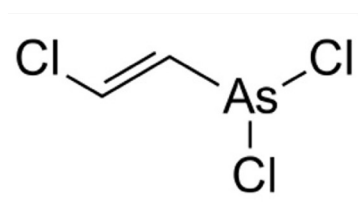


Figura 3. Formula chimica della Lewisite (2-cloroetenildicloroarsina) a sinistra e a destra il manifesto che metteva in guardia per la pericolosità del prodotto

E oggi? Se non è più di moda avvelenare con l'arsenico, è lui che arriva a noi dal sottosuolo fino alle acque per uso potabile (Figura 4). La presenza di arsenico è legata, infatti, a un rilascio naturale che le acque di circolazione ipogea subiscono nell'attraversare strati di roccia di origine vulcanica. Il fenomeno, particolarmente rilevante nella zona dell'alto Lazio, obbliga a un monitoraggio e a una verifica continua che le concentrazioni di arsenico rimangano al di sotto del limite di 10 µg/L.



Figura 4. Il problema dell'arsenico nell'acqua per uso umano

Per l'eliminazione/riduzione dell'arsenico nelle acque, si sono dimostrati adatti sia processi chimici che fisici, come la flocculazione con sali di ferro e l'adsorbimento su ossido di ferro, allumina attivata o, più recentemente, su grafene e nanotubi di carbonio.¹⁸ Talora può essere utile ricorrere a processi di ossidazione dell'arsenico trivalente nella forma pentavalente, molto meno tossica, utilizzando ossidi di ferro e di manganese o, in alternativa, con metodi fotochimici. Nel caso dell'acqua potabile vengono anche utilizzati l'osmosi inversa e lo scambio ionico, entrambi più efficaci sull'arsenico pentavalente, ma comunque sufficienti per far rientrare le concentrazioni di arsenico nei limiti di legge. Sono anche in fase avanzata di studio membrane altamente selettive nei confronti dell'arsenico;¹⁹ tuttavia, lo sviluppo di un approccio di tipo biologico, basato sull'uso di microrganismi o di piante (fitodepurazione),²⁰ sarebbe auspicabile e potrebbe risultare più economico e rispettoso dell'ambiente.

Arrivati a questo punto, prima di voltare pagina e abbandonare la parte del racconto dedicata all'aspetto "malefico" del nostro elemento, non possiamo rinunciare a una breve incursione in ambito letterario. L'arsenico infatti è spesso presente, oltre che in numerosi "gialli", anche nel capolavoro di Flaubert: Anna (Madame Bovary) morì suicida a causa di tale veleno. Forse meno noto è il romanzo di Salgari "I solitari dell'oceano", nel quale si racconta che il crudele capitano Carvadhò uccise con l'arsenico tutti gli schiavi che trasportava sulla sua nave.

Non solo le parole scritte narrano di avvelenamenti, ma anche i libri come tali possono essere "velenosi": oltre alla fantasia di Eco ne "Il Nome della Rosa", più concretamente è stato riscontrato che alcune copertine di libri dell'Ottocento erano state colorate con un pigmento a base di arsenico, l'acetarsenito di rame, più noto con il nome "verde di Parigi".²¹

Anche se altro ci sarebbe da raccontare, non vogliamo accanirci ulteriormente contro il nostro arsenico che, pur velenoso, ha avuto un suo significativo riscatto come "giovevole" ... o quasi.

Dall'ultimo ventennio del XVIII secolo, in particolare nel 1786, Thomas Fowler, riformulando una preparazione messa in commercio qualche anno prima come "Tasteless Ague Drops", ne verificò l'attività per il trattamento della malaria e di cefalee ricorrenti. Il *Liquor Arsenicalis* di Fowler (soluzione all'1% di arsenito di potassio aromatizzato alla lavanda) ebbe grande successo: veniva prescritto come tonico, ma anche per numerose altre patologie, fra cui l'anemia, l'asma, il colera, la sifilide e la leucemia. Quasi una panacea che entrò a far parte della *Pharmacopoeia Londinensis* e successivamente di numerosi formulari farmaceutici, nonché di varie farmacopee in Italia, in Europa e in America (Figura 5).

Con i primi anni del 1900, l'uso degli arsenicali inorganici andò via via diminuendo, mentre l'attenzione si andava focalizzando verso quelli organici, per cominciare con l'Atoxyl, il sale sodico dell'acido p-aminofenilarsenico (Figura 6, in alto a sinistra), proposto per la cura della tripanosomiasi (comunemente indicata come malattia del sonno), ma che, a causa dell'elevata tossicità, fu presto abbandonato e autorizzato solo per terapie veterinarie.

Questo stesso principio attivo destò l'attenzione di Paul Ehrlich²² che, con l'aiuto di alcuni validi collaboratori, sintetizzò (Figura 6, in alto al centro) numerosi altri organoarsenicali, per poi te-

¹⁸ R. Biswas, A. Anshuman, B. N. Samal, A review on arsenic removal from wastewater using carbon nanotube and graphene-based nanomaterials as adsorbents, *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 2023, **8**(4), 1033-1046 (<https://doi.org/10.1007/s41204-023-00332-x>).

¹⁹ F. Galiano, et al., Arsenic water decontamination by a bioinspired As-sequestering porous membrane, *Nat. Water*, 2024, **2**, 350-359 (<https://www.google.com/search?client=safari&rls=en&q=org%2F10.1038%2Fs44221-024-00220-x&ie=UTF-8&oe=UTF-8>).

²⁰ M. L. Antenzio, et al., Optimizing the growth conditions of the fern *Pteris vittata* maximizes its ability to phytoextract arsenic from drinking water in multiple cycles, *Environ. Technol. Innov.*, 2025, **40**, 104629 (<https://www.science-direct.com/science/article/pii/S2352186425006157?via%3Dihub>).

²¹ J. Brower, These green books are poisonous and one may be on a shelf near you, *National Geographic*, 28 aprile 2022.

²² Premio Nobel per la medicina nel 1908. A lui si deve il concetto di "proiettile magico" (*Zauberkegel*) che identifica il comportamento ideale di farmaci capaci di colpire selettivamente i microrganismi patogeni senza danneggiare le cellule umane.

starli in particolare come farmaci da somministrare per via endovena contro la sifilide. Il 606^{mo} derivato si dimostrò il più efficace e il successo fu tale che solo l'industria farmaceutica (per prima la Hoechst) poté sopperire alle richieste, immettendolo nel mercato con il nome di Salvarsan. La molecola base di questo prodotto è l'arsfenamina (Figura 6, in alto a destra); tuttavia, quasi un secolo più tardi, misure di spettrometria di massa dimostrarono che questa molecola esiste in soluzione nelle forme di trimero (Figura 6, in basso a sinistra) e di pentamero (Figura 6, in basso al centro).²³ Il Salvarsan fu per vari anni il farmaco più venduto al mondo e il suo nome divenne talmente famoso da essere riportato in numerosi testi letterari, fra i quali forse il più noto è "Addio alle Armi".²⁴

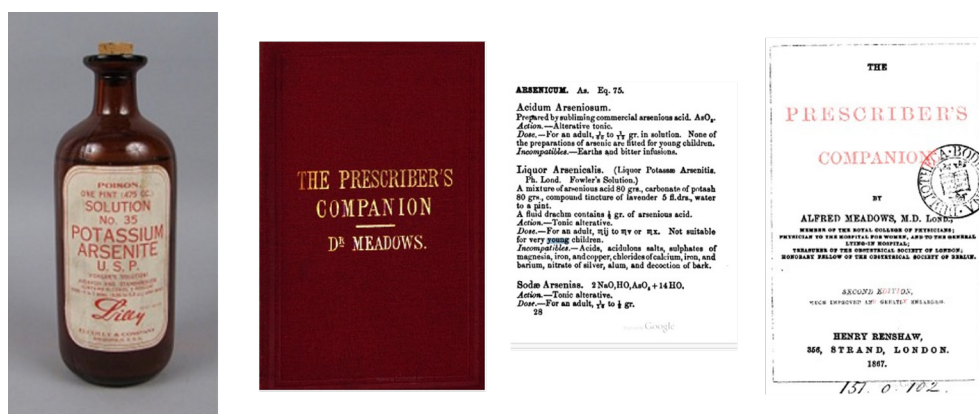


Figura 5. Una bottiglia contenente la soluzione di arsenito di potassio preparata come descritto nella farmacopea degli Stati Uniti (U.S.P) e un formulario del 1867

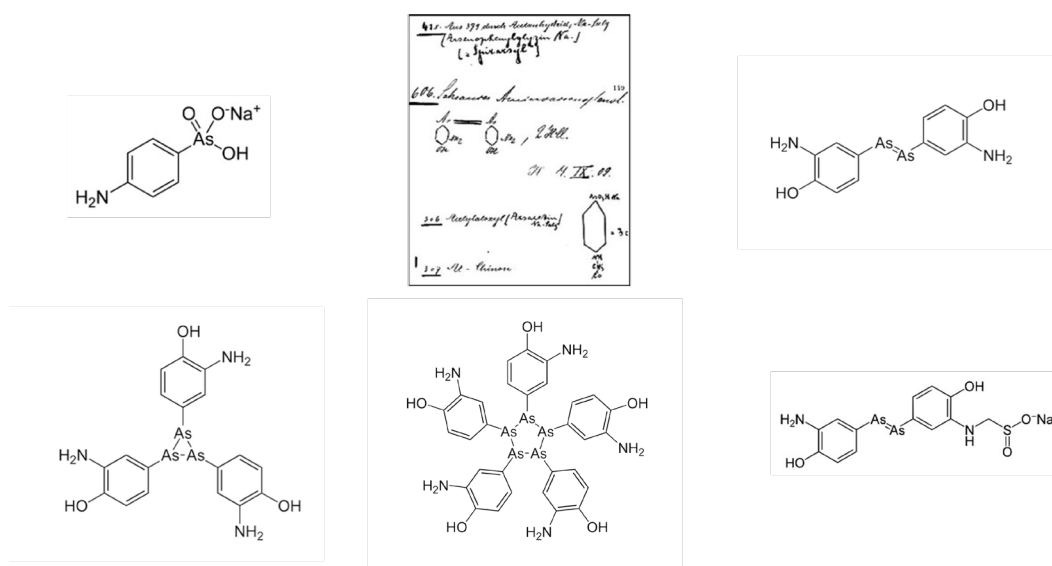


Figura 6. Formula dell'Atoxyl (in alto a sinistra); una pagina di appunti dal laboratorio di sintesi di Ehrlich (in alto al centro); arsfenamina, molecola base del Salvarsan (in alto a destra); trimero (in basso a sinistra) e pentamero (in basso al centro) dell'arsfenamina; formula del Neosalvarsan (in basso a destra)

²³ C. L. Nicholas et al., The composition of Ehrlich's Salvarsan: resolution of a century-old debate, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2005, **44**, 6, pp. 941-944 (doi.org/10.1002/anie.200461471).

²⁴ E. Hemingway, *Addio alle Armi*, trad. F. Pivano, Oscar Mondadori, Milano, 1965. C'è da osservare che a quell'epoca erano molti i medicinali a base di mercurio (mercuriali), anche per la sifilide, tanto che era diventato di moda il detto: "Due minuti con Venere, una vita con Mercurio".

Gli studi sulle molecole organoarsenicali dovettero proseguire perché il Salvarsan presentava ancora un grado di tossicità piuttosto elevato; si arrivò così al prodotto numero 914, neoarsfenamina o Neosalvarsan (Figura 6, in basso a destra), che, somministrato per via endovena, si dimostrava più attivo e meno tossico, pur procurando ancora nausea e vomito ai pazienti. Il Neosalvarsan, come altri derivati analoghi (p. e. oxofenarsina cloridrato/Mapharsen, solfarsenammina), ebbero lunga vita fino all'arrivo della penicillina, che dal secondo dopoguerra divenne il principio attivo di elezione per la cura della sifilide. Sono invece ancora in uso alcuni medicinali organoarsenicali ad azione tripanocida. Se, nelle formulazioni endovena (Figura 7), i dosaggi degli organoarsenicali erano alquanto elevati, dell'ordine dei decigrammi, grande successo ebbe, nel XIX secolo, fino alla metà di quello successivo, la somministrazione orale di quantità notevolmente ridotte di arsenico, inorganico e organico, come agente tonico e ricostituente capace di stimolare il metabolismo e lo stato di salute generale, adatto anche ai bambini e ai convalescenti.



Figura 7. Fiale di Salvarsan e kit per la somministrazione endovena

Non si trattava di medicinali in senso stretto, quindi, era possibile pubblicizzare queste preparazioni sui giornali e con manifesti per le strade (Figura 8).



Figura 8. Tra 1800 e il 1900 furono molte le formulazioni di tonici e ricostituenti contenenti arsenico; il Tónico “Bayer” (in basso a destra) conteneva anche piccolissime quantità di stricnina

Una piccola nota personale: il tonico “Bayer” riportato nella figura 8 è stato somministrato anche al sottoscritto negli anni '50 del secolo scorso e mi è rimasto particolarmente impresso per la forma originale della bottiglia e per il sapore gradevole, ma non garantisco che mi abbia fatto effetto. Se l'efficacia dell'arsenico a basso dosaggio come tonico/ricostituente può destare oggi qualche perplessità, l'uso di anidride arseniosa in campo cosmetico non può certo essere da meno. Malgrado la tossicità di tale sostanza fosse ben nota, da metà del 1800 fino all'inizio di questo secolo, cialde all'arsenico (*Dr Campbell's arsenic wafers*), da somministrare per via orale, venivano pubblicizzate come sicure e garantite per schiarire la pelle e rimuoverne le imperfezioni, così come saponi, polveri e lozioni per uso dermatologico erano considerati adatti per dare alla carnagione un aspetto più sano e attraente (Figura 9).



Figura 9. Pubblicità di prodotti cosmetici contenenti arsenico

Una volta superato l'impiego del Salvarsan e dei suoi succedanei a favore degli antibiotici e tenendo conto che l'utilizzo dell'arsenico in campo cosmetico è carente di rigore scientifico, si potrebbe pensare che lo studio di principi attivi contenenti arsenico sia stato abbandonato; ma così non è accaduto, infatti sono ancora numerose le ricerche rivolte ad individuare l'attività farmacologica di molecole, vecchie e nuove, contenenti questo elemento.

È quindi arrivato il momento di focalizzare l'attenzione su cosa “bolle in pentola” ai giorni nostri relativamente all'uso “giovevole” dell'arsenico inorganico e degli organoarsenicali; tuttavia, poiché la letteratura relativa a tale argomento è assai vasta, in questa sede ci limiteremo a sottolineare solo alcuni aspetti particolari della ricerca nel settore, mentre un quadro più ampio e articolato viene fornito dagli articoli riportati nella nota finale “Per saperne di più”.

Cominciamo subito segnalando che il realgar viene tuttora studiato per la sua azione antitumorale²⁵ e che l'anidride arseniosa riveste un discreto interesse per il trattamento di alcune forme di leucemia. In tale ambito ha destato grande attenzione il potenziamento di alcuni principi attivi contro il mieloma multiplo,

²⁵ G. Bovone, L'arsenico: da strumento di morte ad antitumorale (XIX - XX - XXI secolo), *Atti del 68° Congresso Nazionale di Storia della Farmacia*, Rimini, 9-10 giugno, 2018 (https://assets.unifarco.it/museo/it/Assets/riviste/documenti/RivFarm_Ago_2019_Bovone.pdf).

quando somministrati in combinazione con anidride arseniosa e realgar micronizzato, mentre, secondo una ricerca molto recente, l'associazione di anidride arseniosa e acido all-*trans* retinoico rappresenterebbe lo standard di cura di prima linea per la Leucemia Acuta Promielocitica. Questo abbinamento ha nettamente migliorato il trattamento della malattia, permettendo di ottenere altissimi tassi di guarigione.²⁶ Attivo contro la Leucemia Promielocitica è risultato essere pure un altro prodotto di notevole interesse: l'Arsenicina A. Isolata dalla spugna *Echinochalina bargibant*, essa presenta anche una notevole attività antibatterica e viene, quindi, considerata come un antibiotico di origine naturale. L'Arsenicina A ha una struttura che ricorda quella dell'adamantano e può essere ottenuta per sintesi insieme a un'ampia serie di derivati dotati di attività antitumorale (Figura 10).²⁷ Poco dopo l'Arsenicina A, un nuovo antibiotico è stato isolato dal batterio ambientale *Burkholderia gladioli*: l'Arsinotricina, un analogo del glutammato (Figura 10), dotato di attività inibitoria nei confronti dell'enzima glutammina sintetasi. È stato evidenziato che tale antibiotico è efficace sia contro i batteri Gram positivi che Gram negativi e ha una potenziale applicazione nella terapia antitubercolare.²⁸ Arsenicina A e Arsinotricina potrebbero, quindi, rappresentare i progenitori di una nuova classe di antibiotici avendo dimostrato, rispetto all'arsenico inorganico, un'azione inibente considerevolmente maggiore e un effetto citotossico sui monociti umani decisamente inferiore.

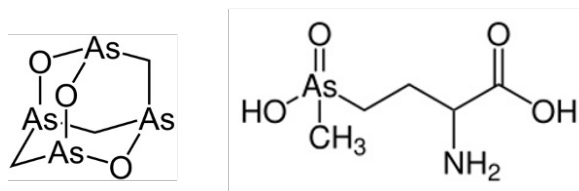


Figura 10. Strutture di Arsenicina A (sinistra) e Arsinotricina (destra)

Accanto agli studi su nuovi principi attivi contenenti arsenico, dobbiamo anche ricordare che vengono ampiamente studiate formulazioni innovative, che consentono un rilascio controllato e un miglioramento del targeting di tali sostanze verso le cellule tumorali, con conseguente riduzione della tossicità e miglioramento dell'efficacia terapeutica.²⁹

Nel corso della nostra trattazione sull'arsenico malefico e giovevole abbiamo avuto modo di constatare come sia valida l'affermazione di Paracelso, cioè che è solo la dose a fare in modo che il veleno non faccia effetto; è, quindi, arrivato il momento di affrontare un ultimo punto: l'arsenico nella medicina omeopatica, quando cioè l'arsenico è talmente diluito da essere praticamente assente. Malgrado una comprensibile diffidenza è, infatti, necessario prendere atto che l'anidride arseniosa (*Arsenicum album*) e l'arseniato di calcio (*Calcarea arsenicosa* o *Calcium arsenicosum*) sono ampiamente utilizzati, a diverse diluizioni, come rimedi omeopatici in forma di granuli, globuli, o come liquidi da somministrare in gocce³⁰ (Figura 11).

²⁶ U. Platzbecker et al., Arsenic trioxide and all-*trans* retinoic acid combination therapy for the treatment of high-risk acute promyelocytic leukemia. Results, from the APOLLO trial, *J. Clin. Oncol.*, 2025, **43**, 3169-3169 (<https://doi.org/10.1200/JCO-25-00535>).

²⁷ I. Mancini, et al., On the first polyarsenic organic compound from Nature: Arsenicin A from the new Caledonian Marine Sponge *Echinochalina bargibanti*, *Chem. Eur. J.*, 2006, **12**, 8989-8994 (<https://doi.org/10.1002/chem.200600783>).

²⁸ S. V. Nadar, et al., Arsinothricin, an arsenic-containing non-proteinogenic amino acid analog of glutamate, is a broad-spectrum antibiotic, *Commun. Biol.*, 2019, **2**, 131 (<https://www.nature.com/articles/s42003-019-0365-y>).

²⁹ F. Liu, et al., Harness arsenic in medicine: current status of arsenicals and recent advances in drug delivery, *Expert Opinion on Drug Delivery*, 2014, **21**(6), 867-880 (<https://doi.org/10.1080/17425247.2024.2372363>).

³⁰ Granuli e globuli sono costituiti da sferette di saccarosio e lattosio impregnate di una soluzione molto diluita della sostanza. I granuli sono confezionati in tubi multidose (cioè ogni volta si prelevano alcune unità). I globuli, più piccoli, sono prevalentemente in forma monodose.

Tali prodotti vengono proposti per un'ampia gamma di disturbi, in particolare quelli legati all'apparato gastrointestinale e agli stati di ansia.

Come chimici che hanno studiato stechiometria fin dal primo anno di corso, di fronte alle terapie omeopatiche abbiamo da sempre qualche problema che possiamo provare a chiarire proprio guardando le etichette delle due formulazioni riportate in figura 11, dove leggiamo 30 C e 30 CH: entrambe le sigle stanno a indicare che partendo da una soluzione “madre”, questa viene diluita con un rapporto di 1 a 100 per 30 volte. Proviamo quindi a fare un semplice calcolo: immaginiamo di partire da una soluzione a concentrazione 1 M ($6,02 \times 10^{23}$ molecole/litro), già con una diluizione 1 a 100 ripetuta 12 volte cosa rimane?



Figura 11. Formulazioni omeopatiche di *Arsenicum album*

E qui ci fermiamo, nella consapevolezza di non voler diluire ulteriormente questo lungo racconto sul nostro amico/nemico arsenico *double face*.

Per saperne di più

Arsenico “malefico”

- J. O. Nriagu, Arsenic poisoning through the ages, in *Environmental Chemistry of Arsenic* (Ed. W. T. Frankenberger Jr.), Marcel Dekker, New York, 2002, pp. 1-26.
- J. Parascandola, *King of Poisons: A History of Arsenic*, Potomac Books, University of Nebraska, USA, 2012.
- M. Karamanou, et al., Toxicology in the Borgias period: the mystery of *Cantarella* poison, *Toxicology Research and Application*, 2018, **2**, 1-3 (<https://doi.org/10.1177/2397847318771126>).

Arsenico “giovevole”

- N. P. Paul, et al., Arsenic in medicine: past, present and future, *Biometals*, 2023, **36**, 283-301 (<https://doi.org/10.1007/s10534-022-00371-y>).
- X. Zhang, et al., Arsenic compounds in cancer therapy: mechanistic insights and antitumor activity, *Biochem. Pharmacol.*, 2025, **240**, 117093 (<https://doi.org/10.1016/j.bcp.2025.117093>).
- Y. Liu et al., Mineral arsenicals in traditional medicines: Orpiment, realgar, and Arsenolite, *J. Pharmacol. Exp. Ther.*, 2008, **326**(2), 363-368 (<https://doi.org/10.1124/jpet.108.139543>).
- Y. Yang, et al., Research progress on arsenic, arsenic-containing medicinal materials, and arsenic-containing preparations: clinical application, pharmacological effects, and toxicity, *Front. Pharmacol.*, 2024, **15**, 1338725 (<https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1338725>).
- J. Wua, et al., The medicinal use of realgar (As_2S_4) and its recent development as an anticancer agent, *J. Ethnopharmacol.*, 2011, **135**, 595-602 (<https://doi.org/10.1016/j.jep.2011.03.071>).

La stampa 3D anche per i Beni Culturali

Luigi Campanella

Università di Roma La Sapienza

e-mail: luigi.campanella@uniroma1.it

Per stampa 3D si intende la realizzazione di oggetti tridimensionali mediante produzione additiva partendo da un modello 3D digitale prodotto in materiale plasmabile (in molti casi un gel acrilico fotopolimerizzato con luce UV), con software dedicati e poi elaborato attraverso una rigorosa scansione delle forme. Tale tecnologia trova applicazione in molti campi: dalla modellistica alle applicazioni CAD (*Computer-Aided Design*), in metallurgia, in architettura, nelle scienze spaziali, in medicina, in paleontologia (Figura 1).

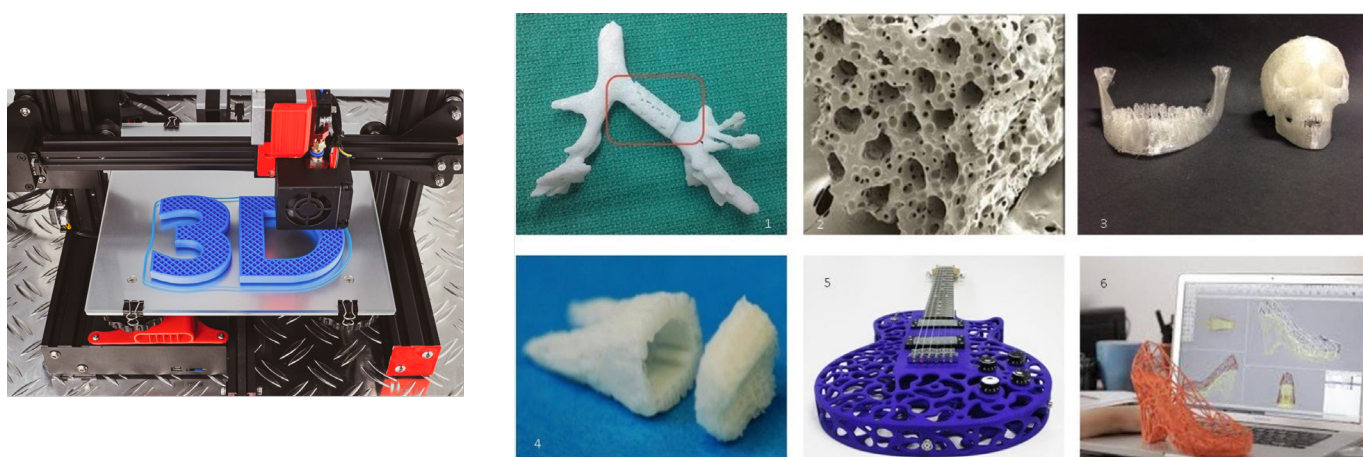


Figura 1. Una stampante 3D ed esempi di applicazioni in vari ambiti

La tecnologia della stampa 3D viene attualmente studiata dalle aziende e dalle accademie di biotecnologia per il possibile uso nelle applicazioni di ingegneria tissutale, in cui sono costruiti organi e parti di corpo usando tecniche a getto d'inchiostro. Strati di cellule viventi sono depositati su un mezzo gelatinoso e accumulati lentamente per formare strutture tridimensionali.

Un settore fino a poco tempo fa non ancora coinvolto in questa tecnologia è quello dei Beni Culturali, ma ora grazie alla collaborazione fra la Galleria dell'Accademia di Firenze e l'Università di Firenze questo ritardo sembra colmarsi. Infatti, attraverso la stampa 3D è stata riprodotta una copia del David di Michelangelo, una delle opere dinnanzi a cui anche Leonardo rimase colpito e che ogni anno attira 1,5 milioni di visitatori. Era il 1501 quando a 26 anni Michelangelo ricevette dall'Opera del Duomo di Firenze l'incarico di realizzare una statua dedicata a David e Golia. Il capolavoro di Michelangelo, una statua di marmo del peso di 5.660 chili alta più di 5 metri, rappresenta appunto David pronto ad affrontare Golia.

Oggi ne esiste un clone molto più leggero – non supera i 450 chili – che è stato ottenuto proprio con la tecnologia a stampa 3D (Figura 2) e che è stato presentato all'Expo di Dubai negli Emirati Arabi.

Per dare alla copia il vero aspetto del capolavoro michelangiolesco, oltre a una fedeltà riproduttiva esasperata fino nelle pieghe e nelle rughe del volto, la superficie è stata ricoperta con un sottile strato di 2 mm di polvere di marmo. La tecnologia al servizio della diffusione della cultura è il messaggio che ci viene da questa fantastica esperienza.

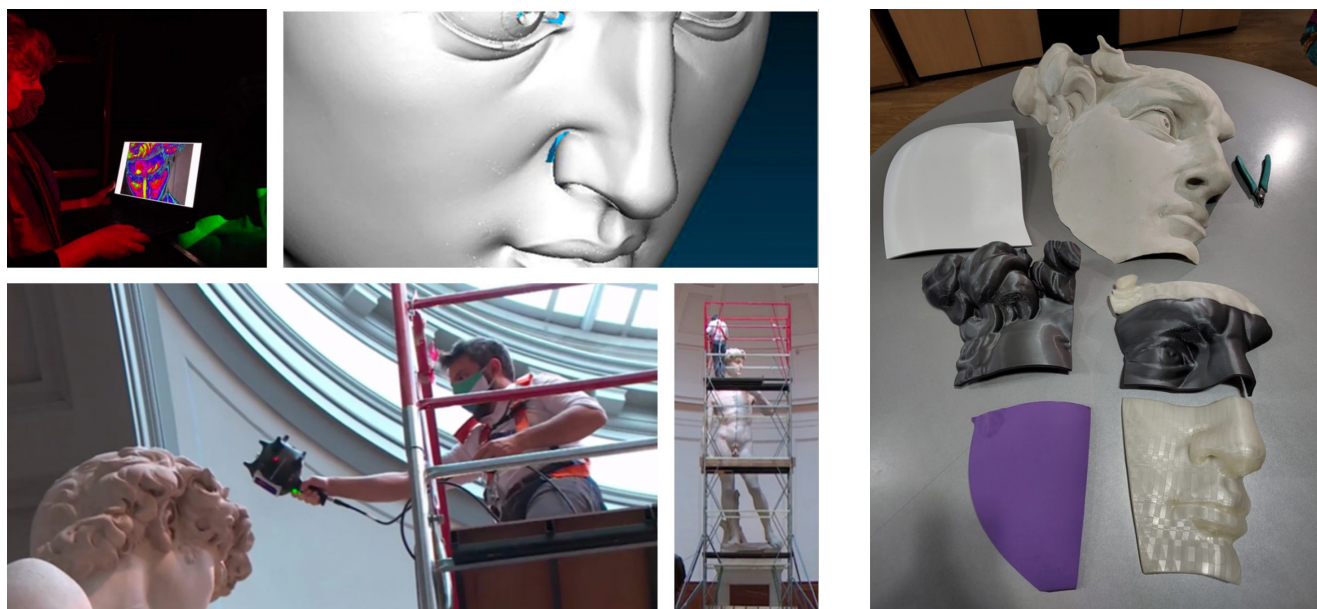


Figura 2. Lo staff al lavoro per realizzare il clone del David e alcune parti “stampate”

A 50 anni da Seveso

Claudio Della Volpe

Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Trento

e-mail: claudio.dellavolpe@unitn.it

Sui giornali di quei giorni di luglio 1976, l'incidente di Seveso fu definito un disastro ambientale.

Sul numero di *Sapere* pubblicato pochi mesi dopo l'evento fu definito un "crimine di pace".

Il libro scritto dal direttore tecnico della ICMESA, Jörg Sambeth, (che fu condannato a 5 anni perché era il direttore tecnico al momento dell'incidente, ma non li scontò mai), pubblicato nel 2004, quasi 30 anni dopo l'incidente, si intitola *Zwischenfall in Seveso. Ein Tatsachenroman*, ossia *Una seccatura a Seveso. Un romanzo basato su una storia vera* (seccatura qui è inteso in modo ironico).

Cosa è stato effettivamente Seveso? Io mi ero laureato pochi giorni prima, alla fine di maggio; qualcuno dei lettori di questo articolo sarà nato certamente dopo e gli studenti a cui ci si potrebbe rivolgere forse non ne hanno mai sentito parlare.

Tutto questo ci aiuta a dire che anche dopo 50 anni non è banale parlarne.

Ci sono due approcci per farlo: uno tecnico, che affronta quali furono le condizioni tecniche dell'evento, e uno socioeconomico, che invece considera quali furono le condizioni sociali ed economiche che resero possibile l'incidente e/o lo aggravarono.

Intendiamoci, un incidente può sempre capitare, ma qui abbiamo a che fare con una reazione per la produzione di 2,4,5-triclorofenolo, intermedio per potenti agenti tossici (come *l'agente orange*), condotta in un reattore non controllato, né da un operatore né da un sistema automatico, un reattore non dotato di una trappola per la raccolta di sottoprodotti in caso di esplosione (dispositivo invece presente in altri stabilimenti del gruppo Givaudan).

Quel giorno di luglio del 1976 la reazione fu interrotta in modo improprio, fermando solo l'agitazione e senza raffreddare; questo causò un accumulo di calore almeno nella parte alta della soluzione e favorì un processo di runaway (emissione di calore che accelera una reazione già esotermica) che, a sua volta, spostò l'equilibrio verso la produzione della forma più tossica di diossina fra le decine possibili.

Dopo alcune ore, il processo terminò con una sovrappressione tale da far scattare l'unica forma di sicurezza esistente: un diaframma che si apriva verso l'esterno e che cedette emettendo da 3 a 30 chilogrammi di diossina (dose mortale per cavie circa un microgrammo per kg di peso; non esiste un LD_{50} per l'uomo).

A questo punto consideriamo alcune aggravanti socioeconomiche.

Lo stabilimento era situato a poca distanza da un paese densamente popolato, le autorità locali non sapevano cosa si produces-



se nello stabilimento e i proprietari dello stabilimento non lo dissero, né rivelarono per giorni che cosa fosse stato emesso (anche se si capì quasi subito).

Nella fabbrica si producevano saponi e profumi, ma anche, come detto sopra, triclorofenolo in 4 cicli quotidiani, ben controllati sempre da un operatore fino a compimento. Data la richiesta di mercato del prodotto (che era usato per fare esaclorofene, una sostanza disinfettante e battericida utilizzata a quel tempo nelle formulazioni di saponi e dentifrici) i proprietari decisero di attivare un quinto ciclo, senza però dedicarvi altro personale, con il rischio che il ciclo terminasse in modo improprio, come poi avvenne. Le reazioni secondarie erano conosciute dai tecnici dell'azienda, ma in modo incompleto e senza troppa preoccupazione; la Givaudan aveva messo la produzione in Italia proprio perché le regole e i controlli erano molto più laschi che altrove.

Alla fine, Hoffman La Roche, che possedeva Givaudan, spenderà 300 miliardi di vecchie lire (circa 160 milioni di euro odierni) per chiudere la situazione a condizione di non pagare altro in futuro. Per pagare quali conseguenze?

Conseguenze Umane

Centinaia di persone, soprattutto bambini, svilupparono la cloracne, una grave dermatite causata dal contatto con la diossina, ma gli studi epidemiologici (condotti anche dall'Università degli Studi di Milano) hanno evidenziato anche un incremento dell'incidenza di tumori, malattie cardiovascolari e diabete. Si registrarono alterazioni nel rapporto tra i sessi dei neonati (con più nascite di sesso femminile) e potenziali scompensi a carico del sistema endocrino e riproduttivo. Furono eseguiti una cinquantina di aborti precauzionali, circa 800 persone furono evacuate dalle loro case e la popolazione locale subì una forte stigmatizzazione sociale, venendo etichettata come "diossinata" e affrontando per parecchi mesi discriminazioni sul lavoro e nel commercio.

Conseguenze Ambientali

Vennero colpiti da varie conseguenze ben 11 comuni della Brianza, in particolare le aree suddivise nelle zone di rischio A, B e R (Figura 1): la zona A (la più contaminata) fu completamente evacuata e recintata.

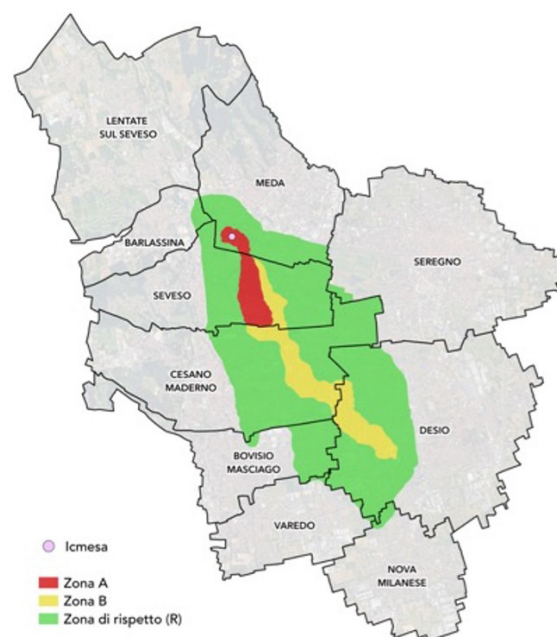


Figura 1. Mappa inquinamento di Seveso; il grosso della zona rossa era nel comune di Seveso, ma furono interessati in forma estesa almeno 7 comuni lombardi

Nei primi mesi dopo l'incidente morirono circa 3.300 animali (tra cui conigli e pollame) e ne vennero abbattuti preventivamente più di 76.000, per evitare l'ingresso della diossina nella catena alimentare. I terreni contaminati furono letteralmente eliminati: per uno strato profondo fino a 80 centimetri, la terra fu asportata, sigillata in discariche controllate e sostituita con terra fertile proveniente da zone non inquinate. Dove sorgeva l'area più colpita, oggi si trova il Bosco delle Querce, un'area verde protetta istituita per rinaturalizzare la zona dopo anni di bonifiche.

Cosa ci ha lasciato Seveso?

Oggi tutti raccontano che Seveso ha generato la direttiva europea che porta lo stesso nome (Direttiva 2012/18/UE) e che ha cambiato le questioni di sicurezza ambientale della chimica almeno in Europa e alcuni altri paesi occidentali; di conseguenza, almeno per quanto riguarda lo stadio strettamente produttivo, i rischi della chimica sono diminuiti enormemente.

Io, però, guardo ad alcuni casi recenti, come i PFAS, o alla prospettiva di introdurre nuovi composti della chimica come i MOF, che hanno vinto il Nobel 2025, o come i MXeni. Questi composti si avviano a diventare prodotti di massa (ad esempio, il CALF-20 della BASF), nonostante su di essi non ci siano studi di tossicità di lungo periodo e, allora, mi chiedo: *ma è proprio così?*

In un'intervista al Corriere della Sera del 27 febbraio 1977, Barry Commoner, uno dei fondatori dell'ecologia dichiarò:

Seveso rappresenta un momento tipico in cui il ricorso a tecnologie estremamente pericolose conduce alla tragedia, e non un semplice caso. La verità è che questo genere di tecnologie e di processi industriali operano sempre alle soglie della tragedia. ... È assolutamente indispensabile impedire che il potere decisionale spetti alle aziende o al loro management. ... adesso si discute su cosa sia accaduto a Seveso, e perché. ... se si fosse provveduto per tempo a chiedere ai veri interessati, ai lavoratori e alle loro organizzazioni, un parere specifico, sono persuaso che si sarebbe impedito il disastro ... Anche noi, scienziati, possiamo agire soltanto se l'iniziativa viene data agli interessati e non ai centri di potere.

Forse dopo tutto la verità sta più vicina a queste semplici riflessioni di senso comune che ad ampi e profondi studi tecnici.

Siti consultati

<https://epiprev.it/attualita/seveso-1976-2026-un-crimine-di-pace>

https://www.societachimica.it/sites/default/files/chimind/pdf/2004_7_28_ca.pdf

https://it.wikipedia.org/wiki/Disastro_di_Seveso

