

CnS

La Chimica nella Scuola

n. 2 anno 2023

- › Per la transizione ecologica: cosa fare e cosa non fare
- › Il duplice significato del concetto di elemento
- › Innovare la didattica: il contributo delle pedagogie e delle discipline
- › Il contributo di Thomson all'affermazione del modello atomico della materia e non solo
- › La reologia dei polimeri: qualcosa di nuovo da affrontare in classe
- › La storia della Chimica Industriale e Applicata all'Università di Palermo
- › Quasicristalli prodotti da un fulmine



Società Chimica Italiana

DIRETTORE ONORARIO

Gianluca Farinola

COMITATO EDITORIALE

Direttore: Margherita Venturi

Vice-direttori: Eleonora Aquilini, Giovanni Villani

COMITATO DI REDAZIONE

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

COMITATO SCIENTIFICO

Presidente: Luigi Campanella

Vincenzo Balzani, Agostino Casapullo, Carlo Fiorentini



ISSN: 0392-8942

REGISTRAZIONE: 03/05/1996 n. 219

presso il Tribunale di Roma.

PERIODICITÀ: Bimestrale

Indice

Editoriale

- Le domeniche dell'austerità e non solo 1
Margherita Venturi

La transizione ecologica

- La fusione nucleare: come distrarci dalle emergenze che dobbiamo affrontare 4
Margherita Venturi
- Il ruolo insostituibile del suolo nella produzione primaria e quello del sottosuolo nella transizione ecologica 8
Fabio Olmi

Metodologie didattiche per l'università

- Le molte domande sollevate dal duplice concetto di "Elemento" 19
Eric Scerri e Sergio Stoccoro
- Didattiche innovative: il contributo delle pedagogie e delle discipline 36
Carlo Cappa, Elena Ghibaudi, Francesca Tovenà, Mariano Venanzi

Percorsi storico-epistemologici per la Scuola Superiore

- Corpuscoli ed elettroni: verso un nuovo modello di reazione chimica (redox) 44
Eleonora Aquilini e Antonio Testoni

Qualcosa di nuovo da affrontare nella Scuola Superiore

- Applicazioni comuni di reologia dei polimeri. Parte I: fluidi non-Newtoniani 56
Vincenzo Villani

Keywords

- Decifrare le proteine: un fondamentale aiuto dall'Intelligenza Artificiale 62
Matteo Chioccioli
- Principi elementari di reologia dei polimeri. Parte I: fluidi non-Newtoniani 68
Vincenzo Villani

Pagine di storia

- La Chimica industriale e applicata nella Facoltà di Ingegneria dell'Università di Palermo dalle origini al 1923 74
Giuseppe Silvestri

News

- Quasicristalli prodotti da un fulmine 83
Silvano Fuso
- Progetto per realizzare un Museo Diffuso della Strumentazioni Scientifica Storica 85
Luigi Campanella

Le domeniche dell'austerità e non solo

Margherita Venturi

Cara/o lettrice/lettore,

ultimamente inizio i miei editoriali con riflessioni preoccupate per l'attuale crisi energetica, climatica e sociale. Questa volta, invece, torno indietro nel tempo, perché mi è venuto in mente che esattamente 50 anni fa l'Europa si è dovuta confrontare con la prima crisi petrolifera del dopoguerra, in pieno boom economico.

Per fare fronte all'emergenza dovuta alla riduzione della produzione di petrolio e all'embargo deciso dai governi arabi nei confronti degli stati filoisraeliani, furono imposte misure atte a contenere i consumi energetici. Crollarono le

convinzioni sull'irreversibilità dei processi di sviluppo che poggiavano sulla crescita durata ininterrottamente dalla fine della Seconda Guerra Mondiale: fu la fine della "golden age".

In Italia, il 2 dicembre 1973, cominciarono quelle che i diversamente giovani (fra i quali c'è la sottoscritta) ricordano come le "domeniche dell'austerità".

Nei giorni festivi fu vietato l'uso di auto, di moto, di barche e di aerei privati; con un'esemplare dimostrazione di democrazia nessuno fu escluso: rimasero appiedati anche i ministri e il Presidente della Repubblica.

Potevano circolare solo i mezzi pubblici, quelli di sicurezza e di soccorso, i medici e i parroci; per tutti gli altri la multa era di un milione di lire.

Per limitare i consumi energetici le città ridussero l'illuminazione pubblica del 40% (di notte era possibile accendere solo un lampione su due), i distributori di benzina restarono chiusi dalle 12 del sabato a tutta la domenica, gli uffici pubblici anticiparono la chiusura alle 17,30, ma, soprattutto, i negozi dovevano chiudere le serrande alle 19 e i locali pubblici, cinema, teatri e locali da ballo, dovevano spegnere le luci alle 23. Anche in occasione delle feste natalizie di quell'anno le luminarie furono limitate e non fu data nessuna deroga alla chiusura dei locali, neanche per l'ultimo dell'anno, che la maggioranza degli italiani trascorse a casa con parenti e amici.

Fu sicuramente un periodo di buio, ma solo nel senso stretto della parola (città oscurate, neon di bar e cinema spenti) perché tutto sommato fu un periodo "felice".

Gli italiani, infatti, accettarono di buon grado queste restrizioni, non ci furono sommosse popolari; anzi, misero a frutto l'inventiva e trovarono altre forme di divertimento. Impararono a organizzare gite di gruppo, scoprendo inaspettate amicizie con i vicini di casa a cui, fino a quel momento, avevano rivolto solo un veloce e asettico "buongiorno"; 11 milioni di biciclette, ma anche tandem, carrozzelle e pattini invasero le vie e le piazze per non rinunciare a trascorrere qualche ora di relax dopo una settimana di lavoro; le palestre si riempirono di novelli sportivi e gli stadi registrarono il tutto esaurito.



Insomma, gli italiani riscoprirono la propria città, muovendosi a piedi o con mezzi di trasporto "lenti", che permettono di guardarsi attorno con calma e in tutta sicurezza, e ritrovarono valori travolti dalla vita frenetica del boom economico, come le relazioni umane, la solidarietà e l'amicizia.

Oltre a questi aspetti decisamente positivi circoscritti al nostro paese, ci furono altri segnali molto importanti e ancora più positivi che riguardarono tutti i paesi; infatti, cominciarono a emergere preoccupazioni per il modello di progresso su cui era improntata la società, si iniziò a parlare di risparmio energetico, forse per la prima volta in chiave ecologica, e partirono le ricerche per lo sviluppo di fonti energetiche alternative.



L'austerità aveva finalmente indotto l'uomo a ravvedersi e a capire la necessità di un cambio di rotta? Niente di tutto ciò, perché a marzo del 1974 l'embargo del petrolio terminò, dall'aprile dello stesso anno le restrizioni si allentarono ovunque e la crisi energetica piano piano venne dimenticata. Forse sarebbe meglio dire rinnegata, perché l'austerità cedette il passo al consumismo e cominciarono i "favolosi" anni Ottanta, chiassosi e travolgenti.

Mi viene da dire che ancora una volta non abbiamo imparato nulla dalla storia; lo dimostra il fatto che, dopo 50 anni, stiamo di nuovo affrontando una crisi energetica, più pesante e drammatica di quella degli anni Settanta, proprio perché abbiamo perso tanto tempo prezioso per correre ai ripari. Oggi, poi, ci sono due ulteriori aggravanti: la prima ha a che fare con la politica e i politici che, per paura di perdere il consenso popolare, non hanno il coraggio di promulgare leggi chiare, precise e anche dure, come fu per l'Italia il decreto Austerità del 1973, la seconda, invece, riguarda noi e il nostro comportamento. Infatti, siamo diventati sordi a qualsiasi grido di allarme, siamo diventati ciechi di fronte alle attuali e gravi emergenze ambientali e sociali e, in nome della libertà personale, non accettiamo alcun tipo di restrizione o limitazione. In poche parole, chiusi nel nostro egoismo ci siamo dimenticati che apparteniamo tutti allo stesso genere umano, che dobbiamo vivere tutti sullo stesso pianeta e che abbiamo una responsabilità diretta su tutto quanto sta accadendo.

Penso che questa storia delle "domeniche dell'austerità" dovrebbe essere raccontata ai nostri studenti non solo perché ha molti risvolti storici, economici e di costume interessanti, ma soprattutto perché permette di riflettere su aspetti etici e sociali di grande attualità.

E così, con questo mio suggerimento, siamo finalmente approdati alla didattica, la cosa che a noi docenti sta più a cuore. Nel numero del CnS che ti accingi a leggere, come sempre, troverai

tanti altri spunti per attività o argomenti da portare in classe: dalla reologia dei polimeri all'uso dell'intelligenza artificiale per decifrare le proteine; dalla complessità del concetto di elemento al contributo di Thomson per l'affermazione del modello atomico della materia e l'interpretazione delle reazioni redox; dalle molte perplessità legate all'uso della fusione nucleare al ruolo insostituibile del suolo e del sottosuolo; dal contributo delle pedagogie e delle discipline per l'innovazione didattica alla storia della Chimica Industriale e Applicata all'Università di Palermo.

Quindi, non mi resta che augurarti buona lettura.

Alla prossima

lll agli erita

La fusione nucleare: come distrarci dalle emergenze che dobbiamo affrontare¹

Margherita Venturi

Dipartimento di Chimica "G. Ciamician" dell'Università di Bologna e Gruppo Energia per l'Italia
e-mail: margherita.venturi@unibo.it

Abstract: Recently, the idea to use the nuclear fusion for obtaining clean, safe, and inexhaustible energy and, thereby, for solving also the climate crisis, is attracting policy makers and citizens. In the present contribution, the ways to perform the fusion of deuterium and tritium (magnetic and inertial confinement) are briefly described. Then the many problems that still need to be overcome are presented and discussed. As demonstrated by the scientific reports, the nuclear fusion will fail to produce exploitable energy in a near future.

Keywords: fusione nucleare; confinamento magnetico; confinamento inerziale; deuterio; trizio; problemi aperti

Siamo in un periodo difficile per l'umanità caratterizzato da due gravi emergenze: quella energetica e quella climatica. Sono due emergenze strettamente connesse perché è ormai ampiamente dimostrato che il cambiamento climatico è la conseguenza dell'uso massiccio dei combustibili fossili. Occorre, quindi, abbandonare senza indugio questa fonte energetica e trovare soluzioni alternative. Nonostante la maggioranza della comunità scientifica sia concorde sul fatto che il ricorso alle fonti energetiche rinnovabili, in particolare fotovoltaico ed eolico, rappresenti l'unica strada da battere, purtroppo, recentemente, è tornato alla ribalta il nucleare. Non solo si vuole potenziare il nucleare da fissione, ma addirittura si sta dando l'illusione che la fusione nucleare ci darà prestissimo energia pulita, sicura e inesauribile. Allora cerchiamo di capire perché si tratta ancora di una vera e propria illusione.

Come è noto, si possono generare enormi quantità di energia non solo dalla fissione di atomi pesanti, ma anche dalla fusione di atomi leggeri, il processo che alimenta il nostro Sole. Realizzare il processo di fusione nucleare è, infatti, stato paragonato a mettere "il Sole in bottiglia"; è sicuramente una frase d'effetto, capace di colpire la fantasia del pubblico, che però nasconde cosa in realtà ciò significhi. Allora, vale la pena confrontare quello che davvero avviene nel nucleo del Sole a 150 milioni di km da noi rispetto a quanto possiamo disporre noi sulla piccola Terra che gli ruota attorno. All'interno della nostra stella c'è un plasma di protoni, che, a quattro per volta, grazie a temperatura e pressioni elevatissime (16 milioni di gradi centigradi e 500 miliardi di atmosfere) fondono per dare un nucleo di elio, con un difetto di massa tale da produrre un'enorme quantità di energia secondo la famosa formula di Einstein $E = mc^2$.

Poiché queste estreme condizioni non possono essere riprodotte, nei laboratori "terrestri", neppure in quelli più avanzati, si cerca di ovviare all'impossibile replicabilità del processo di fusione solare, imitandone solo il principio. Si ricorre, infatti, ai nuclei di due isotopi

¹ Il contributo è apparso sul sito di Energia per l'Italia (<http://www.energiaperlitalia.it>) e sul blog Chimica e Società (<https://ilblogdellasci.wordpress.com>).

dell'idrogeno – il deuterio e il trizio – che, però, non hanno alcuna voglia di fondersi perché, essendo entrambi carichi positivamente, si respingono violentemente. Tuttavia, se si riesce in qualche modo a portarli a contatto, entra in gioco una forza nucleare attrattiva che agisce solo a cortissimo raggio, ma che è molto più intensa della repulsione fra cariche uguali: i due nuclei fondono con la formazione di un nucleo di elio (He), l'espulsione di un neutrone e l'emissione di una grandissima quantità di energia che si manifesta sotto forma di calore.

Il problema, ma non l'unico, è che, al fine di “costringere” i nuclei di deuterio e trizio a scontrarsi per poi incollarsi, occorre mantenere confinato il tutto per il tempo necessario a produrre la fusione. Per ottenere ciò si utilizzano principalmente due approcci.

Uno si basa sul *confinamento magnetico* del plasma caldissimo formato dai nuclei di deuterio e trizio: un campo magnetico potentissimo generato dall'esterno costringe questi nuclei a muoversi lungo traiettorie circolari in modo che, giro dopo giro, acquistano l'energia necessaria per dare il processo di fusione. La difficoltà è che il campo magnetico deve essere intensissimo e per mantenerlo tale ci vogliono dei magneti superconduttori che devono lavorare a temperature molto basse (-268 °C).

L'altro approccio è quello basato sul *confinamento inerziale* che consiste nel bombardare con dei potentissimi impulsi laser un piccolo contenitore in cui è presente una miscela solidificata (in quanto freddissima) di deuterio e trizio: si verifica così una intensissima compressione che fa salire contestualmente la pressione e la temperatura (fino a una sessantina di milioni di gradi), tanto da innescare la fusione.

Il primo approccio è quello che si sta affrontando a Cadarache in Francia da parte di un folto gruppo di paesi, compresi USA, UE, Cina, India e Italia, noto come il progetto ITER (Figura 1): sono già stati spesi 20 miliardi di euro senza essere ancora riusciti a produrre quantità di energia maggiori di quelle utilizzate. I report scientifici dicono molto chiaramente che la strada sarà lunga e in salita, perché ogni volta che viene fatto un piccolissimo passo in avanti emergono nuovi problemi da affrontare.

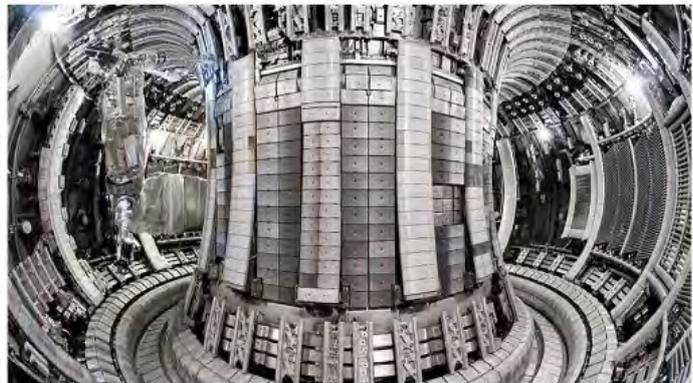
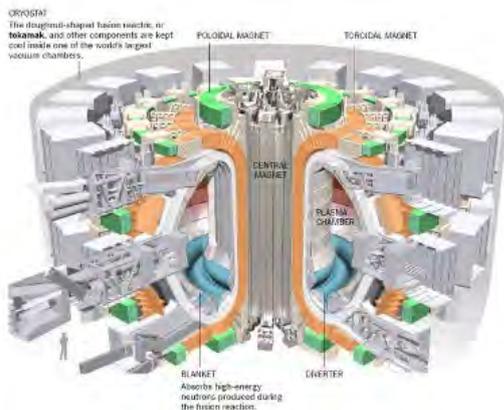


Figura 1. Il Tokamak è il cuore del progetto ITER; è infatti la macchina che utilizzando un potente campo magnetico contiene il plasma caldo formato da nuclei di deuterio e trizio che vengono accelerati in modo da acquistare l'energia necessaria alla loro fusione

Presso della National Ignition Facility (NIF) del Lawrence Livermore National Laboratory in California (USA) si sta invece studiando il secondo approccio. Il 13 dicembre dello scorso anno i giornali di tutto il mondo hanno riportato con grande enfasi che il gruppo di ricerca dell'NIF ha ottenuto un importante risultato (Figura 2): l'energia di 192 laser focalizzata su una sferetta (pellet) contenente deuterio e trizio ha indotto in pochi nanosecondi la loro fusione, generando una quantità di energia (3,15 MJ) leggermente maggiore a quella iniettata dai laser nella sferetta (2,05 MJ).

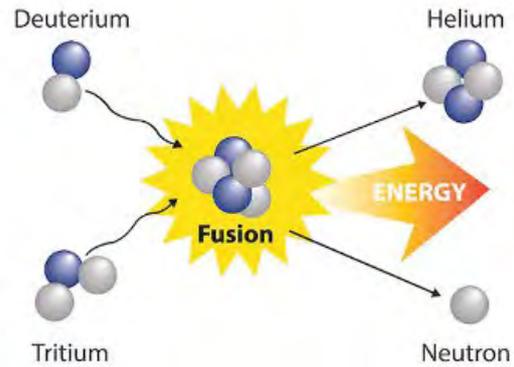
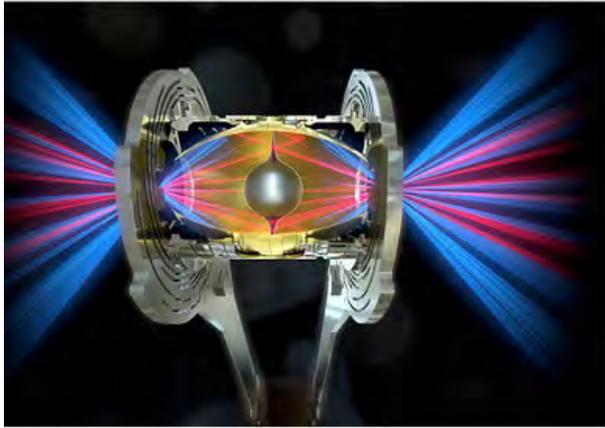


Figura 2. L'energia fornita da 192 laser viene concentrata in una sferetta contenente nuclei di deuterio e trizio inducendo la reazione di fusione

La cosa, però, passata sotto silenzio è che i 192 laser hanno consumato circa 400 MJ, ai quali va aggiunta l'energia richiesta dalle altre apparecchiature costruite e utilizzate per preparare e seguire l'esperimento. Oltre a vincere la sfida energetica (produrre più energia di quella consumata), per generare energia su scala commerciale si deve vincere un'altra sfida praticamente impossibile: modificare l'apparecchiatura per far sì che produca energia non per una piccolissima frazione di secondo, ma in modo continuo. La maggioranza degli esperti concorda sul fatto che con questo metodo così complicato è impossibile generare elettricità a costi commerciali competitivi. C'è allora il dubbio, certamente fondato, che i laboratori di ricerca, per assicurarsi gli ingentissimi finanziamenti pubblici necessari, cercano di "vendere" ai decisori e ai cittadini i risultati conseguiti come successi strepitosi e, anche, che la competizione presente da decenni tra confinamento magnetico e confinamento inerziale spinge a dimostrare di essere i più bravi. Bisogna, inoltre, sottolineare che nello sfondo c'è l'inquietante spettro militare, perché il compito primario del NIF non è quello di studiare la fusione per ottenere energia, ma di sfruttarla a fini bellici.

A parte ciò, la fusione nucleare ha molti altri *ma*.

Il primo *ma* riguarda il fatto che, indipendentemente dal modo con cui verrà ottenuto questo processo (ammesso che ci si riesca), occorre disporre dei due isotopi dell'idrogeno. Mentre il deuterio è abbastanza abbondante, il trizio è molto raro (è radioattivo e decade con un tempo di dimezzamento di soli 12 anni). Quindi, problema non da poco, ci si imbarca in un'impresa titanica sapendo già in partenza che manca la materia prima. Chi lavora nel settore dice che il trizio potrà essere ottenuto "in situ" bombardando con neutroni il litio 6, cosa che però aggiunge complessità a complessità.

Un'ulteriore *ma* è connesso alla radioattività indotta dai neutroni (prodotti assieme all'elio nella reazione di fusione) nei materiali che li assorbono, il che vuol dire che la struttura stessa del reattore diventa radioattiva e che, in fase di dismissione, crea scorie. Anche se in questo caso i tempi di decadimento degli isotopi radioattivi non sono così lunghi come quelli creati dalla fissione, è un falso in atto pubblico definire il nucleare da fusione una tecnologia pulita, perché lascia comunque il problema della difficile gestione delle scorie.

C'è poi un grosso *ma* legato al confinamento magnetico e, in particolare, al fatto che i superconduttori devono essere raffreddati a elio liquido, un gas molto raro e sicuramente non sufficiente per la gestione dei futuri reattori a fusione, dal momento che già ora sta scarseggiando. Qualcuno teme addirittura che a breve non sarà più possibile utilizzare la tecnica NMR, così importante nella ricerca scientifica e, soprattutto, in ambito diagnostico, proprio perché usa come liquido di raffreddamento l'elio.

In conclusione, la storia della fusione nucleare, dagli anni Cinquanta del secolo scorso ad oggi, dimostra che questa tecnologia non riuscirà a produrre elettricità a bassi costi e in modo attendibile in un futuro ragionevolmente vicino.

Nonostante ciò, a marzo di quest'anno, i giornali hanno riportato che ENI, per voce del suo amministratore delegato Claudio Descalzi, vuole puntare tutto sulla fusione nucleare "perché permette di ottenere energia pulita, inesauribile e sicura per tutti: una vera rivoluzione capace di superare le diseguaglianze fra le nazioni e di favorire la pace". Questa affermazione lascia alquanto perplessi dal momento che non si capisce come i paesi poveri potranno accedere a una tecnologia così sofisticata e costosa.

Descalzi ha, poi, aggiunto che nel 2025 sarà pronto un impianto pilota a confinamento magnetico in grado di ottenere elettricità dalla fusione e che nel 2030 sarà operativa la prima centrale industriale basata su questa tecnologia. Un'altra affermazione che lascia ancora più stupiti, perché sembra che all'improvviso e velocemente verranno risolti i tanti problemi incontrati dagli scienziati che lavorano nel settore da decenni: un vero miracolo! In realtà si tratta di un estremo tentativo di ENI per distrarre le persone, e in particolare i politici, dalla necessità e urgenza di abbandonare l'uso dei combustibili fossili e sviluppare le già mature ed efficienti tecnologie del fotovoltaico e dell'eolico.

Ancora una volta ENI ci vuole illudere di voler cambiar tutto, senza cambiare nulla; la sua classica strategia di mettere sotto il tappeto le emergenze che dobbiamo affrontare immediatamente, per poter continuare a estrarre e vendere combustibili fossili, senza curarsi dei gravi e ben noti problemi causati dal loro uso.

Riferimenti

- <https://www.iter.org/proj/inafewlines>
- <https://www.abc.net.au/news/science/2023-03-19/nuclear-fission-iter-experiment-france-construction/102050226>
- <https://www.science.org/content/article/fusion-breakthrough-nif-uh-not-really>
- <https://www.nature.com/articles/d41586-022-04440-7>
- <https://www.eni.com/static/it-IT/infografiche/longform-fusione-magnetica/>
- <https://www.agi.it/economia/news/2023-03-09/eni-descalzi-boston-fusione-nucleare-20431313/>
- <https://thebulletin.org/2017/04/fusion-reactors-not-what-theyre-cracked-up-to-be/>

Il ruolo insostituibile del suolo nella produzione primaria e quello del sottosuolo nella transizione ecologica

Fabio Olmi

e-mail: fabio.olmi@gmail.com

Abstract: Starting from the genesis and characteristics of the soil, the article presents the substances essential for plant nourishment and the biochemistry used by plants to perform the various functions. Concerning the underground, the mineral resources and their recycling are briefly discussed, particularly from the ecological transition viewpoint. Finally, some necessary actions to protect soil are indicated.

Keywords: il suolo; il terreno agrario; le sostanze chimiche indispensabili alle piante; il biochimismo vegetale; il sottosuolo; le risorse vegetali; la distruzione del suolo

Introduzione

Senza nulla togliere all'enorme importanza della funzione clorofilliana "celebrata" dal sottoscritto in un recente contributo,¹ dobbiamo però sottolineare che le radici delle piante affondano nel suolo e questo partecipa in vario modo al loro essenziale biochimismo complessivo.

Se è vero che il carbonio viene assunto dalle piante dall'aria attraverso la CO₂, l'acqua e molti altri composti ed elementi vengono assorbiti dal terreno. Gli elementi principali che vengono forniti alla pianta dal terreno, detti macroelementi perché entrano nel ciclo delle reazioni della pianta in maggior misura, sono l'azoto, il fosforo e il potassio. Non a caso i fertilizzanti usati per aumentare la produzione delle piante sono appunto generalmente un mixer dei tre elementi nella forma di composti assorbibili.

C'è poi una numerosa serie di altri elementi che entrano in piccole quantità nei processi chimici delle piante, un esempio fra tutti, il magnesio, che entra nella costituzione del complesso metallo-organico della clorofilla. Vediamo qui la funzione di questi elementi.

Ricordiamo che il suolo copre gran parte delle masse continentali ed è chiamato "pedosfera": si tratta di uno "strato vivente", che respira ed evolve continuamente, ove rocce, suolo, acqua e organismi viventi interagiscono, *si tratta di un ecosistema*. Le complesse interazioni che lo caratterizzano regolano l'habitat naturale e *determinano la disponibilità delle risorse che sostengono la vita*, compreso i nostri prodotti alimentari e la qualità dell'acqua (National Science Foundation).

Ma andiamo per ordine.

¹ Fabio Olmi, *La sfida del secolo, la transizione ecologica contro il riscaldamento globale*, pag. 40-54, Aracne, Roma, 2022.

Come è fatto il suolo e cosa contiene al suo interno

La figura 1² mostra come evolve il suolo nel tempo e come si presenta quando è maturo.

Il suolo è costituito da diversi *orizzonti*: la roccia alterata che inizialmente lo origina, distinta da quella inalterata del sottosuolo, con il contributo di frammenti minerali e materia organica; forma un primo orizzonte che successivamente dà origine allo strato superficiale dove possono affondare le radici delle piante: l'orizzonte A. Questo evolve ancora fino a diventare la "pelle" superficiale di un suolo maturo e ben differenziato nei vari orizzonti.

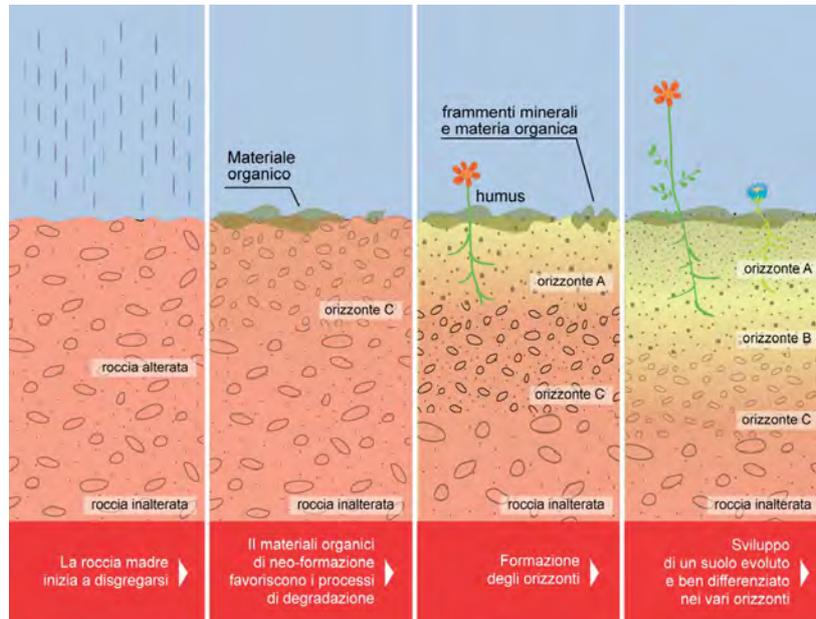


Figura 1. Evoluzione di un suolo

Il suolo costituisce, dunque, una matrice complessa caratterizzata da:

- una *fase solida*, costituita da componenti inorganici (frammenti di rocce, minerali primari e secondari, costituenti amorfi) e organici (residui vegetali e animali più o meno decomposti, biomassa, sostanze umiche);
- una *fase liquida*, acqua in cui sono contenute sostanze inorganiche e organiche o sono dispersi, in sospensione, colloidali di varia natura;
- una *fase gassosa*, di composizione analoga a quella atmosferica, con alcune differenze nelle proporzioni relative fra le diverse componenti.

I suoli possono avere composizioni chimiche e mineralogiche molto diverse tra loro e, quindi, le concentrazioni degli elementi possono variare anche di molto da zona a zona. *Come abbiamo accennato il suolo può trasferire alla matrice vegetale sia i macro- che i micro-elementi*; quello che deve essere garantito è che sia dotato di buona mobilità geochimica. Un esempio per chiarire: una stessa varietà di olivo è stata piantata in suoli diversi e l'olio ottenuto dalla spremitura delle olive ha dato sapori tra loro diversi.

Esaminiamo ora i due tipi fondamentali di componenti che costituiscono i suoli: la componente dei viventi e quella dei minerali ed elementi che rappresentano lo scheletro del suolo, senza dimenticare che il suolo contiene anche aria e acqua.

² Figura tratta da: <http://www.osservatoriovaldagri.it/web/guest/suolo-e-sottosuolo>.

I viventi presenti nel suolo

Il suolo non contiene solo minerali vitali, ma contiene, come abbiamo accennato, anche una brulicante vita. Nel suolo vive una quota, compresa fra un terzo e un quarto di tutti gli organismi viventi.³ La parte superficiale del suolo è un ecosistema complesso, dinamico e accanto a elementi minerali (particelle di sabbia, limo e argilla) contiene organismi viventi che vanno dai batteri e nematodi di dimensioni microscopiche, ai collemboli, agli acari, ai millepiedi, ai lombrichi, ai topi e le talpe.

I lombrichi sono considerati i costruttori dell'ecosistema suolo perché la loro attività è accompagnata da un continuo rivoltare il suolo modificandone la struttura. Questo lavoro comporta l'apertura di nuovi pori e anche la chiusura di vecchi con conseguente apporto di nuove fonti di nutrimento per gli altri organismi del suolo.

Secondo l'Earth Institute della Columbia University un acro (circa 4047 m²) di suolo può contenere 900 libbre (1 libbra = 0,45 kg circa) di lombrichi, 2400 libbre di funghi, 1500 libbre di batteri, 133 libbre di protozoi, 890 libbre di artropodi e alghe e anche piccoli mammiferi come topi e talpe.⁴

La maggior parte degli organismi presenti nel suolo dipende essenzialmente dalla sua struttura, cioè dai suoi *pori*, nei quali vive. *La porosità del suolo è, dunque, una caratteristica molto importante per la sopravvivenza dell'ecosistema.*

Le varie specie di viventi convivono e interagiscono tra loro: le specie possono alimentarsi le une delle altre, oppure le feci di una possono costituire il nutrimento di altre e queste interazioni sono essenziali per le funzioni del suolo.

La componente minerale del suolo

È quella componente che proviene dalla degradazione delle rocce e che costituisce oltre il 95% della parte solida di un suolo.

Le diverse frazioni si distinguono per la dimensione dei granuli che le compongono:

- scheletro (diametro dei granuli > 2 mm);
- sabbia grossolana (diametro dei granuli fra 2 e 0,2 mm);
- sabbia fine (diametro dei granuli fra 0,2 e 0,02 mm);
- limo (diametro dei granuli fra 0,02 mm e 2 μ);
- argille (diametro dei granuli < 2 μ).

I granuli lasciano normalmente tra loro una serie di pori che hanno, come abbiamo visto, una grande importanza per l'ecosistema suolo poiché contengono aria, acqua e organismi viventi.

Quali sono gli elementi nutritivi delle piante?

Abbiamo già accennato che si tratta di due categorie, i macronutrienti e i micronutrienti. I macronutrienti sono presenti in quantità maggiore dello 0,01%, mentre i micronutrienti hanno quantità inferiori allo 0,01%.

In particolare, i macronutrienti sono: carbonio, idrogeno, ossigeno, azoto, fosforo, potassio, zolfo, calcio, magnesio e cloro; i micronutrienti, invece, sono: ferro, manganese, zinco, rame, boro e molibdeno.⁵ Mentre carbonio, ossigeno e idrogeno non costituiscono fattori limitanti per la vita delle piante, perché sono disponibili abbondantemente nell'atmosfera e nella litosfera (come CO₂ e H₂O), i restanti macro- e micro-elementi, dopo una coltivazione di una qualsiasi specie di piante, devono essere integrati per mezzo della fertilizzazione. Se la fertilizzazione avviene usando i fertilizzanti di sintesi, N, P e K sono gli elementi fondamentali dei fertilizzanti

³ <https://www.eea.europa.eu/it/segnali/segnali-2019/articoli/intervista-2013-il-suolo-un>.

⁴ Jeremy Rifkin, *L'età della resilienza*, Mondadori, 2022, pag.95.

⁵ <https://www.unmaco.it/2019/08/carenze-nutritive-nelle-piante-sintomi/>.

in commercio, come vedremo più avanti; invece, per quanto riguarda gli altri elementi ci sono appositi prodotti commerciali liquidi o in polvere che vengono usati come integratori.

La parte superficiale del suolo, che viene lavorata per la successiva messa a dimora di semi o piantine, costituisce quello che viene chiamato *terreno agrario*.

L'assorbimento degli elementi nutritivi da parte delle piante dipende da diverse variabili:

- capacità di assorbimento delle radici;
- caratteristiche fisiche del terreno come tessitura e struttura;
- caratteristiche chimiche del terreno come presenza di elementi minerali e valore del suo pH;
- grado di umidità del suolo;
- caratteristiche biologiche del terreno come tasso di sostanza organica viva e livello di fertilità.

Particolarmente importante è il pH del terreno, perché la maggior parte degli elementi nutrienti risulta disponibile a pH compreso tra 6,5 e 7, poco acido o neutro. Un pH alcalino condiziona la disponibilità di calcio e fosforo, un pH acido favorisce un eccesso di elementi tossici come l'alluminio.

Funzione di alcuni elementi nutritivi

È molto interessante osservare che la ricerca biochimica ha individuato la funzione che gli elementi nutritivi svolgono all'interno delle piante; qui ci occuperemo solo di alcuni esempi.

1. *Fosforo*: costituisce la componente fondamentale di alcune molecole biologiche come acidi nucleici, nucleotidi, fosfolipidi delle membrane cellulari e nucleotidi fosfati essenziali per la conservazione e il rilascio dell'energia per tutti i processi metabolici cellulari; è fondamentale per la fase di sviluppo degli apparati radicali, per la fioritura e per lo sviluppo dei frutti.
2. *Potassio*: svolge numerose funzioni; è contro-ione per il trasporto di vari anioni come quello nitrato, regola il turgore cellulare, l'apertura e la chiusura degli stomi per la respirazione delle piante e ha un ruolo essenziale nella sintesi proteica.
3. *Magnesio*: è il costituente strutturale fondamentale della molecola della clorofilla, responsabile del colore verde delle foglie; ha diverse funzioni nel trasporto cellulare, regolatore del pH e cofattore di enzimi importanti; è immagazzinato come sostanza di riserva nei semi sotto forma di fitato di magnesio.
4. *Molibdeno*: è fondamentale per la fissazione dell'azoto atmosferico da parte dei batteri simbiotici delle leguminose e cofattore enzimatico; in alcune piante, come la soia, aiuta la resa produttiva in semi e frutti.
5. *Rame*: è cofattore enzimatico e svolge un ruolo importante nella sintesi della lignina.
6. *Zolfo*: si tratta di un importante componente degli aminoacidi solforati e delle proteine; ha un ruolo essenziale nella sintesi proteica e come cofattore enzimatico.

La fertilizzazione del terreno

Per il nutrimento delle piante è importante soprattutto la naturale dotazione del terreno in materia organica. Come abbiamo già sottolineato, gli elementi più importanti sono carbonio, azoto e fosforo,⁶ che costituiscono la base della rete alimentare delle piante. Per poter essere utilizzati dalle piante i composti organici contenuti nelle foglie o nei rami morti devono essere disgregati in composti più semplici dagli organismi che vivono nel suolo. Con un lungo processo in più fasi, i diversi organismi decompongono foglie e rami morti trasformandoli in composti inorganici che possono essere assorbiti e utilizzati dalle piante. Circa il 90% delle foglie morte viene frammentato

⁶ Gli apporti di carbonio al suolo sono tutti di origine organica; i batteri del suolo trasformano poi l'azoto atmosferico in azoto minerale, di fondamentale importanza nella crescita delle piante.

da millepiedi, lombrichi e onischi. *Il ciclo dei nutrienti è di importanza cruciale per la produzione di cibo e fibra, ma ci sono anche importanti legami con il ciclo dell'acqua.*

Ora, quando a un terreno coltivato vengono asportate le piante che ha prodotto, il corredo naturale degli elementi presenti nel terreno viene impoverito e, per ripristinare la sua fertilità, come abbiamo già accennato, *è necessaria la fertilizzazione per poter successivamente impiegarlo in nuove coltivazioni.*

La fertilizzazione può essere compiuta con la *concimazione naturale del terreno*: si tratta di concimare il terreno con letame maturo (lo stallatico). Questo fornisce al terreno tutte le sostanze nutritive necessarie alle piante, in particolare i macroelementi azoto, fosforo e potassio e migliora la struttura del terreno, lo rende più morbido e facilita la sua coltivazione. In alternativa al letame si può ricorrere, ad esempio nel caso degli orti, al compost (Figura 2), cioè al prodotto del riciclaggio dei rifiuti organici lasciati a sé, o prodotto industrialmente in grandi quantità.

Un tipo di fertilizzazione naturale che sta tornando all'attenzione degli agricoltori è la pratica del *sovescio*. Si tratta di una pratica antica quanto l'agricoltura ed è *fondamentale per migliorare la fertilità chimica, fisica e biologica di un terreno, soprattutto con limitata disponibilità di concimi organici*. Di cosa si tratta? Consiste nel coltivare piante destinate ad essere trinciate e interrate quando si trovano al loro massimo rigoglio, per svolgere la funzione di "concimazione verde". Tutta la biomassa interrata nei primi strati di terreno viene gradualmente decomposta e mineralizzata dai microrganismi del terreno, che in questo modo ricevono abbondante nutrimento e si moltiplicano.

Il sovescio costituisce sicuramente un *eccellente apporto di sostanza organica* al terreno, soprattutto quando non è possibile avere letame e quando il compost non è sufficiente per ammendare tutta la superficie disponibile.



Figura 2. Compost

Nel caso in cui non sia possibile ricorrere alla concimazione naturale del terreno, si impiegano i concimi di sintesi, ad esempio quelli ternari che contengono al loro interno una porzione bilanciata di azoto, fosforo e potassio; sono indicati con NPK e consentono con un unico passaggio sul terreno di fornire alle coltivazioni l'apporto necessario dei tre elementi.

Naturalmente l'impiego dei fertilizzanti di sintesi (oltre a quelli indicati si impiega anche urea e il nitrato di ammonio) dipende dalla natura del terreno e dal tipo di colture che si vuol impiantare. *È importante dunque disporre di un'analisi appropriata del terreno per razionalizzare la sua concimazione e conoscere le esigenze nutritive delle piante che si intendono coltivare.*

Un altro fattore da tener ben presente nella fertilizzazione del terreno è *quando effettuarla.*

In generale la fertilizzazione va fatta a fine inverno, prima della ripresa vegetativa della pianta. Ogni pianta ha bisogno, però, del fertilizzante specifico e alcuni fertilizzanti agiscono in modo quasi immediato, altri hanno invece un'azione lenta e graduale. Il concime in granuli si scioglie lentamente e il suo effetto dura circa 3 - 4 mesi.

Ad esempio, come si fertilizza un oliveto? Per la concimazione di produzione, in autunno si deve somministrare potassio e fosforo e, tra fine inverno e metà primavera, si deve somministrare azoto. La concimazione azotata dovrebbe essere frazionata in due-tre periodi. I concimi contenenti fosforo e potassio possono essere usati anche una sola volta all'anno. Solitamente vengono forniti prima della ripresa vegetativa, assieme alla concimazione azotata, utilizzando i concimi ternari NPK.⁷

Preparazione del terreno per la coltura

La preparazione del terreno per impiantare una qualsiasi coltura riguarda la *lavorazione del terreno* in modo da ottenere un sottofondo adatto alla coltivazione attraverso:

- 1 il controllo della flora infestante;
- 2 l'aratura del terreno che fornisce a questo l'ossigenazione e il ripristino della porosità;
- 3 erpicatura (erpice a dischi) per rendere la sua superficie uniforme;
- 3b la fertilizzazione del suolo (può essere fatta con l'erpicatura);
- 4 il riequilibrio dell'attività microbica.

Le modalità di coltivazione di un terreno dipendono dalle colture che si intendono impiantare. Tre sono i tipi essenziali di impianto: la semina (grano, mais, ecc.), il trapianto di piantine (ortaggi di vario tipo) e, infine, la piantagione di piantine singole (per i frutti come, ad esempio, barbatelle per le viti, piantine di piccoli ciliegi, olivi, ecc.).

Mentre la semina e il trapianto in pieno campo si eseguono a macchina (Figura 3, sinistra), ad esempio le barbatelle di vite vanno piantate manualmente, una ad una nel terreno opportunamente preparato (Figura 3, destra).



Figura 3. Macchina trapiantatrice (sinistra) e barbatelle di vite (destra)

Ogni coltura ha bisogno di un terreno specifico. Consideriamo, ad esempio, la semina di un cereale. Preparare il suolo alla semina è un'operazione che viene ripetuta ogni anno e spesso più volte durante il corso dell'anno. Se, invece, il terreno è abbandonato e lasciato incolto da tempo, le cose si complicano.⁸

Nel primo caso l'operazione iniziale da compiere è quella di rimuovere le erbe infestanti; se il terreno è stato coltivato nella stagione precedente, non saranno molte e si può procedere con la lavorazione di fondo.

Questa lavorazione consiste in un'aratura (coltratura) e porta al rivoltamento delle zolle dello strato superficiale del terreno. Si esegue ad una profondità di circa 25-30 centimetri.

⁷ Come concimare il proprio oliveto in tre fasi-fertilizzare: <https://agronotizie.imaginenetwork.com>.

⁸ <https://www.ortosemplice.it>.

Le zolle che si ottengono con questa prima lavorazione devono essere frantumate con l'erpicoltura che va eseguita con una macchina frangizolle, generalmente a dischi statici o rotanti, trainata da un trattore. Segue, quindi, la fertilizzazione che però è più conveniente realizzare con apposite macchine che, mentre procedono all'erpicoltura (spianatura e sminuzzamento del terreno), interrano anche il concime in modo uniforme nel terreno.

A questo punto il terreno è pronto per la semina ma, per ottenere un ulteriore affinamento della superficie e una leggera ricopertura del seme, si usano seminatrici dotate di un rullo apposito che compiono entrambe le operazioni.

Il sottosuolo

Lo strato roccioso profondo del suolo è un vero e proprio tesoro perché racchiude quegli elementi così importanti per le più diverse industrie.

Le ricchezze del sottosuolo, com'è noto, hanno avuto origine in ere geologiche remote e non sono distribuite in modo omogeneo sul nostro pianeta dal momento che si trovano in giacimenti di minerali spesso molto distanti l'uno dall'altro, creando paesi ricchi di risorse minerali e paesi poveri come l'Italia.

Con le risorse minerarie, in generale, siamo messi assai male: non possiamo continuare a dilapidarle come abbiamo fatto finora, anche se stiamo attraversando un periodo di *trasformazione ecologica*, come la chiama il prof. Armaroli in un suo recente libro,⁹ che ci induce ad usare sempre di più vari minerali per la costruzione delle apparecchiature che utilizziamo diffusamente e quotidianamente. Allora come usciamo da questo gap? Non c'è che una strada, in particolare per un Paese come il nostro: *riciclare*.

Dobbiamo tener presente che un risultato quantitativamente significativo di riciclo si potrà ottenere per il litio ed altri elementi, solo quando, ad esempio, le batterie delle macchine elettriche avranno raggiunto una diffusione sufficientemente ampia. Il riciclo poi non arriva mai al recupero del 100% della materia impiegata nel manufatto dismesso, ma si può sempre cercare di migliorarne la resa.

Il riciclo, inoltre, non sarà sufficiente a coprire per intero i fabbisogni necessari di minerali per nuove apparecchiature perché "bloccati" e, quindi, non riciclabili: ad esempio, non tutto il ferro impiegato in manufatti è recuperabile dal momento che è in parte utilizzato in strutture stabili e permanenti come le rotaie ferroviarie, i ponti di molte città, ecc. Quindi, le estrazioni di nuovi minerali non potranno essere azzerate, ma andranno ridotte al minimo per potervi attingere più tempo possibile.

Tornando alla distribuzione mondiale delle risorse minerarie, tre soli Stati (USA, Canada e Sudafrica) detengono l'80% delle riserve di minerali accertate. USA, Russia, Australia e Canada sono insieme grandi produttori e grandi consumatori. L'Europa Occidentale e il Giappone sono grandi consumatori anche se hanno scarse riserve di materie prime. Molti Paesi in via di sviluppo dell'Africa (Repubblica Democratica del Congo, Nigeria, Gabon, Guinea, Namibia) dell'Asia (Indonesia, Malaysia) e dell'America Latina (Brasile, Bolivia, Perù) sono esportatori di minerali.

Le riserve minerarie sono distribuite per tipologia come segue.

- *Minerali ferrosi metallici*: magnetite, ematite, pirite, si trovano principalmente in Canada, USA, Russia, Cina, Brasile, Venezuela, India e Australia; per quanto riguarda l'Europa provengono soprattutto da Svezia, Spagna, Francia, Gran Bretagna e Austria (Figura 4).¹⁰

⁹ Nicola Armaroli, *Un mondo in crisi*, Dedalo, 2022.

¹⁰ La miniera di Kiruna in Svezia è la più grande miniera di ferro del mondo la cui l'attività estrattiva oggi si svolge tra i 750 e i 1100 metri di profondità; è situata a circa 140 chilometri a nord del Circolo Polare Artico e molto vicina alla città di Kiruna che viene gradualmente spostata a favore della miniera.

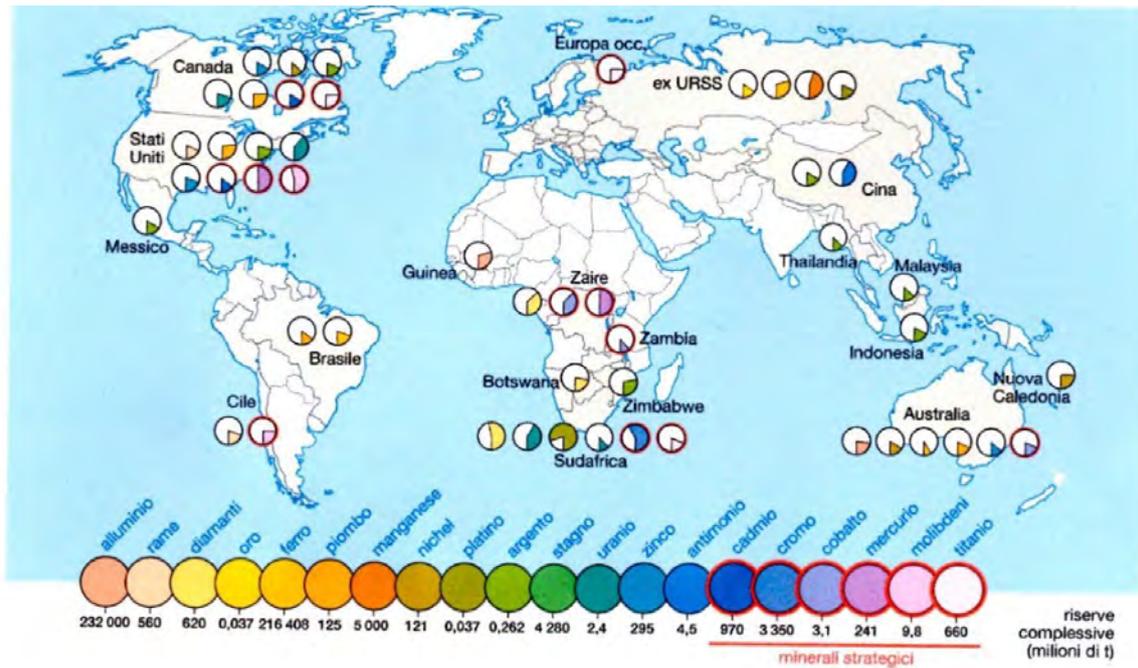


Figura 4. Distribuzione dei giacimenti minerali nel mondo

- *Minerali metallici non ferrosi*: rame, alluminio, stagno, piombo e zinco sono localizzati fondamentalmente in Canada, USA, Messico, Cile, Perù, Russia, Cina, Africa.
- *Metalli impiegati in leghe di acciai speciali*: manganese, cobalto, titanio e tungsteno provengono principalmente da Cina, USA, Congo, Sudafrica, Russia e Canada.
- *Metalli preziosi*: oro, argento e platino si trovano soprattutto in Sudafrica, USA, Cina, Canada, Russia, Perù e Messico.
- *L'uranio costituisce un caso particolare*: nel mondo si producono (2020) 53.498 tonnellate di minerale d'uranio e i Paesi più ricchi di questo minerale sono il Kazakistan, il Canada e l'Australia.

Concludendo, visto che le miniere sono esauribili, se vogliamo proseguire le nostre attività di costruzione di apparecchiature, la trasformazione ecologica dovrà spingere sempre più ad *attuare il riciclo dei minerali*, in modo da rendere sempre meno importante il ricorso alle risorse minerarie naturali.

Nella transizione ecologica dobbiamo curare anche il suolo

L'International Soil Reference and Information Center sostiene che il suolo è una risorsa naturale minacciata. La formazione del suolo è un processo estremamente lento: occorrono da cinquecento a mille anni o più per creare un paio di centimetri di soprassuolo. Per questi motivi *il suolo è considerato una risorsa non rinnovabile*: una volta distrutto, è perduto.

La sua degradazione o addirittura la sua scomparsa, può essere invece molto rapida e le ragioni di questo sono molte: in primo luogo la deforestazione,¹¹ l'agricoltura estensiva ad alta tecnologia, il pascolo del bestiame, le attività estrattive e soprattutto la sua copertura per costruire strade, abitazioni, industrie.

¹¹ La deforestazione selvaggia che interessa soprattutto la foresta amazzonica, ma anche altre foreste tropicali, ha come scopo, secondo la Union of Concerned Scientists, la creazione di spazi sempre maggiori da destinare all'allevamento del bestiame, alla coltivazione di soia, alla produzione di olio di palma e al commercio del legname. Si tratta dunque di un doppio effetto negativo: da una parte si impoverisce la componente che cattura la CO₂ e ci regala O₂ e, dall'altra, si sfruttano fino a esaurimento i terreni ottenuti per alimentare un'economia distorta.

È dunque essenziale che vengano messi in atto criteri di protezione che prevengano il degrado del suolo: promuovere un'agricoltura più razionale, non solo tesa a incrementare i raccolti, ridurre drasticamente la deforestazione, limitare gli allevamenti bovini con consumo generale di minor quantità di carne e, infine, limitare il più possibile la progressiva, dirimpente ricopertura dei suoli per la costruzione di nuove strade, di nuove abitazioni, ecc.

Che ruolo svolge nel PNRR il suolo? Si tratta purtroppo di un ruolo del tutto marginale, perché non vengono affrontati i problemi di una sua corretta gestione. Nelle 373 pagine del PNRR, il suolo viene nominato appena 14 volte e viene considerato solo un elemento su cui poggiare impianti green per la produzione energetica.¹²

Il degrado del suolo nel nostro Paese

In occasione della Giornata Mondiale del Suolo, che ricorre il 5 dicembre di ogni anno, il WWF ha comunicato che nel 2022 *l'Italia ha perduto 2 metri quadri al secondo di suolo*:¹³ 21500 chilometri quadrati di suolo italiano sono stati cementificati e solo gli edifici occupano 5400 chilometri quadrati, una superficie pari alla Liguria. Il suolo perso in Italia dal 2012 ad oggi avrebbe garantito l'infiltrazione di oltre 360 milioni di metri cubi d'acqua piovana che, restando sulle superfici impermeabilizzate da asfalto e cemento, non sono state disponibili per la ricarica delle falde, mentre hanno gravi problemi per il loro smaltimento.

La pericolosità idraulica del nostro territorio dal 2000 al 2019 ha provocato 438 morti. Il Presidente del WWF Italia ha dichiarato "Oltre il 16% del territorio italiano si trova in aree ad elevato rischio idrogeologico e sono circa 6 milioni le persone interessate. Per non ripetere altri drammi come quello di Ischia del 2022, l'ultima cosa da fare è continuare a costruire. Invece nel 2021 abbiamo raggiunto il picco della cementificazione del territorio degli ultimi 10 anni". Il WWF e Legambiente chiedono che venga approvata una legge contro il consumo di suolo.

Estremamente interessante è quello che emerge dal Rapporto ISPRA 2021 sul dissesto idrogeologico in Italia.¹⁴ In esso vengono esaminati il rischio frane e quello di alluvioni, i cui dati essenziali sono riportati in Tabella 1.

¹² <http://www.salviamoilpaesaggio.it/blog/2021/04/la-transizione-ecologica-del-pnrr-si-e-scordata-del-suolo-e-del-paesaggio/>.

¹³ https://www.ansa.it/ansa2030/notizie/green_blue/2022/12/04/giornata-del-suolo-in-italia-persi-2-metri-quadri-al-secondo_0467f673-d0c7-42a0-95c6-7dacff044388.html.

¹⁴ <https://idrogeo.isprambiente.it/app/>.

Italia

Popolazione a rischio
Frane: 1.303.666 ab.

Alluvioni: 6.818.375 ab.

Dati di Contesto

302.068,25 km²

Territorio

4.806.014

Imprese

14.515.795

Edifici

213.360

Beni culturali

59.433.744

Popolazione

24.611.766

Famiglie

14%

Giovani (0-14)

65,2%

Adulti (15-64)

20,8%

Anziani (65+)

Pericolosità e rischio

Frane	Territorio	Popolazione	Famiglie	Edifici	Imprese	Beni culturali
Molto Elevata P4	9.494,84 (3,1%)	499.749 (0,8%)	206.968 (0,8%)	223.065 (1,5%)	31.244 (0,7%)	5.351 (2,5%)
Elevata P3	16.890,64 (5,6%)	803.917 (1,4%)	340.926 (1,4%)	342.483 (2,4%)	53.197 (1,1%)	7.182 (3,4%)
Media P2	14.551,49 (4,8%)	1.720.208 (2,9%)	727.315 (3%)	562.800 (3,9%)	127.356 (2,7%)	10.728 (5%)
Moderata P1	12.555,87 (4,2%)	2.006.643 (3,4%)	844.536 (3,4%)	522.206 (3,6%)	147.766 (3,1%)	12.390 (5,8%)
Aree Attenzione AA	6.987,67 (2,3%)	676.948 (1,1%)	271.208 (1,1%)	216.540 (1,5%)	45.677 (1%)	2.502 (1,2%)
P4 + P3	26.385,48 (8,7%)	1.303.666 (2,2%)	547.894 (2,2%)	565.548 (3,9%)	84.441 (1,8%)	12.533 (5,9%)

Alluvioni	Territorio	Popolazione	Famiglie	Edifici	Imprese	Beni culturali
Elevata	16.223,87 (5,4%)	2.431.847 (4,1%)	1.018.444 (4,1%)	623.192 (4,3%)	225.874 (4,7%)	16.025 (7,5%)
Media	30.195,63 (10%)	6.818.375 (11,5%)	2.901.616 (11,8%)	1.549.759 (10,7%)	642.979 (13,4%)	33.887 (15,9%)
Bassa	42.375,68 (14%)	12.257.427 (20,6%)	5.226.748 (21,2%)	2.703.030 (18,6%)	1.149.340 (23,9%)	49.903 (23,4%)

* Le mosaicature nazionali della pericolosità da frana e idraulica sono realizzate dall'ISPRA sulla base dei dati forniti dalle Autorità di Bacino Distrettuali. I dati relativi ai tre scenari di pericolosità idraulica (D.Lgs .49/2010) non vanno sommati; lo scenario di pericolosità bassa rappresenta lo scenario massimo atteso ovvero la massima estensione delle aree inondabili.

Fonte dati: [Rapporto ISPRA 2021 su Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio](#)

Tabella 1. Il suolo italiano, rischio di frane e alluvioni (tratto da: Rapporto ISPRA 2021 sul Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio)

Un po' di storia per concludere

Particolarmente interessante è la storia del tungsteno o wolframio, da “fior di pesco” a metallo essenziale per la guerra.¹⁵ La parola “tungsteno” proviene dallo svedese *tung sten* che significa “pietra pesante”. Questo elemento si trova in natura principalmente come wolframato nel minerale *wolframite*, miscela isomorfa di $FeWO_4$ e $MnWO_4$ e nella *sheelite* come $CaWO_4$.

Il wolframio, o meglio il suo ossido, fu riconosciuto per la prima volta da Scheele nel 1781 nella sheelite. Poco dopo (1783) due fratelli chimici spagnoli, Juan José e Fausto Delhuyar, riconobbero che lo stesso elemento è contenuto nella wolframite. Dal nome dei due minerali in cui si trova, il metallo assunse il nome di wolframio (da cui il simbolo W) e tungsteno.

Prima della scoperta di Scheele un artigiano cinese aveva realizzato vasi di porcellana per l'imperatore di un colore straordinario che fu chiamato “fiore di pesco”. La composizione del colorante rimase un enigma fino al XX secolo, quando, il chimico tedesco Grunfeld dimostrò che si trattava di un composto di tungsteno, l'acido tungstico.

¹⁵ Tratto da: Alessandro Giraud, Storia straordinaria delle materie prime, Torino Editore, 2019, pp. 220-224.

Nel 1857 l'inglese Robert Forester Mushet depositò un brevetto di una lega di ferro contenente il 7% di tungsteno che ebbe un notevole successo. Fu però all'Esposizione Universale di Parigi, nel 1900, che gli acciai speciali al tungsteno riscossero un grande successo. Il wolframio, grazie al suo altissimo punto di fusione (3422 °C), il più alto di tutti i metalli, nel 1909 entrò nella produzione dei filamenti per lampade elettriche.

Nel 1914 i servizi segreti degli Alleati stimarono che lo sforzo bellico della Germania potesse durare pochi mesi per il blocco delle risorse di metalli di base. Tuttavia, Krupp, prima della guerra, aveva stoccato una gran quantità di metalli, tra i quali il wolframio, per la fabbricazione di granate. Lo stesso fecero gli industriali americani. Il chimico cino-americano K.C. Li, scoprì giacimenti di wolframio in Cina e questa diventò l'Eldorado del "prezioso" minerale.

Nel 1936 il Terzo Reich, in previsione di un possibile conflitto mondiale, importò il 35% della produzione internazionale di wolframio e quasi il 40% nel 1938. L'invasione dell'Unione Sovietica, nel giugno del 1941, ridusse drasticamente le importazioni tedesche dall'Asia e la Germania si rivolse allora al Portogallo con il quale stabilì un accordo per l'importazione del wolframio. A partire dal 1942 Franco, presidente del governo spagnolo, si rese conto che il metallo, di cui anche la Spagna era buon produttore, era fondamentale e strategico per la Germania. Il wolframio subì un forte rialzo di prezzo e allora, per correre ai ripari, gli ingegneri tedeschi, verso la fine d 1942, riuscirono a fabbricare proiettili perforanti senza utilizzare il wolframio.

Ma il metallo continuò ad essere essenziale "per la vittoria" (Kriegsentsheidend). Hitler ordinò all'artiglieria, ai carri armati e alla Kriegsmarine di utilizzare proiettili perforanti solo in casi specifici. Nel 1943 Berlino acquistò circa il 35% della produzione totale spagnola che era molto cresciuta rispetto al 1942. Nel gennaio 1944 l'ambasciatore inglese, Samuel Hoare, incontrò Franco perché sospendesse le esportazioni di tungsteno verso la Germania, ma il tentativo non riuscì e solo dopo un embargo sul petrolio verso la Spagna, Madrid accettò di ridurre le esportazioni alla Germania.

Anche dopo la guerra, il wolframio continuò e continua ad essere molto richiesto dall'industria militare e civile per le sue qualità particolari. Oggi la Cina costituisce il principale produttore mondiale.

Le molte domande sollevate dal duplice concetto di “Elemento”

Eric R. Scerri^a e Sergio Stoccoro^b

^aChemistry & Biochemistry Department, UCLA, USA; ^bDipartimento di Scienze Chimiche,
Fisiche, Matematiche e Naturali dell'Università di Sassari
e-mail: stoccoro@uniss.it

Abstract: This contribution takes up some problems exposed in the first chapter of the book *“What is a Chemical Element?”*, edited by Eric Scerri and Elena Ghibaudi, and published in 2020 by the Oxford University Press. It concerns a series of still open questions relating to chemical elements starting from the double meaning of the term “element”, which goes back to Lavoisier who identified the element with the simple substance and Mendeleev who considered the element as something present in simple substances and compounds but not detectable by our senses. These two meanings were later highlighted by Paneth in his double definition of simple substance and basic substance respectively. Paneth argued that these two meanings must remain separate if the fundamental principle of chemistry that elements persist in their compounds is to be affirmed.

Unfortunately, IUPAC admits the double definition of element, thus fostering conceptual confusion between simple substance and element, which must necessarily be recognized a formal character expressed by its symbol and atomic number (which replaced Mendeleev's atomic weight after the discovery of isotopes).

Chemists know how handle these double meanings of element, but this is not the case for students who encounter difficulties. We sincerely hope that these may help readers to better understand this concept, also considering that this problem is usually overlooked in textbooks who often speak of elements as simple substances with all their macroscopic properties, not present in their compounds, to the detriment of the more important formal meaning that underlie the periodic table.

Keywords: elemento chimico; elemento astratto; sostanza semplice; sostanza di base

Premessa

Nel 2020 la Oxford University Press pubblica il libro *“What is a Chemical Element?”*, una raccolta di 14 articoli sul concetto di elemento chimico a cura di Eric Scerri ed Elena Ghibaudi. La domanda che si pone il libro deriva dal fatto che, nonostante la definizione di elemento sia un tema ampiamente dibattuto da chimici, filosofi della chimica, storici della chimica e docenti di chimica, ad oggi non c'è ancora un accordo.

Questo contributo riprende alcune problematiche esposte nel primo capitolo del libro: si tratta di questioni aperte relative al duplice significato del termine “elemento” che nasce con Lavoisier e Mendeleev.

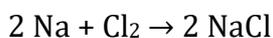
Introduzione

Sulla questione concettuale di elemento chimico potrebbe nascere una sfida tra il chimico e il filosofo della chimica, che potrebbe risultare vincitore evidenziando i limiti di una visione positivista della chimica, prevalente ma non dichiarata. Per superare alcuni ostacoli il filosofo della chimica comincia a informare il chimico sulla duplice natura del concetto di elemento: da un lato elemento è la sostanza familiare, l'ultimo stadio della decomposizione chimica (Lavoisier); dall'altro è un portatore astratto di proprietà, privo di per sé di proprietà chimiche (cosa abbastanza strana per il chimico).

Il filosofo deve cercare di spiegare meglio tale concetto al chimico, ricorrendo a esempi. Quando si indica un elemento particolare della Tavola Periodica, ad esempio il carbonio, non si intende nessun particolare allotropo, sia esso grafite o diamante o anche fullerene. Il chimico capisce subito che ci si sta riferendo agli allotropi e non alla nozione astratta o più generale di carbonio, cioè il significato filosofico di elemento. A questo punto il chimico potrebbe iniziare a prestare più attenzione, contrariamente alla sua consueta abitudine di pensare che i filosofi della chimica non sono d'aiuto alla comprensione scientifica. Utilizzando sempre il carbonio come esempio, il filosofo della chimica chiede al collega se parlando di ^{12}C , ^{13}C o ^{14}C ci riferiamo all'elemento carbonio della Tavola Periodica. Ciò a cui si fa riferimento è qualcosa come un atomo medio dell'elemento carbonio e non un particolare isotopo.¹

A questo punto il chimico sarebbe portato a concordare su tutto quanto affermato dal filosofo, concludendone però che ciò non giustifica il pensare all'elemento chimico in senso astratto. È colpa della Tavola Periodica se gli allotropi e gli isotopi non sono in essa contemplati.

Per cercare di convincere il chimico della necessità di una concezione astratta di elemento, il filosofo della chimica considera allora la reazione tra sodio (metallo velenoso) e cloro (gas velenoso) che genera cloruro di sodio (sostanza non velenosa, ma anzi essenziale per la vita):



Dove sono presenti, nel cloruro di sodio, il metallo sodio e il gas cloro? Di sicuro non come sostanze elementari, quindi sarebbe meglio pensare all'elemento in senso astratto. Il chimico potrebbe però obiettare, appellandosi a una spiegazione ultra-microscopica, dicendo che sodio e cloro sono presenti come ioni. In genere, i chimici sono completamente ignari del duplice significato di elemento, nonostante se ne siano interessati chimici come Mendeleev, Urbain e Paneth, le cui opinioni sono considerate antiquate dai chimici contemporanei. Malgrado questo rifiuto, molti chimici ammettono di essere turbati dall'attuale definizione di "elemento" presente nel Gold Book.

Il significato di elemento secondo il Gold Book della IUPAC

Il Gold Book pubblicato dalla IUPAC (Unione Internazionale di Chimica Pura e Applicata) contiene una grande quantità di informazioni su nomenclatura e definizioni, soprattutto di chimica inorganica.² Alla voce *elemento* si trova:

- una specie di atomi; tutti gli atomi con lo stesso numero di protoni nel nucleo atomico;
- una sostanza chimica pura composta da atomi con lo stesso numero di protoni nel nucleo atomico. Talvolta questo concetto è chiamato sostanza elementare distinta dall'elemento chimico definito sopra, ma per lo più il termine elemento chimico è usato per entrambi i concetti.

La definizione assume una duplice forma: la prima parte richiede pochi chiarimenti e sembra essere un semplice richiamo ai componenti microscopici così da poter identificare qualsiasi specifico elemento mediante il numero atomico, come introdotto da Van den Broek e da Moseley nei primi anni del Novecento.³ La seconda parte della definizione è molto più problematica: il riferimento a una sostanza pura sembrerebbe riferirsi a campioni macroscopici di elementi come sostanze semplici, in possesso di proprietà come il colore, il punto di fusione e così via. Tuttavia, questo apparente richiamo a sostanze semplici è subito collegato in modo disagevole

¹ Il peso atomico della maggior parte degli elementi, come rappresentato su qualsiasi Tavola Periodica, è una media ponderata dei pesi secondo le abbondanze naturali dei vari isotopi di ciascun elemento. Eccezioni a questo stato di cose includono gli elementi mono-isotopici come fluoro, manganese e oro.

² Gold Book della IUPAC, s. v. "element" (<https://goldbook.iupac.org/html/C/C01022.html>).

³ Per Van den Broek, vedere [1]; per Moseley e Van den Broek, vedere [2].

alla prima definizione e al numero di protoni nel nucleo di tali elementi. La frase finale crea una confusione ancora maggiore tracciando, a questo punto, una distinzione tra ciò che viene semplicemente definito *elemento* e ciò che i filosofi chiamano *elemento astratto*. Infine, si aggiunge che entrambi i concetti sono generalmente indicati con il termine *elemento chimico*, il che ovviamente fa nascere la domanda: *cosa è un elemento chimico?* Si poteva sperare in una definizione che distinguesse i due concetti il più chiaramente possibile, ma la definizione del Gold Book sembra sfiorare la questione, senza fare molta chiarezza su di essa. Per riassumere la definizione del Gold Book, si potrebbe dire che per i chimici il significato astratto di elemento è identificato solo microscopicamente, tramite il suo numero atomico, mentre l'elemento come sostanza semplice è identificato con l'essere una sostanza chimica pura. Come si può notare per il Gold Book, le sostanze semplici non sembrano meritare una definizione indipendente da quella microscopica data nella prima definizione.⁴

L'ultimo tentativo del filosofo della chimica di convincere il chimico fa riferimento al lavoro di Dimitrij Mendeleev, il principale scopritore della Tavola Periodica (Figura 1), che molto scrisse sulla natura degli elementi.⁵

Reihen	Gruppe I. — R ² O	Gruppe II. — RO	Gruppe III. — R ² O ³	Gruppe IV. RH ⁴ RO ²	Gruppe V. RH ³ R ² O ⁵	Gruppe VI. RH ² RO ³	Gruppe VII. RH R ² O ⁷	Gruppe VIII. — RO ⁴
1	H=1							
2	Li=7	Be=9.4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27.3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35.5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —

Figura 1. Tavola Periodica di Mendeleev del 1871 che mostra gli elementi previsti con pesi atomici di 44, 68, 72 e 100; questi elementi furono tutti scoperti in seguito e chiamati rispettivamente scandio, gallio, germanio e tecnezio (Fonte: *Zhurnal Russkeo Fiziko-Khimicheskogo Obshchestva*, 1871, 3, 25-56)

L'interesse dei filosofi della chimica per il significato astratto di *elemento* ha origine con il lavoro di Mendeleev e con un articolo su questo argomento del filosofo-chimico Fritz Paneth, scritto nel 1931 [3] e tradotto in inglese dal figlio Heinz Post nel 1962 [4].

Ecco alcune citazioni di Mendeleev riguardanti il duplice significato del concetto di elemento:

⁴ Un'interpretazione più benevola della definizione del Gold Book è che identifica solo le sostanze semplici come sostanze e non confonde la questione riferendosi anche all'elemento astratto come a una "sostanza". Questo punto è ripreso più avanti nel presente articolo nel contesto del lavoro di Earley e la sua risposta alla traduzione di Post del termine Grundstoff.

⁵ Se i chimici contemporanei siano influenzati da qualsiasi cosa abbia scritto Mendeleev è ovviamente un'altra questione.

È utile in questo senso fare una netta distinzione tra la concezione di elemento come sostanza omogenea separata, e come parte materiale ma invisibile di un composto. L'ossido di mercurio non contiene due corpi semplici, un gas e un metallo, ma due elementi, mercurio e ossigeno, che, quando sono liberi, sono un gas e un metallo. Né il mercurio come metallo né l'ossigeno come gas è contenuto nell'ossido di mercurio; quest'ultimo contiene solo la sostanza dell'elemento, proprio come il vapore contiene solo la sostanza del ghiaccio, ma non il ghiaccio stesso, o come il mais contiene la sostanza del seme, ma non il seme stesso [5].

L'ultima parte di questa citazione suggerisce che Mendeleev stia richiamando la distinzione aristotelica tra atto e potenza. Paneth vuole evidenziare il punto di vista di Mendeleev, ossia che la Tavola Periodica sia principalmente una classificazione degli elementi in questo secondo significato astratto, non nel significato di corpi semplici, quando scrive: "*Pertanto, nei termini della distinzione qui introdotta, possiamo riferirci solo a un sistema naturale [sistema periodico] di sostanze di base (basic substances) non di sostanze semplici (simple substances)*" [4, p. 152].

Mendeleev sostiene anche che gli elementi in senso più astratto siano caratterizzati solo dal loro peso atomico e che non abbiano "proprietà" nel senso comune del termine. In precedenti pubblicazioni è stato suggerito che questo è il motivo per cui Mendeleev poté superare i suoi competitori nel fare le sue previsioni su eka-boro, eka-alluminio, eka-silicio, eka-manganese, che una volta scoperti furono chiamati scandio, gallio, germanio, tecnezio [6].

Mendeleev ebbe la meglio su Lothar Meyer perché per primo si rese conto che gli elementi astratti dovevano essere considerati più fondamentali rispetto alle sostanze semplici poiché, in quanto astratti, persistono nei loro composti e, di conseguenza, se il sistema periodico doveva essere di fondamentale importanza, avrebbe dovuto classificare principalmente elementi astratti. Poiché l'astrazione è essenziale per la generalizzazione, Mendeleev fu naturalmente portato a dare maggiore importanza alla concezione astratta di elemento piuttosto che a quella più concreta di elemento come sostanza semplice.

Le previsioni fatte da Mendeleev furono quindi concepite con in mente gli elementi astratti. Se i dati osservazionali disponibili sulle sostanze semplici puntavano in una certa direzione, queste caratteristiche potevano essere trascurate, confidando che le proprietà dei più fondamentali elementi astratti avrebbero potuto essere diverse da quanto osservato fino a quel momento nella forma di una particolare *sostanza semplice*. Naturalmente, qualsiasi previsione alla fine avrebbe dovuto essere realizzata isolando una corrispondente sostanza semplice, poiché gli *elementi*, nel significato più sottile del termine, sono al di là dell'osservazione, tranne che per la proprietà misurabile del peso atomico.

Poiché Mendeleev cercava di classificare elementi astratti, non sostanze semplici, egli non fu ingannato da nessuna proprietà chimica non essenziale. Ad esempio, gli elementi del gruppo degli alogeni (fluoro, cloro, bromo e iodio) sembrano essere piuttosto diversi l'uno dall'altro quando ci si concentra su di essi come sostanze semplici isolabili, poiché, rispettivamente, due sono allo stato gas, uno è un liquido e un altro è solido. Le somiglianze tra i membri del gruppo sono più evidenti se si considerano i composti che ciascuno di essi forma, per esempio con il sodio, che sono tutti polveri bianche cristalline. Il punto è che in questi composti, fluoro, cloro, bromo e iodio, sono presenti non come sostanze semplici, ma in forma latente, o essenziale, come sostanze di base.

Questa visione degli elementi ha permesso a Mendeleev di sostenere la validità della legge periodica anche nei casi in cui le evidenze sperimentali sembravano puntare contro di essa. Tali convinzioni potevano essere il risultato della credenza, profondamente radicata, che la legge periodica si applicasse agli elementi astratti come sostanze di base e che questa legge fosse fondamentale e di pari *status* delle leggi della meccanica di Newton [6]. Se fosse stato più positivista, Mendeleev avrebbe facilmente perso di vista l'importanza della legge periodica e

avrebbe potuto nutrire dubbi sulle sue previsioni e correzioni che coinvolgevano gli elementi conosciuti.

Mendeleev espresse i suoi punti di vista filosofici generali sulla natura della scienza quando scrisse sulla relazione tra "materia, forza e spirito". Sosteneva che i problemi filosofici contemporanei derivassero da una tendenza a cercare un principio unificante, mentre egli prediligeva tre componenti fondamentali della natura: materia (sostanza), forza (energia) e spirito (anima). Tutto era composto da queste tre componenti e nessuna categoria poteva essere ridotta a nessuna delle altre. Secondo Michael Gordin, l'uso del termine *spirito* da parte di Mendeleev è un appello alla moderna nozione di essenzialismo, o a ciò che è irriducibilmente peculiare all'oggetto in questione. Gordin afferma anche che la posizione di Mendeleev è metafisica e lo allontana dalla "compagnia dei positivisti" [7].

Il Punto di Vista di Paneth

Viene presentato ora un breve resoconto sulla duplice concezione di elemento da parte di Paneth già trattata ampiamente in precedenza da Scerri [8-13].

Negli anni Venti del secolo scorso, Paneth ricorse all'essenza metafisica degli elementi come sostanze di base al fine di salvare il sistema periodico da una grave crisi che stava affrontando in quanto erano stati scoperti molti nuovi isotopi degli elementi, il che significava che il numero di *atomi* o di unità più fondamentali improvvisamente sembrava essersi moltiplicato. La questione era se il sistema periodico dovesse continuare a ospitare gli atomi tradizionalmente considerati di ciascun elemento, o se dovesse essere ristrutturato per accogliere gli isotopi appena scoperti, che ora avrebbero potuto essere considerati i veri *atomi*. Paneth rispose che il sistema periodico doveva continuare a ospitare gli atomi chimici tradizionali e non i singoli isotopi degli elementi. Paneth probabilmente considerava gli isotopi come sostanze semplici caratterizzate dal loro peso atomico, mentre le sostanze di base erano caratterizzate dalla grandezza più fondamentale del numero atomico. Questo sarebbe coerente con l'idea che non sono le sostanze semplici a essere rappresentate principalmente nella Tavola Periodica, così come non lo sono i singoli isotopi degli elementi. Ecco alcuni passi rilevanti dei suoi scritti:

Ho suggerito di usare il termine sostanza di base (basic substance) ogni volta che vogliamo designare ciò che è indistruttibile nei composti. ... e che dovremmo parlare di sostanza semplice (simple substance) quando ci riferiamo alla forma in cui tale sostanza di base, non combinata con nessun'altra, si presenta ai nostri sensi [14, pag. 65].

Non si possono attribuire qualità particolari a un elemento come sostanza di base, poiché contribuisce alla produzione di un'infinita varietà di qualità che esibisce sia da solo che in combinazione con altre sostanze di base [14, p.65].

Con il concetto di sostanza semplice, possiamo rimanere nel regno del realismo ingenuo. Quando si tratta della sostanza di base, tuttavia, non possiamo ignorare la sua connessione con il mondo trascendente senza cadere in contraddizione [14, p. 65].

L'Errore di Paneth

Anche Paneth potrebbe essere considerato colpevole di aver seminato confusione su un dibattito già complicato quando scrive: "*Ho preferito parlare di sostanza di base e di sostanza semplice come aspetti diversi del concetto chimico di elemento*" [4, p. 155].

Questa affermazione potrebbe essere interpretata nel senso che l'*elemento* sia l'entità fondamentale, mentre la sostanza di base e la sostanza semplice siano in qualche modo secondarie, il che sarebbe sicuramente errato (Figura 2).

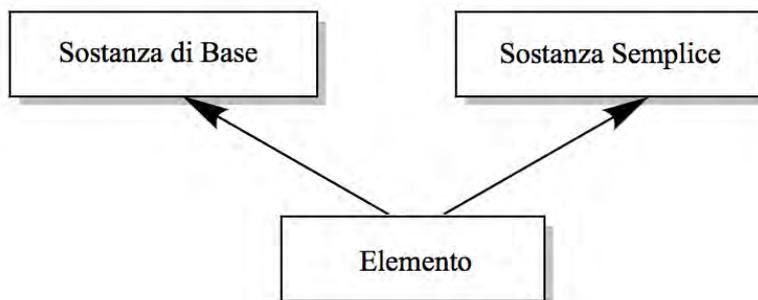


Figura 2. Una rappresentazione di quella che sembra essere la visione errata di Paneth sulla relazione tra sostanza di base (*basic substance*), elemento e sostanza semplice (*simple substance*) (Fonte: E. R. Scerri, *Found. Chem.*, 2012, **14**, 69-81)

In un lavoro precedente Scerri ha proposto una relazione a tre vie, allo scopo di chiarire questo particolare problema [13]. La sostanza di base nel senso di *elemento* non sta sullo stesso livello epistemologico della sostanza semplice, ma la assorbe, nello stesso modo in cui assorbe la sostanza semplice, quando è presente in combinazione con altre sostanze semplici (Figura 3). Lo schema mostrato assicura che sia questo il caso, ma al prezzo di avere ora tre tipi di elemento con cui misurarsi!

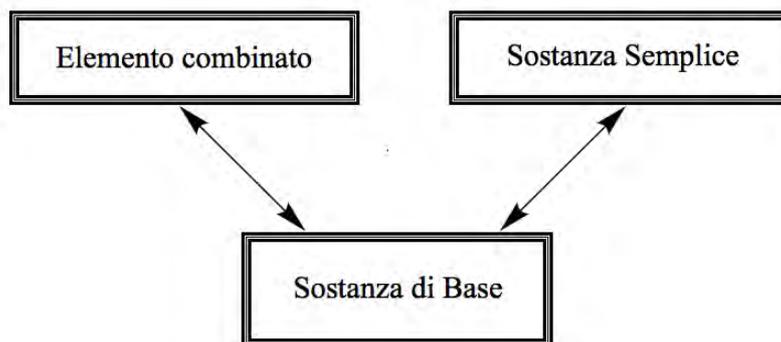


Figura 3. Proposta di relazione a tre vie tra elemento combinato, sostanza di base e sostanza semplice

Interpretazione microscopica del molteplice significato di elemento

Anche se alcuni chimici contemporanei accettano la dualità filosofica per quanto riguarda il concetto di elemento, essi tendono a vedere la situazione in modo microscopico, invece che in modo macroscopico. Esaminiamo la possibilità di una interpretazione microscopica delle distinzioni tra il significato astratto di elemento, di elementi come sostanze semplici e, infine, come elementi combinati. Poiché il nucleo è la parte dell'atomo che rimane completamente invariata nel corso delle reazioni chimiche, esso sembrerebbe la scelta naturale per la controparte microscopica di elemento come sostanza di base. Allo stesso modo, il fatto che l'identità degli elementi risieda nel nucleo, piuttosto che negli elettroni che lo accompagnano, sembrerebbe supportare ulteriormente l'idea che il nucleo debba essere identificato con l'elemento come sostanza di base (Figura 4).

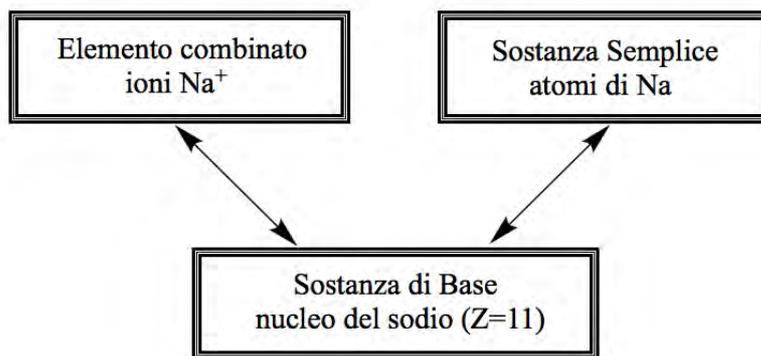


Figura 4. Proposta di interpretazione microscopica della definizione a tre vie del concetto di *elemento*

Quanto all'elemento come sostanza semplice, questo potrebbe essere identificato con l'intero atomo neutro, ovvero il nucleo con il relativo numero di elettroni orbitanti.⁶ Ciò lascia da definire la nozione di elemento combinato, come introdotto nella sezione precedente, il quale nella sua forma microscopica deve sicuramente essere uno ione di qualsiasi elemento in questione, almeno nel caso del legame ionico. Una così semplice identificazione non può essere fatta nel caso di composti covalenti, anche se forse la nozione di Richard Bader di atomi nelle molecole potrebbe essere scelta per svolgere un tale ruolo [15].

Se si tentasse di fare affermazioni quantitative, o anche solo di eseguire calcoli sugli atomi di un qualsiasi elemento, con un insieme così semplicistico di identificazioni si potrebbe incorrere in seri problemi. Infatti, un approccio quantomeccanico al calcolo delle proprietà degli elementi e composti è condotto attraverso l'equazione di Schrödinger indipendente dal tempo, che a sua volta si occupa dell'interazione tra nuclei ed elettroni in ogni particolare caso atomico o molecolare.

Si potrebbe allora modificare la nostra precedente proposta, in modo che gli elementi come *sostanze di base* vengano identificati con l'intero atomo invece che solo con il nucleo. Inoltre, limitare la caratterizzazione degli atomi al solo loro numero di protoni ed elettroni sottovaluta pesantemente il comportamento chimico e fisico degli atomi. Parlando più in generale, non è il semplice numero di elettroni, né come occupano i vari tipi di orbitali, che fa sì che questi atomi si comportino in un certo modo. Dopotutto, come potrebbe solo un cambiamento di numero portare alle sottili differenze qualitative osservate e in alcuni casi a cambiamenti piuttosto inattesi che si verificano, per esempio, passando dall'oro solido (elemento 79) al mercurio liquido (elemento 80)?

Quindi, la nozione di configurazione elettronica di per sé non regge a un esame accurato e si rivela un esempio ultra-semplicistico di ciò che causa il comportamento chimico, supponendo che si voglia parlare in primo luogo di causalità.⁷ Un moderno resoconto microscopico degli elementi come sostanze semplici deve, pertanto, fare molto di più che affermare semplicemente il numero di particelle elementari negli atomi di uno specifico elemento.

La causa delle proprietà di ogni atomo risiede nella complessa dinamica che esiste tra un particolare numero di elettroni e protoni nel nucleo in questione. Si consideri, ad esempio, la differenza tra un atomo di idrogeno e uno di elio. Nel caso dell'idrogeno vi è un solo contributo

⁶ Questo punto di vista rappresenta ovviamente un approccio piuttosto riduzionista. Inoltre, il lettore potrebbe obiettare alla terminologia, poiché una vera *sostanza* potrebbe non essere riducibile solo alle sue particelle fondamentali componenti. Tuttavia, è stata mantenuta la terminologia di Post nel discutere la questione principale dell'esistenza di almeno due concezioni del termine elemento.

⁷ Numerosi articoli hanno discusso il ruolo della causalità in chimica, tra cui Stemwedel [16].

al termine dell'energia potenziale, quello di attrazione tra nucleo ed elettrone, vale a dire $-e^2/r$, dove e rappresenta la carica dell'elettrone e r la distanza tra il nucleo e l'elettrone orbitante.⁸ Nel caso dell'atomo di elio ci sono due elettroni e di conseguenza ci sono due termini rispetto a quello che è presente nell'idrogeno.⁹ Ma in aggiunta c'è un termine importantissimo di repulsione elettrone-elettrone dato da $+e^2/r_{12}$.

Idrogeno: energia potenziale = $-e^2/r$

Elio: energia potenziale = $-2e^2/r_1 - 2e^2/r_2 + e^2/r_{12}$

Considerare il passaggio dall'atomo di idrogeno a quello di elio come dovuto a un passaggio da uno a due elettroni, o da una configurazione $1s^1$ a $1s^2$, significa non riuscire a riconoscere il termine di repulsione elettrone-elettrone. La chimica non riguarda solo un particolare numero di elettroni, ma le forze all'interno di un particolare atomo, che non sono correlate esattamente al semplice numero di elettroni. Detto in termini diversi, una formalizzazione delle particelle elementari che sono presenti in un atomo, o anche la sua configurazione elettronica come dispositivo causale o esplicativo, rappresenterebbe una grossolana semplificazione dei fatti. Una spiegazione più profonda si trova nella dinamica tra le forze, che è fissata nell'equazione di Schrödinger indipendente dal tempo dell'atomo in questione.¹⁰ Ecco perché spiegazioni rigorose in chimica e fisica richiedono la meccanica quantistica.

Questo è anche il motivo per cui, in generale, i chimici potrebbero essere d'accordo nel dire che la meccanica quantistica fornisce spiegazioni chimiche, mentre le configurazioni elettroniche sono una generalizzazione utile, ma grossolana. Le configurazioni elettroniche degli atomi sono più utili nell'insegnamento della chimica che nella *chimica reale*. Quando un chimico vuole prevedere il comportamento di un elemento o di un composto, o stabilire l'angolo di legame di una molecola, o addirittura risalire a un numero qualsiasi di proprietà, cerca nel suo computer il programma di meccanica quantistica. Conoscere la configurazione elettronica dell'atomo o della molecola è di utilità piuttosto limitata, a parte fare confronti con altri elementi.

Quindi, se si desidera davvero discutere l'elemento come sostanza di base, o anche come sostanza semplice, in termini microscopici, è richiesta una conoscenza delle particelle elementari presenti in un atomo insieme con l'uso dell'equazione di Schrödinger indipendente dal tempo. Questo suggerisce che qualsiasi tentativo di identificare il duplice significato del concetto di elemento come è stato fatto nella Figura 4 è destinato a fallire.

Un curioso dilemma in chimica

Nel contesto dei dibattiti riguardanti la duplice natura di elemento alcune questioni non sono mai state discusse, come sa bene chiunque abbia insegnato chimica sia al liceo che a livelli più avanzati.

Il fatto che l'identità di un elemento risieda nel suo nucleo, o nel suo numero atomico, sembrerebbe essere un chiaro riferimento agli elementi come sostanze di base. Questa situazione è del tutto coerente con l'idea che il nucleo non cambia nel corso delle reazioni chimiche. Nella filosofia generale, discussioni di identità personale sono legate a una o più caratteristiche che non cambiano con il tempo o qualsiasi cosa accada all'individuo in questione [17]. Allo stesso modo sembrerebbe che la discussione sull'identità degli elementi debba essere

⁸ L'elettrone ha una carica $-e$, mentre il nucleo di idrogeno ha una carica $+e$. Il prodotto tra le due cariche dà $-e^2$, dove la carica negativa risultante denota un'attrazione tra le due particelle.

⁹ Un'altra differenza è la carica nucleare sul nucleo dell'elio che è $+2e$.

¹⁰ Ci sono altri approcci che non fanno appello all'equazione d'onda di Schrödinger, come l'approccio ai calcoli del funzionale densità.

collegata al nucleo che non cambia. D'altra parte, il modo in cui un elemento reagisce è strettamente associato agli elettroni che orbitano attorno al nucleo di un atomo. Le disposizioni degli elettroni sono suscettibili di cambiamento, senza che si verifichi un corrispondente cambiamento nell'identità di un atomo. Ad esempio, la perdita o il guadagno di elettroni provoca la formazione di ioni positivi o negativi, ma senza modificare l'identità dell'atomo in questione.

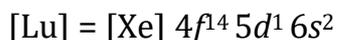
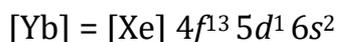
Un'altra dualità che si può trovare nello studio o nell'insegnamento della chimica è che la quantità di un elemento che reagisce è associata al suo peso atomico, che è quasi interamente dovuto al nucleo.¹¹ Ci riferiamo ai calcoli stechiometrici con cui, per esempio, gli studenti imparano a calcolare come si ottiene un composto facendo reagire insieme due elementi. Tuttavia, *come* un elemento reagisce per formare composti, vale a dire la questione qualitativa piuttosto che quantitativa, è affrontata con riferimento solo agli elettroni posseduti da un atomo, o in modo più specifico alle configurazioni elettroniche degli atomi. Ad esempio, gli elementi i cui atomi presentano un elettrone nel guscio esterno, come il sodio e il potassio, reagiscono perdendo i loro elettroni più esterni, mentre gli elementi i cui atomi presentano sette elettroni esterni, come il cloro o il bromo, reagiscono acquistando un elettrone. Questi aspetti relativi all'insegnamento della chimica rappresentano un'altra forma di dualità riguardante il comportamento degli elementi che merita di essere ulteriormente esaminata nel contesto del dibattito generale a cui è rivolto il libro *"What is a Chemical Element?"*, a cura di E. R. Scerri e E. Ghibaudi.

Un'applicazione diretta del concetto astratto di elemento alla risoluzione della questione del gruppo 3

La questione di quali elementi debbano precisamente essere inseriti nel gruppo 3 della Tavola Periodica è stata dibattuta a più riprese, apparentemente fino a oggi senza alcuna soluzione [18-21]. Questo problema è di notevole importanza sia per i chimici che per i fisici, così come per gli studenti di chimica, tanto è vero che la IUPAC nel 2015 ha convocato un gruppo di lavoro, attualmente presieduto da Eric Scerri, proprio per esaminare tale questione.¹²

Erroneamente da più parti si considera che la IUPAC sostenga la tradizionale Tavola Periodica con lantanio e attinio nel gruppo 3, opinione confutata da Jeffrey Leigh che ha chiarito come la IUPAC per tradizione non consideri la correttezza dell'una o dell'altra Tavola Periodica; in effetti non esiste una Tavola Periodica IUPAC ufficialmente approvata [22].

Dopo l'avvento della meccanica quantistica e la determinazione delle configurazioni elettroniche degli atomi c'è stata una generale convinzione che un tale approccio avrebbe risolto tutte le restanti questioni che hanno a che fare con i dettagli della Tavola Periodica. La prima determinazione delle configurazioni degli elementi itterbio (70) e lutezio (71) sembrava indicare per i loro atomi le seguenti configurazioni elettroniche:



Il lutezio, quindi, avrebbe dovuto segnare la fine della serie dei lantanidi. Inoltre, il lutezio, essendo scoperto insieme a molti altri elementi delle terre rare, veniva generalmente considerato un elemento delle terre rare [23].

¹¹ La virtuale piccolezza degli elettroni nell'esecuzione di calcoli stechiometrici deriva dalla grande discrepanza di massa tra protoni e neutroni, da un lato, ed elettroni, dall'altro. Mentre la massa del protone e del neutrone è circa $1,67 \times 10^{-27}$ kg, quella dell'elettrone è circa $9,1 \times 10^{-31}$ kg, con un rapporto di 1835 a 1. Tuttavia, i calcoli stechiometrici non trascurano le masse degli elettroni, poiché queste piccole quantità sono incluse nelle masse atomiche relative che appaiono nelle Tavole Periodiche, o nelle tabelle di pesi atomici.

¹² Gruppo di lavoro IUPAC per il gruppo 3 della Tavola Periodica (<https://iupac.org/project/2015-039-2-200>).

Nel 1937 Meggers e Scribner [24] pubblicarono un articolo in cui riportavano che, contrariamente a quanto osservato in precedenza, la configurazione dell'itterbio avrebbe dovuto essere assegnata come:



Se l'itterbio possiede 14 elettroni f , anziché 13 come si credeva in precedenza, può essere davvero pensato come l'ultimo elemento delle terre rare. Di conseguenza, l'elemento successivo, il lutezio, può essere considerato come un elemento del blocco d , ponendolo così sotto lo scandio e l'ittrio nel gruppo 3. Negli anni successivi a questa scoperta alcuni libri e Tavole Periodiche incorporarono la configurazione dell'itterbio appena assegnata, astenendosi però dal discutere la possibile ricollocazione del lutezio. Nel noto testo sulla meccanica quantistica di Landau e Lifshitz è riportato per la prima volta che queste configurazioni fornivano motivi per considerare il lutezio come un elemento del blocco d piuttosto che un elemento del blocco f [25]: *“Nei libri di chimica, il lutezio è ancora collocato tra gli elementi delle terre rare. Questo, tuttavia, non è corretto, poiché nel lutezio il guscio $4f$ è completo”*.

Tale semplice nozione è stata poi riscoperta separatamente da un certo numero di autori, operanti in diverse sotto-discipline, sebbene nessuna di queste proposte sembrò avere alcun impatto sul modo in cui veniva presentata la Tavola Periodica [26-27].

Nel 1982 un chimico, William Jensen, pubblicò un articolo, ampiamente citato, in cui passava in rassegna le prove precedenti e faceva, forse, il primo concordato appello alla comunità chimica affinché le Tavole Periodiche fossero modificate in modo che il lutezio potesse sostituire il lantanio e il laurenzio potesse sostituire l'attinio nel gruppo 3 [19]. Questo articolo, tuttavia, non sembra aver convinto molti autori perché la maggior parte delle Tavole Periodiche è rimasta invariata e il dibattito è proseguito. Sebbene l'articolo di Jensen rappresenti un passo importante verso la riassegnazione degli elementi lutezio e laurenzio al gruppo 3, la proposta presenta alcune limitazioni che l'hanno portata a non avere l'impatto che avrebbe potuto avere [28].

Un argomento conclusivo a favore di Sc, Y, Lu, Lr

Ciò che è richiesto per stabilire l'appartenenza al gruppo 3 sembra essere un argomento categoriale. Tale argomentazione diventa immediatamente disponibile se si prende in considerazione il concetto astratto di elemento e in particolare la proprietà che caratterizza ciascun elemento, ovvero la carica atomica. L'unica caratteristica di un elemento astratto è il suo numero atomico e su questo tutti sembrano essere d'accordo.

L'approccio proposto per risolvere la questione del gruppo 3 si basa principalmente sull'uso del numero atomico e si compone di due requisiti semplici e incontrovertibili. Il primo è presentare la Tavola Periodica con il formato lungo a trentadue colonne, piuttosto che con quello medio-lungo, più frequentemente visualizzato, a diciotto colonne. La forma lunga è una rappresentazione più corretta del sistema periodico, dato che incorpora il blocco f nel corpo principale della Tavola Periodica. Al contrario, la tavola più familiare a diciotto colonne presenta il blocco f come una nota disconnessa a piè pagina, un formato che sopravvive per ragioni pratiche, in quanto quella a trentadue colonne, piuttosto ampia, è difficile da rappresentare su poster o su singola pagina stampata.

Il secondo e fondamentale requisito è presentare gli elementi in modo tale da mostrare un aumento graduale del numero atomico a mano a mano che si procede lungo la Tavola Periodica da sinistra a destra in ogni periodo. Se queste due raccomandazioni sono seguite, diventa abbastanza chiaro che il gruppo 3 debba contenere il lutezio e il laurenzio, anziché il lantanio e l'attinio. Come si vede in figura 5, questa disposizione crea una sequenza fluida e regolare dei numeri atomici di tutti gli elementi.

H																		He													
1																		2													
Li	Be														B	C	N	O	F	Ne											
3	4														5	6	7	8	9	10											
Na	Mg																		Al	Si	P	S	Cl	Ar							
11	12																		13	14	15	16	17	18							
K	Ca														Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
19	20														21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
Rb	Sr														Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
37	38														39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118

Figura 5. Tavola Periodica a 32 colonne con il lutezio e il laurenzio nel gruppo 3; tutti gli elementi sono mostrati in ordine di numero atomico crescente

D'altra parte, se si insiste a mantenere il lantanio e l'attinio nel gruppo 3, la sequenza dei numeri atomici crescenti diventa altamente anomala come evidenziato in figura 6.

H																		He													
1																		2													
Li	Be														B	C	N	O	F	Ne											
3	4														5	6	7	8	9	10											
Na	Mg																		Al	Si	P	S	Cl	Ar							
11	12																		13	14	15	16	17	18							
K	Ca														Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
19	20														21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
Rb	Sr														Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
37	38														39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
Cs	Ba	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
55	56	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Fr	Ra	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
87	88	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118

Figura 6. Tavola Periodica a 32 colonne con il lantanio e l'attinio nel gruppo 3; il numero atomico non aumenta più in modo regolare, il che implica che il lantanio e l'attinio sono fuori posto

Questioni aperte sul duplice significato di elemento

Secondo il resoconto fatto nell'introduzione a questo articolo potrebbe sembrare che i filosofi della chimica siano d'accordo sui due significati del concetto di elemento: in realtà, non è così. Forse l'unico punto su cui i filosofi della chimica possono concordare è la necessità di un concetto duplice, mentre qualsiasi altro aspetto sembra suscitare profondi disaccordi. Saranno ora esposte chiaramente le differenze di opinione nella speranza di favorire proficue discussioni. Naturalmente il chimico deve rimanere all'oscuro di tutto, perchè potrebbe essere predisposto all'idea che due filosofi non possono essere d'accordo su niente.

Ecco un breve elenco delle questioni controverse, molte delle quali sono affrontate nel volume edito da Scerri e Ghibaudi.

1. I due significati di elemento sono coestensivi, o uno è contenuto all'interno dell'altro?
2. Fino a che punto Lavoisier ha abbandonato il significato astratto degli elementi promuovendo il suo significato più positivo degli elementi come sostanze semplici?
3. Quali proprietà, ammesso che ne abbiano, possiedono gli elementi, nel significato astratto più generale, oltre al numero atomico (o peso atomico in Mendeleev)?
4. Quanto astratto dovrebbe essere considerato il significato di elemento di Mendeleev?

5. Quali influenze hanno indotto Mendeleev ad attribuire tanta importanza al significato astratto di elemento?
6. Quale uso fece Mendeleev del suo significato di elemento nella scoperta della sua versione di Tavola Periodica?
7. La questione terminologica se il *Grundstoff* di Paneth, tradotto come sostanza di base, sia davvero una forma di sostanza.

1. In che modo i due significati di elemento sono collegati tra loro?

Per evitare le insidie di cui al punto 7, si propone di utilizzare il termine “elemento-1” ed “elemento-2”, rispettivamente, per designare *einfacher Stoff* e *Grundstoff* di Paneth [9].

Un possibile modo di concepire questi due significati è che siano coestensivi e che appartengano allo stesso livello epistemologico. Un attimo di riflessione, tuttavia, rivela che non può essere così. È possibile che l'aspetto più concreto di “elemento” rappresenti un sottoinsieme del concetto più generale e più profondo di elemento-2 (*Grundstoff*)? Viceversa, potrebbe anche avere senso considerare la questione dal punto di vista opposto: l'elemento-2 potrebbe essere pensato come sussistente all'interno dell'elemento-1, nel senso che l'essenza di un elemento potrebbe essere contenuta all'interno dell'aspetto più tangibile e sensibile dell'elemento, o elemento-1, per rimanere all'interno della terminologia proposta. In alternativa, la natura concettuale di elemento-2 sembrerebbe precludere tale inclusione, oppure all'opposto che esso, elemento-2, includa al suo interno l'elemento-1.

Sono problemi mereologici di non facile soluzione, affrontati più ampiamente da Rom Harré e Jean-Pierre Llored [29].

2. Fino a che punto Lavoisier ha abbandonato il significato astratto di elemento promuovendo il significato più positivo degli elementi come sostanze semplici?

All'inizio i filosofi greci pensavano agli elementi come portatori astratti di proprietà, sebbene di per sé privi di qualsiasi proprietà tangibile. Come è noto, questa visione potrebbe aver avuto una notevole influenza filosofica nei secoli a venire, ma non anticipava la scienza moderna in quanto aveva un carattere eccessivamente metafisico.

Generalmente si ritiene che la chimica come scienza abbia cominciato a prendere forma per mano di Antoine Lavoisier, che promosse una visione degli elementi come stadio finale della decomposizione chimica. Tali elementi potevano essere isolati e ciascuno possedeva numerose proprietà che potevano essere osservate sperimentalmente, un primo passo nella direzione di una filosofia positivista. Naturalmente Lavoisier non abbandonò il concetto astratto di elemento come portatore di proprietà o come principio. In accordo con quanto sottolineano molti autori, il famoso elenco di sostanze semplici (elemento-1) di Lavoisier contiene una serie di principi come il calore e la luce. Mendeleev fece un successivo passo decisivo per l'evoluzione del concetto di elemento scrivendo in dettaglio su questo tema. Egli inizia i suoi *Principi di Chimica* evidenziando la necessità di un duplice concetto di elemento, dando la netta impressione che ritenesse più fondamentale il concetto astratto, dal momento che si spinge ad affermare che la sua classificazione periodica degli elementi si basava sul significato astratto di elemento, piuttosto che su quello di elemento come sostanza semplice. L'atteggiamento sempre più positivista della scienza del ventesimo secolo ha quasi sradicato la nozione astratta di elemento nonostante alcuni chimici più riflessivi come Urbain e Soddy abbiano continuato ad occuparsene. Uno dei pochi resoconti che discute apertamente dei due significati di elemento, scritto da Fritz Paneth negli anni Trenta del Novecento [3], chimico inorganico incline alla filosofia, è stato tradotto in inglese solo nel 1962 [4].

Molte domande nascono da questo breve resoconto sullo sviluppo del concetto di elemento. Ad esempio, fu Lavoisier a dare origine alla nozione di elemento come sostanza semplice e quanto egli è debitore a precedenti chimici francesi? Ci si potrebbe anche chiedere fino a che punto Lavoisier stesso avesse una doppia nozione di elemento, o se abbia privilegiato gli

elementi come sostanze semplici non essendo in grado di scrollarsi di dosso i resti della visione metafisica più astratta.

3. *Quali proprietà, ammesso che ne abbiano, possiedono gli elementi nel loro significato più generale, oltre al numero atomico (o peso atomico in Mendeleev)?*

Mendeleev pensava che un elemento astratto fosse anche un costituente materiale, per usare la sua terminologia. Tuttavia, il significato preciso di questo punto di vista resta da chiarire. Mendeleev sottolinea con forza la differenza "tra il concetto di corpo semplice come una singola sostanza omogenea, e come materiale costitutivo, non percepibile ai sensi, di un corpo composto" [4].

Mendeleev credeva anche che ogni elemento avesse un attributo distintivo, vale a dire il suo peso atomico, ma paradossalmente nessuna proprietà in quanto tale. Perché il possesso di un peso atomico non dovrebbe contare come una proprietà dell'elemento in questione? Il concetto aggiornato di Paneth di elemento astratto tiene conto della scoperta di Moseley che il numero atomico è un criterio migliore del peso atomico per ordinare gli elementi. Secondo Paneth, gli elementi astratti sono identificati attraverso il loro univoco numero atomico, ma anche questo non è da considerarsi come una proprietà dell'elemento astratto, poiché uno dei loro principali attributi è che essi sono privi delle proprietà tipiche degli elementi intesi come sostanze semplici isolate e, come per Mendeleev, questa posizione sembrerebbe sollevare questioni non ancora risolte.

4. *Quanto è astratto l'astratto?*

La nozione di elemento astratto solleva l'ovvia questione della scala di astrazione che si intende usare, problema ulteriormente complicato da alcuni autori, come Paneth, che riferendosi agli elementi usano il termine "trascendentale". A un estremo della scala abbiamo il completamente astratto nel senso kantiano della *cosa in sé*, che deve rimanere nascosto alla vista [30-32], come una visione metafisica, nel senso letterale di trovarsi oltre il fisico, o addirittura al di fuori del regno del mondo fisico.

Klaus Ruthenberg, che ha condotto uno studio dell'influenza kantiana su Paneth, così commenta:

In termini filosofici moderni, le sostanze semplici sono osservabili, le sostanze di base sono non osservabili. Qui si vede un accenno ai fenomeni (gli osservabili) e noumena (i non osservabili) kantiani. Paneth ha affermato: "per comprendere il cambiamento delle proprietà delle sostanze abbiamo bisogno di ipotesi trascendentali". Quindi, ha ampliato il suo precedente punto di vista meramente fenomenologico e ha aggiunto il regno delle idee trascendentali alla sua filosofia della chimica [30].

Mendeleev, noto per essere stato fermamente contrario a qualsiasi forma così letterale di metafisica, dedicò notevoli sforzi a criticare l'interesse per lo spiritualismo e le sedute spiritiche che calamitavano l'attenzione della società europea durante il periodo vittoriano.¹³ Per quanto riguarda Paneth, è noto che era in sintonia con la filosofia kantiana, sebbene fosse una varietà del Kantismo abbracciata dal filosofo tedesco Eduard von Hartmann e da lui definita realismo trascendentale.

Nel dibattito contemporaneo Robin Hendry insiste nell'interpretare la nozione di elemento astratto in maniera fisicalista, affermando che il senso astratto di elemento deve essere localizzato nello spazio e nel tempo e sostenendo una forma robusta di astrattezza.¹⁴

¹³ Non si intende insinuare un'identità tra spiritualismo e metafisica, ma semplicemente sollevare questo punto nell'intento di aprire ulteriormente il dibattito.

¹⁴ Robin Hendry ha sottolineato questo punto in più di un incontro della Società Internazionale per la Filosofia della Chimica.

5. *Cosa ha indotto Mendeleev ad attribuire una tale importanza al significato astratto di elemento?*

Secondo Scerri il profondo attaccamento di Mendeleev al significato astratto di elemento sembra provenire dal nulla: come ha fatto Mendeleev ad arrivare a un tale punto di vista? Cosa lo ha portato, reinterprestando l'attitudine di Lavoisier, a porre quasi tutta l'attenzione sulla sostanza semplice? Sappiamo molto poco del motivo per cui Mendeleev ha adottato il punto di vista che è al centro di molti altri articoli del volume curato da Scerri e Ghibaudi. Per maggiori chiarimenti bisognerebbe affidarsi a studiosi di storia in grado di leggere la letteratura russa originaria come Michael Gordin e Nathan Brooks (che è rappresentato nel volume appena citato). Va anche ricordato il fatto che gli studiosi russi di Mendeleev non hanno ancora partecipato al dibattito condotto all'interno della comunità dei filosofi della chimica. Si pensi ad autori come Igor Dmitriev o Eugene Babaev (che ha partecipato ad alcuni degli incontri della *Società Internazionale per la Filosofia della Chimica*). Possiamo sperare che ci possa essere un riavvicinamento tra queste comunità a seguito della Conferenza Internazionale organizzata a San Pietroburgo per celebrare i 150 anni dalla nascita della Tavola Periodica di Mendeleev, avvenuta appunto nel 1869.

6. *Le sostanze di base hanno proprietà oppure no?*

Come può Mendeleev affermare che la Tavola Periodica riguardi principalmente gli elementi come sostanze di base, dal momento che si suppone che essi non abbiano proprietà, eccetto il peso atomico crescente? Il riconoscimento della periodicità o della somiglianza chimica comporta il confronto fra le proprietà delle sostanze semplici e anche fra quelle degli elementi in forma combinata, in ogni caso proprietà osservabili. Si suppone che gli elementi non abbiano proprietà in quanto sostanze di base: potrebbe allora essere che Mendeleev non abbia in realtà basato il suo sistema periodico così fermamente sulla nozione più astratta di elementi privi di proprietà, come egli sembra affermare di aver fatto? Il riconoscimento della periodicità chimica da parte di Mendeleev sembra al contrario dipendere dall'interpretazione degli elementi come sostanze semplici, così come dalle proprietà degli elementi nella loro forma combinata, soprattutto perché Mendeleev si riferiva spesso agli andamenti della valenza quando ci si spostava nella Tavola Periodica.

Questa domanda è chiaramente correlata a quanto astrattamente dovrebbe essere considerato il significato di elemento di Mendeleev e se la distinzione debba essere considerata macroscopicamente o microscopicamente.

7. *La questione terminologica*

Secondo l'autorevole articolo di Paneth del 1931, i due significati di elemento sono riferiti a *einfacher Stoff* e *Grundstoff*. Tuttavia, la versione più conosciuta di questo articolo è stata tradotta in inglese con i due termini chiave "*simple substance*" (*sostanza semplice*) e "*basic substance*" (*sostanza di base*).

Il chimico-filosofo Joseph Earley si è opposto a questa traduzione [33-34]: "Il senso principale dell'articolo di Paneth era che ... *la designazione elemento appartiene propriamente a ciò che egli chiama Grundstoff – un costituente ultimo di una sostanza chimica – piuttosto che a sostanze stabili che non possono essere decomposte (einfache Stoffe)*. ... Su questa base, una traduzione inglese più appropriata (sebbene meno letterale) dell'*einfacher Stoff* di Paneth dovrebbe essere il termine *elementary substance* (*sostanza elementare*), piuttosto che *simple substance* (*sostanza semplice*), o *element* (*elemento*) per materiali stabili contenenti un solo elemento. ... La parola *element* (*elemento*) sarebbe, quindi, disponibile per uso esclusivo come traduzione inglese di *Grundstoff*" [34].

Alcune lingue sono più adatte a fare questa distinzione. Ad esempio, nella lingua francese gli elementi come sostanze semplici sono noti come *substances simples*, mentre gli elementi come sostanze di base sono noti come *éléments*. Nella lingua inglese a entrambi i significati viene dato

il nome *element*, il che provoca molta confusione. Sfortunatamente, gran parte del recente dibattito sul duplice concetto del termine *element* (elemento) è stato ovviamente condotto in lingua inglese. Rimane ancora del lavoro da fare per decidere, o concordare, una terminologia comune che consentirebbe una discussione più fruttuosa della *questione dell'elemento* tra i filosofi della chimica contemporanei. Infine, sulla questione della traduzione e della terminologia, i lettori dovrebbero vedere l'interessantissima analisi di Boyce [35].

Conclusioni

Sono state passate in rassegna le sfaccettate discussioni su una questione fondamentale in chimica, vale a dire la natura degli elementi. Si passa da una nozione astratta (filosofi greci) a una nozione più concreta (Lavoisier) e di nuovo a una nozione astratta (Mendeleev e Paneth). Si è cercato di conciliare le opinioni dei filosofi della chimica con quelle dei chimici e dei docenti di chimica. Inoltre, si è applicato il concetto astratto di elemento, caratterizzato dal numero atomico, per risolvere la questione di quali elementi collocare nel gruppo 3 della Tavola Periodica.

In definitiva molto resta da chiarire: forse si rimane più confusi di quando questa questione è stata affrontata per la prima volta; si spera però di poter apprezzare meglio la profondità nel campo della chimica ancora carente di serie questioni filosofiche.

Ringraziamenti

Si ringraziano Elena Ghibaudi dell'Università di Torino e Giovanni Stegel dell'Università di Sassari per l'attenta lettura del manoscritto e per i loro commenti e suggerimenti.

Riferimenti

- [1] E. R. Scerri, *A Tale of Seven Scientists and a New Philosophy of Science*, Oxford University Press, New York, 2016.
- [2] R. MacLeod, R.G. Egdell, E. Bruton, *For Science, King and Country: The Life and Legacy of Henry Moseley*, Unicorn, London, 2018.
- [3] F. A. Paneth, Über die erkenntnistheoretische Stellung des chemischen Elementbegriffs, *Schriften der Königsberger Gelehrten Gesellschaft, Naturwissenschaftliche Klasse*, Heft 4, Halle, Max Niemeyer Verlag, 1931.
- [4] F. A. Paneth, The Epistemological Status of the Chemical Concept of Element, *British Journal for the Philosophy of Science*, 1962, **13**, 1-14 e 144-160. Reprinted in *Foundations of Chemistry*, 2003, **5**, 113-145.
- [5] D. I. Mendeleev, *Principles of Chemistry*, vol. 1; 1st English edition translated by G. Kamensky, Longmans Green & Co, London, 1891.
- [6] E. R. Scerri, *The Periodic Table, Its Story and Its Significance*, Oxford University Press, New York, 2007.
- [7] M. Gordin, *A Well-Ordered Thing*, Basic Books, New York, 2004.
- [8] E. R. Scerri, Naive Realism, Reduction and the 'Intermediate Position, in *Of Minds and Molecules* (eds. N. Bhushan, S. Rosenfeld), Oxford University Press, 51-72, New York, 2000.
- [9] E. R. Scerri, Response to Vollmer's Review of *Minds and Molecules*, *Philosophy of Science*, 2003, **70**, 391-398.
- [10] E. R. Scerri, Some Aspects of the Metaphysics of Chemistry and the Nature of the Elements, *Hyle-International Journal for Philosophy of Chemistry*, 2005, **11**, 127-145.

- [11] E. R. Scerri, On the Continuity of Reference of the Elements, A Response to Hendry, *Studies in History and Philosophy of Science*, 2006, **37**, 308-321.
- [12] E. R. Scerri, The Dual Sense of the Term Element, Attempts to Derive the Madelung Rule and the Optimal Form of the Periodic Table, if any, *International Journal of Quantum Chemistry* 2009a, **109**, 959-971.
- [13] E. R. Scerri, What Is an Element? What Is the Periodic Table? And What Does Quantum Mechanics Contribute to the Question?, *Foundations of Chemistry*, 2012, **14**, 69-81.
- [14] F. A. Paneth, in *Chemistry & Beyond: Collected Essays of F.A. Paneth* (eds. H. Dingle, G.R. Martin), Wiley, New York, 1965.
- [15] R. F. W. Bader, *Atoms in Molecules: A Quantum Theory*, Oxford University Press, New York, 1994.
- [16] J. D. Stemwedel, Explanation, Unification, and What Chemistry Gets from Causation, *Philosophy of Science*, 2004, **71**(5), 1060-1070.
- [17] E. T. Olson, Personal Identity, in *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (<https://plato.stanford.edu/entries/identity-personal/>)
- [18] R. W. Clark, G. D. White, The Fly-Leaf Periodic Table, *Journal of Chemical Education* 2008, **85**, 497.
- [19] W. B. Jensen, The Positions of Lanthanum (Actinium) and Lutetium (Lawrencium) in the Periodic Table, *Journal of Chemical Education*, 1982, **59**, 634-636.
- [20] L. Lavelle, Response to the Fly-Leaf Periodic Table, *Journal of Chemical Education*, 2008, **85**, 1491.
- [21] E. R. Scerri, Which Elements Belong to Group 3?, *Journal of Chemical Education*, 2009, **86**, 1188.
- [22] J. Leigh, *Chemistry International*, 2009, no. 1 (January-February). (http://www.iupac.org/publications/ci/2009/3101/1_leigh.html).
- [23] C. H. Evans, *Episodes from the History of the Rare Earth Elements*, Springer, Berlin, 1996.
- [24] W. F. Meggers, B. F. Scribner, Arc and Spark Spectra of Ytterbium, *Journal Research National Bureau of Standards*, 1937, **19**, 651-664.
- [25] L. D. Landau, E. M. Lifshitz, *Quantum Mechanics*, Pergamon, London, 1959.
- [26] D. C. Hamilton, M. A. Jensen, Mechanism for Superconductivity in Lanthanum and Uranium, *Physical Review Letters*, 1963, **11**, 205-207.
- [27] B. T. Matthias, W. H. Zacharisen, G. W. Webb, J. J. Englehardt, Melting-Point Anomalies, *Physical Review Letters*, 1967, **18**, 781-783.
- [28] E. R. Scerri, W. Parsons, What Elements Belong in Group 3 of the Periodic Table?, in *Mendeleev to Oganesson: A Multidisciplinary Perspective on the Periodic Table* (eds. E. R. Scerri, G. Restrepo), 140-151, Oxford University Press, New York, 2018.
- [29] R. Harré, J.-P. Llored, Molecules and Mereology, *Foundations of Chemistry*, 2013, **15**, 127-144 (<https://doi.org/10.1007/s10698-013-9181-5>).
- [30] K. Ruthenberg, Paneth, Kant, and the Philosophy of Chemistry, *Foundations of Chemistry*, 2009, **11**, 79-91.
- [31] K. Ruthenberg, The Kantian Response in Paneth's Philosophy of Chemistry, *Kant Studien*, 2010, **101**, 465-479.

- [32] F. Mahootian, Paneth's Epistemology of Chemical Elements in Light of Kant's Opus Postumum, *Foundations of Chemistry*, 2013, **15**, 171-184.
- [33] J. E. Earley, Why There Is No Salt in the Sea, *Foundations of Chemistry*, 2005, **7**, 85-102 (<https://doi.org/10.1023/B:FOCH.0000042881.05418.15>).
- [34] J. E. Earley, How Chemistry Shifts Horizons: Element, Substance, and the Essential, *Foundations of Chemistry*, 2009, **11**, 65-77.
- [35] C. Boyce, Mendeleev's Elemental Ontology and Its Philosophical Renditions in German and English, *HYLE-International Journal for Philosophy of Chemistry*, 2019, **25**, 49-70.

Didattiche innovative: il contributo delle pedagogie e delle discipline

Carlo Cappa,^a Elena Ghibaudi,^b Francesca Tovena,^c Mariano Venanzi^d

^aDipartimento di Storia, Patrimonio Culturale, Formazione e Società dell'Università di Roma "Tor Vergata"; ^bDipartimento di Chimica dell'Università di Torino; ^cDipartimento di Matematica dell'Università di Roma "Tor Vergata"; ^dDipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche dell'Università di Roma "Tor Vergata"
e-mail: venanzi@uniroma2.it

Abstract: This contribution reports, in the form of an interview, the contents of a round table dedicated to the teaching innovation provided by the integration of pedagogical and disciplinary teachings. This round table has been held on 2022 in the framework of "Future Sight Tor Vergata", a series of events promoted on occasion of the 40th anniversary of the University of Rome Tor Vergata (UTV).

Keywords: didattica innovativa; pedagogia; didattica disciplinare; epistemologia; integrazione fra le discipline; Teaching and Learning Centers

In questo testo riportiamo, sotto forma di intervista, i contenuti di una tavola rotonda dedicata al contributo delle pedagogie e delle didattiche disciplinari alla innovazione della didattica tenutasi il



24-28 OTTOBRE 2022, IL QUARANTENNALE
DELL'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA TOR
VERGATA

26 ottobre 2022 nel quadro di 'Future Sight Tor Vergata', una serie di eventi promossi in occasione dei 40 anni di attività della Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" (UTV).

Hanno partecipato alla tavola rotonda, Carlo Cappa, professore ordinario di Storia della Pedagogia (UTV), Elena Ghibaudi, ricercatrice di Chimica Generale e Inorganica dell'Università di Torino, Francesca Tovena, professore associato di geometria, (UTV) e Mariano Venanzi, professore ordinario di Chimica Fisica (UTV), in veste di moderatore.

La registrazione integrale della tavola rotonda è disponibile sul sito: <https://torvergata40.uniroma2.it/eventi/didattiche-innovative-il-contributo-delle-pedagogie-e-delle-discipline/>

INTERVENGONO



Mariano Venanzi (MV) – Quando mi è stato proposto di organizzare una tavola rotonda sull'innovazione didattica, mi sono chiesto quale è lo snodo decisivo per migliorare gli standard di insegnamento dei nostri docenti e di apprendimento dei nostri studenti. A me pare che il punto cruciale sia l'incrocio tra le competenze pedagogiche e quelle più strettamente disciplinari e, accanto a ciò, una riflessione epistemologica su questi aspetti. Ho voluto, pertanto, chiamare intorno a questo tavolo, il professore Carlo Cappa, ordinario di Storia della Pedagogia presso l'Università di Roma "Tor Vergata", la professoressa Francesca Tovenà, associata di geometria, anche lei dell'Università di Roma "Tor Vergata", che da tempo si occupa di didattica della matematica nei diversi gradi dell'insegnamento, e la dottoressa Elena Ghibaudi, ricercatrice chimica dell'Università di Torino, che da diversi anni si occupa di problemi didattici da un punto di osservazione privilegiato, che è quello epistemologico. Comincerei a chiedere al Professore Carlo Cappa, quali sono, secondo lui, i contributi che un approccio pedagogico può dare al miglioramento del nostro modo di fare didattica.

Carlo Cappa (CC) – Nel domandarsi quale sia il contributo pedagogico alle scienze dell'educazione, inevitabilmente, sorgono una serie di problematiche interne alla questione, perché le scienze dell'educazione interrogano i metodi didattici nei diversi ambiti disciplinari. Qualunque innovazione si colloca sempre all'interno di una duplice cornice istituzionale e ideale. Intendo dire che le scienze dell'educazione sono tradizionalmente impegnate nel pensare l'atto educativo o formativo nella sua interezza e complessità, partendo dalla constatazione di una insufficienza. La consapevolezza dell'esistenza di un problema, di qualcosa che potrebbe essere fatto meglio, è il motore della ricerca pedagogica. È intrinseca alla pedagogia, nella sua epistemologia, una tensione che trasforma l'esistente. In tal senso il pensiero pedagogico non è mai avulso dal prospettare un cambiamento, tanto con la critica puntuale dell'attuale, quanto con la proposta di pratiche innovative.

Le scienze dell'educazione nel rivolgersi ai metodi didattici operano su diversi piani. È fondamentale capire a chi ci si rivolge, quali sono le istituzioni educative, ove i metodi prendono corpo, la loro efficacia nell'apprendimento di conoscenze e competenze e la loro congruità con l'ideale di essere umano, tanto nella sua dimensione individuale, quanto sociale. Un metodo didattico è anche un modo per pensare chi vogliamo formare e come vogliamo formarlo.

Bisogna impegnarsi affinché possa crescere la professionalità degli insegnanti nelle scuole e dei docenti negli atenei. E qui non posso non sfiorare il *punctum dolens* dell'intreccio tra sperimentazione educativa, formazione iniziale degli insegnanti e ricezione delle innovazioni pedagogiche. Nel suo complesso, il sistema di istruzione, università compresa, ha sempre avuto una grande forza di inerzia, che ha spesso costituito un freno ai cambiamenti maturati, tanto all'interno quanto all'esterno del sistema istruzione. Ci sono casi virtuosi, come la scuola di Chicago di Dewey, in cui la sperimentazione educativa creava un circolo virtuoso tra teoria, applicazione e correzione della teoria. Sono casi celebri, ma episodici. Non è un caso che nel nostro paese il ciclo dell'istruzione dove si registra una maggiore attenzione alla dimensione metodologica specifica delle diverse classi educative è quello della scuola primaria, al quale si giunge dopo un percorso universitario quinquennale a ciclo unico, nel quale coesistono i versanti disciplinari, pedagogici, psicologici, e metodologici, coniugati ad approcci didattici sperimentali quali la didattica frontale, i laboratori, il tirocinio diretto e indiretto.

Dovendo individuare alcune coordinate che hanno guidato nel recente passato le innovazioni didattiche proposte, menzionerei la didattica digitale, l'equità, l'inclusione, e, trasversale a queste, la valutazione. Sulla prima non vorrei soffermarmi, perché è stato un tema all'ordine del giorno per tanto tempo. Sugli altri aspetti, da più di un decennio equità ed inclusione, quest'ultima rivolta anche a contesti interculturali, non soltanto ai bisogni educativi speciali o ai disturbi specifici dell'apprendimento, sono punti centrali dell'agenda italiana ed europea. Basti pensare agli incontri che cadenzano il processo di Bologna, e anche ai risultati di Vitalis, l'indagine internazionale sugli insegnanti.

Come detto, la tematica della valutazione è parte integrante della progettazione educativa e accompagna ogni momento dell'educazione. In tal senso, la valutazione o è formativa o non è valutazione. Seppure a riguardo le sperimentazioni siano numerose, la strada da fare, specie nell'istruzione superiore, resta ancora lunga.

Devo dire, che i decisori politici si dimostrano spesso sordi alle acquisizioni scientifiche, giungendo talvolta a osteggiarle. Senza entrare nella polemica tra merito e istruzione, il problema per un pedagogo è che l'istruzione contiene il concetto di merito, non è qualcosa separata dal merito. L'istruzione o ha in sé il merito, con al suo interno anche il concetto di equità o il concetto di inclusione, oppure non è istruzione. Mi sembra che queste possano essere identificate come le direttive delle innovazioni didattiche maggiormente diffuse oggi e nel recente passato.

MV – Merito, valutazione, istruzione sono parole complesse e dovremmo tutti fare molta attenzione al loro uso e consumo. Chiederei a Francesca Tovena: dal tuo punto di vista quanto le discipline possono avvalersi di un approccio pedagogico?

Francesca Tovena (FT) – La pedagogia è focale e centrale in ogni pensiero relativo alla didattica. Cura l'arte di insegnare e pone l'attenzione sull'atto di insegnare, ma anche sugli agenti che sono all'interno, chi spiega e chi ascolta e capisce. Si tratta di un momento di relazione cruciale. Quello che a me sembra interessante è immaginare delle modalità operative, in cui si riesca effettivamente a creare una sinergia efficace. Nella formazione primaria, si è sviluppata una discussione che è durata anni, arrivando a una visione connessa tra le discipline, in modo che ciascuna esprimesse i punti focali e d'arrivo della materia e l'insegnamento fosse visitato in una visione collettiva più integrata. Credo che questa sia una acquisizione di estremo rilievo.

Dal punto di vista delle cose che possiamo fare, abbiamo un'arma in più che è lo sviluppo delle neuroscienze. Quest'arma ci permette di indagare in maniera precisa sulle competenze dello studente, sia dal punto di vista delle competenze primarie, sia dal punto di vista della comprensione di quale sia il modo più naturale per percepire alcune cose. Capiamo la quantità come una lunghezza, o capiamo la quantità come più oggetti separati? In che modo questi due modi di visione entrano quando si tratta di arrivare poi a un concetto più formale o più astratto? È una fase in cui abbiamo un estremo bisogno di collaborazione da parte di chi conosce le discipline e ci lavora in maniera attiva, perché è in grado di definire quali sono gli obiettivi educativi da raggiungere. Però non è possibile farlo senza indicazioni chiare di come elaborare la materia, di come imparare a proporre vari punti di vista e varie tecniche differenti all'interno della stessa materia, applicando quella che è più funzionale. Le affermazioni fatte da grandi didattici, come ad esempio Maria Montessori, riguardo l'utilizzo di materiali concreti, didattici, in cui manipolare, in cui allenare al movimento, far compiere dei movimenti invece di osservare le cose dall'esterno, è essenziale dal punto di vista della crescita dello studente. Lo sviluppo di specifici materiali didattici, fatto in maniera critica, funzionale e attenta, è essenziale per portarlo ad un atteggiamento attivo in cui impara a scoprire buona parte delle relazioni tra gli oggetti. Questo è uno dei punti, l'utilizzo attento, costruito, determinato e ben impostato delle attività di laboratorio.

L'altra lezione nasce dalla necessità di far cooperare le discipline tra di loro. È bene costruire degli argomenti che vengano curati da più docenti con attenzioni differenti, non per mischiare le cose o confonderle, ma per mettere in evidenza la potenza delle singole discipline nella capacità di illustrare la realtà e le cose che si vogliono studiare in maniera più evidente. Questo dà in ogni caso allo studente una percezione complessiva del sapere che non si limita alla conoscenza di specifiche regole. Il punto è capire come farle interagire, quando le possiamo applicare, come le possiamo modificare. Credo che queste siano le fasi in cui le discipline specifiche e le pedagogie possano interagire. A cascata tutta la fase di valutazione, in cui è

cruciale che disciplina e pedagogia convivano per capire, altrimenti non sapremmo nemmeno interpretare le risposte.

MV – Il riferimento alle neuroscienze è importante. Da questo punto di vista la matematica nei suoi aspetti cognitivi fondamentali è davvero un laboratorio privilegiato.

FT – Matematica è una delle materie che segue lo studente per tutto l’arco della crescita, fino all’università. È stata inserita appositamente perché, come le neuroscienze chiariscono in maniera netta, concorre a sviluppare l’interazione neuronale e, quindi, contribuisce in maniera seria allo sviluppo, non soltanto dal punto di vista spaziale o della gestione minimale delle cose, “so fare i resti quando compro qualcosa”, è un livello molto più potente. La matematica ha, purtroppo, anche una storia di fallimenti. A fronte di una presenza importante in ambito scolastico, siamo costretti a registrare delle reazioni di rifiuto in molti ragazzi e in buona parte della popolazione.

Questo ha spinto la riflessione didattica nella matematica in modo importante. Sappiamo di avere per le mani uno strumento che fa crescere i bambini, fa crescere anche gli adulti, rende autonome le persone capaci di ascoltare. Il come ci si riesce non è elementare. Dal mio punto di osservazione, vedo in tempi recenti una grossa crescita di comunità di pratica, che riunisce insegnanti di vario grado e docenti universitari, per discutere che cosa sia bene proporre, in che modo proporlo e in che modo sperimentarlo. Questo è stato sospinto da alcune occasioni create dal Ministero che a volte dà indicazioni faticose, ma altre volte invece suggerisce in positivo. Penso al Piano Lauree Scientifiche, di cui mi piace ricordare il nome del professore Nicola Vittorio, che è un nostro collega, che ha dato vita a un rilancio didattico imponendo una relazione diretta tra università e insegnanti, in modo da facilitare l’ascolto e potenziare la capacità didattica e, contemporaneamente, di ricerca. Il profilo verso il quale stiamo andando è quello dell’insegnante-ricercatore, che è un insegnante che continuamente si pone il problema di come insegnare quello che vuole insegnare e dialoga con gli altri. Se la Matematica può essere di buon esempio nel futuro degli altri, noi vediamo che queste comunità di pratica sono ben guidate, tengono molto a un’attenta progettazione di quello che viene fatto, chiarendo bene quali sono le finalità. Un esempio è quello del liceo matematico, che è appoggiato dall’Unione Matematica Italiana e vede una stretta interazione tra docenti universitari e docenti della scuola. Scelgono insieme gli argomenti, scelgono come insegnarli, progettano i materiali e sviluppano le lezioni progettate nelle ore curricolari. Io vedo una direzione positiva, lenta come sono sempre lenti i cambiamenti, però intravedo una prospettiva non disperante.

MV – I cambiamenti veri hanno sempre bisogno di tempo, come giustamente sottolinei. Io farei entrare in questa discussione Elena Ghibaudi e le chiederei di commentare quello che è stato detto finora da un punto di vista epistemologico.

Elena Ghibaudi (EG) – Sono in sostanziale sintonia con i colleghi, poiché mi sembra che entrambi propongano una visione integrata dell’insegnamento, dell’apprendimento e della formazione degli insegnanti. La parola-chiave di questo dibattito è *innovazione* e io credo che l’innovazione didattica debba innanzitutto comportare lo sviluppo di un pensiero originale, accompagnato da cambi di prospettive e di modalità di azione, che aprano strade che non sono ancora state percorse. Ciò fa appello a una idealità che è necessario avere in mente, almeno come punto prospettico e come ideale da perseguire. La mia prospettiva è quella di qualcuno che lavora in ambito scientifico e, quindi, sono familiare con la didattica della chimica, o allargando un po’ il campo, delle scienze. In questo ambito, contributi innovativi possono provenire da aperture di prospettive di indagine e di collaborazione con settori tradizionalmente un po’ più lontani, come l’ambito pedagogico, quello delle didattiche generali e la psicologia. Per esempio, abbiamo la necessità di sviluppare degli strumenti compensativi *ad hoc* per assistere allievi con DSA nello studio delle scienze e delle materie scientifiche. È un campo che richiede un’interazione forte tra competenze disciplinari scientifiche e di altro tipo.

Nell'insegnamento delle scienze, c'è poi l'esigenza cogente di prestare attenzione agli aspetti processuali delle scienze, ossia al modo in cui il sapere scientifico viene costruito, ciò che alcuni chiamano la *nature of science*, in quanto tali aspetti identificano un substrato comune a tutte le diverse discipline scientifiche. Ciò mi sembra necessario in quanto, oltre alle esigenze di acquisire dei contenuti disciplinari, c'è la necessità di capire come quei contenuti disciplinari sono stati elaborati, quali ne sono i presupposti e anche i limiti, così da essere inseriti dentro un quadro interpretativo che è diverso e specifico per ciascuna disciplina scientifica. Questo lavoro è importante perché consente agli allievi di assegnare un significato a ciò che apprendono e li aiuta a collocare le discipline scientifiche in un rapporto corretto con altre forme di sapere e di conoscenza della realtà. Mi pare che apprendere comporti innanzitutto costruire significati. In quest'ottica un'attenzione agli aspetti epistemologici delle discipline è fondamentale.

I ragionamenti che stiamo facendo oggi guardano al futuro, ma ciò non esclude l'interrogarsi sull'immediato passato. Rispetto a ciò vorrei dire qualcosa che non vuole suonare come una provocazione, ma piuttosto come un invito alla riflessione. Mi pare che in questi ultimi tempi si sia parlato molto di *innovazione didattica*: questa locuzione è risuonata in molte situazioni e in molte occasioni. Ora, mi pare che troppo spesso sia stata suggerita l'equivalenza "innovazione didattica uguale innovazione tecnologica". Nominando l'e-learning, è certo che l'esperienza degli strumenti tecnologici per la didattica, indotta forzatamente dalla pandemia, ci ha consentito di ampliare il parco degli strumenti a disposizione di chi insegna. Vorrei però lanciare un *caveat*, onde evitare semplificazioni eccessive. Questo nostro dibattito non lascia spazio a semplificazioni, in quanto la prospettiva dei colleghi che sono appena intervenuti è complessa, e articolata; tuttavia, non possiamo ignorare che gli eccessi di semplificazione esistono e rischiano di essere dannosi proprio ai fini di una autentica innovazione didattica. Rispetto a ciò, sottolineo la necessità di fare attenzione.

MV – La sollecitazione all'attenzione è sempre preziosa. Abbiamo parlato molto della scuola e del rapporto tra scuola e università. Mi concentrerei sulla didattica universitaria. Carlo, cosa possiamo fare per migliorare gli standard della nostra didattica?

CC – La prima considerazione che mi sento di fare è quella dei luoghi in cui si pensa la didattica universitaria, in cui troppo spesso si assiste a una contrapposizione tra disciplinari e difensori delle scienze dell'educazione. Queste contrapposizioni, di lunghissima data, spesso sfociano in posizioni identitarie che non vogliono trovare un terreno comune, in cui pensare insieme quali possano essere i miglioramenti della didattica universitaria e, a cascata, degli altri gradi d'istruzione. Questo, tra l'altro, genera un'enorme confusione nell'opinione pubblica, perché quando si parla di istruzione ci si rivolge a una platea enorme e, in qualche modo, tutti siamo coinvolti, direttamente o indirettamente, nei processi di apprendimento.

Nelle guerre intorno alla DAD, la didattica a distanza, la maggior parte delle volte la D che era oggetto di interesse era la seconda, non la prima. Era l'elemento di distanza a essere sindacato e non l'elemento della didattica. Sfruttare le potenzialità dell'e-learning non vuol dire che siano tutte immediatamente positive o che tutte si adattino a tutte le popolazioni studentesche e a tutte le discipline. Avere, però, nella propria cassetta degli attrezzi anche degli strumenti di questo tipo è, a mio avviso, una potenzialità in più.

Per pensare dal punto di vista pedagogico la didattica e i lineamenti della didattica occorre uscire dall'illusione che esistano dei modelli didattici buoni per tutte le stagioni e, allo stesso tempo, uscire dall'illusione contrapposta che occorra cambiare tutto. Che si siano contrapposti modelli educativi, intendendo contenuti e metodologie, nella nostra storia occidentale, è un dato di fatto per chi studia la storia dell'educazione. "L'educazione corrente non fa che aumentare i nostri dubbi riguardo alle differenti proposte educative, perché ognuna delle alternative ha trovato difensori". Questa affermazione non è di un testo recente, prodotto nelle discussioni sull'e-learning, è della *Politica* di Aristotele, libro nel quale si parla della costituzione

di Atene e di come questa debba affrontare anche problematiche educative. Già allora c'erano troppe tendenze pedagogiche e possiamo essere tranquilli sul fatto che continueranno a esserci molte visioni della pedagogia.

Le ultime due rapidissime cose che vorrei sottolineare su questo aspetto è il contributo che le scienze dell'educazione possono dare alla figura professionale dell'insegnante. E insisto sul termine professionale, perché deve essere professionale la formazione degli insegnanti e dei docenti universitari. Non è tollerabile la superficialità con cui si decreta, o con cui non si decreta riguardo a questo snodo fondamentale del nostro sistema d'istruzione.

Sono due gli ambiti in cui ci può essere un contributo forte delle scienze dell'educazione. Il primo è quello metodologico, in cui la collaborazione tra specialisti delle scienze dell'educazione e specialisti delle singole discipline deve essere più forte. È tradizione nella nostra cultura pedagogica che questa collaborazione ci sia. Penso ad Aldo Visalberghi, che nel proporre l'Enciclopedia Pedagogica, identificava quattro ambiti, in cui il primo era quello dei contenuti, che unitamente a quello sociologico, pedagogico e psicologico, rappresentavano l'insieme dei quattro settori.

Il secondo ambito in cui le scienze dell'educazione possono intervenire positivamente è quello dello sviluppo di una consapevolezza e sensibilità pedagogica in senso ampio. Credo che per un insegnante-ricercatore sia fondamentale, oltre che la conoscenza dei metodi e della disciplina, anche una vera e propria consapevolezza di quello che è il sistema di istruzione, cioè una consapevolezza delle dinamiche, potenzialità e trasformazioni che lo hanno configurato. Un insegnante-ricercatore deve sviluppare una sensibilità che gli permetta di decifrare quello che gli succede attorno, e trasmettere e collaborare nella costruzione del sapere che è il tramite con i suoi allievi. Quando sono usciti i risultati di grandi indagini internazionali, come OCSE-Pisa o il report Educational Plant 2022, non ce ne è stata praticamente menzione, né sui mezzi di stampa, né da parte dei decisori politici. La country note sull'Italia diceva alcune cose che meriterebbero l'attenzione da parte di tutto il mondo dell'istruzione, università compresa. Credo che siano questi i contributi possibili delle scienze della educazione sulla formazione professionale degli insegnanti e, quindi, sulla innovazione: quello dell'intreccio con le discipline e quello dello sviluppo di sensibilità e di consapevolezza nell'ambito pedagogico.

MV – Una delle cose che reputo positive della legge di fine giugno 2022 che regola la formazione iniziale e in servizio degli insegnanti, e di cui purtroppo a oggi non sono stati pubblicati i decreti attuativi, è la facoltà data alle Università di strutturarsi in centri per l'insegnamento di ateneo. Questi, secondo me, potrebbero diventare il luogo in cui strutturare questa collaborazione tra discipline e ambiti di scienza dell'educazione in maniera puntuale e organizzata. Francesca, pensi che potrebbero rappresentare una prospettiva utile?

FT – Già definire un luogo in cui istituzionalmente ci si occupa della didattica e della formazione è un buon passo avanti. Fino a ora le strutture che avevamo erano dedicate a far funzionare alcuni segmenti dedicati alla formazione degli insegnanti. Il problema della didattica, anche a livello universitario, è un problema enorme e l'aver un centro che sia riconosciuto all'interno dell'ateneo come il punto di discussione dei problemi di didattica è un passo avanti. Ci sono enti di ricerca che se ne occupano, ci sono istituzioni scolastiche di vario grado che chiedono aiuti nel fare formazione interna in una collaborazione paritetica con loro. La mia speranza è che questo centro sia un luogo in cui si possa discutere e iniziare a pianificare la formazione didattica del docente universitario. Un tempo, quando si entrava in università come docenti, si passava un periodo in cui si ascoltavano le lezioni di altri. Erano le stesse lezioni che magari si erano ascoltate da studenti, ma l'ottica del cambio di ruolo permetteva di approfittarne in maniera completamente diversa, chiedendosi perché scegliere un argomento piuttosto che un altro, perché introdurlo in questo modo piuttosto che in altro modo. Adesso, le generazioni più recenti entrano in università senza alcuna formazione di tipo didattico. Io penso che sia

importante farsi carico di questa esigenza, rendendo possibile l'ascolto: partecipare alle lezioni di altri e poterle commentare. Ci sono degli atenei che hanno un progetto di questo tipo, chiamato progetto Mentore. A chi vuole viene data la possibilità di ascoltare e farsi ascoltare da docenti esperti dell'ateneo. Io credo che un centro ben gestito e ben lavorato sia un'opzione in più per intervenire, un passo in più rispetto a quello che abbiamo fatto finora, per lasciare meno soli i docenti universitari davanti al problema di come insegnare.

MV – Chiederei a Carlo se vuole commentare brevemente rispetto questo punto, prima di dare la parola a Elena.

CC – La sola cosa che aggiungerei è che i “Teaching and Learning Centers”, o come li chiameremo, dovranno essere anche un luogo di documentazione e di ricerca e fungere da interfaccia tra l'università e il resto dei cicli dell'istruzione. Nel senso che, se esiste un luogo accademico che non soltanto eroga della formazione, ma che pensa quella formazione, allora rivendico la duplice natura di ogni docente universitario che è certamente didattica, ma che è anche ricerca. A mio avviso, l'accrescimento non è fare ricerca su questa tematica individualmente o con la propria equipe, ma in chiave interdisciplinare. Nel senso che più discipline abbiano un luogo dove possano osservare la stessa questione dalle proprie prospettive, collaborando per trovare soluzioni e per immaginare strade possibili. Che ci sia un luogo fisico riconosciuto anche di sperimentazione e di documentazione è il primo passo per poter agire qualcosa di veramente diverso da quello che abbiamo fatto finora.

MV – Darei la parola a Elena, perché sono sicuro che vorrà commentare anche questa seconda parte del dibattito.

EG – Nuovamente, mi trovo molto d'accordo con i colleghi nel pensare che questi centri per l'insegnamento siano un'opportunità importante per realizzare proprio ciò di cui dicevamo, ossia la necessità di sviluppare un pensiero integrato, che può nascere da una feconda contaminazione reciproca tra diversi ambiti di ricerca. In molte esperienze di formazione realizzate finora (ad esempio le SISS) tali ambiti sono convissuti l'uno accanto all'altro, mentre solo una reale integrazione potrà aprire orizzonti che hanno la necessità di essere sviluppati. Rispetto a ciò, visto che si parla di formazione sia scolastica, sia universitaria e visto che il mio ambito di interesse è l'epistemologia, sento anche l'urgenza di spezzare una lancia perché in questi percorsi di formazione sia previsto uno spazio per la riflessione epistemologica. Da persona che lavora nell'ambito della scienza, la sento come un'urgenza particolarmente forte, perché mi accorgo che l'idea di scienza, presente non solo tra il pubblico non specializzato, ma anche tra i colleghi, è spesso ancora molto ottocentesca: la scienza come una sorta di ragioneria dei fatti, secondo un'ottica fortemente positivista, ossia un'attività che si occupa di fatti oggettivi, li porta alla luce e, facendolo, rivela la realtà fisica quale essa è. Quindi per me la riflessione epistemologica è importante soprattutto per far capire che qualunque sapere disciplinare, incluso quello scientifico, è un contenuto strutturato di pensiero sulla realtà; pertanto, ogni disciplina è caratterizzata da una propria struttura logica ed epistemica, da prassi conoscitive e da ontologie di riferimento che cambiano da un ambito disciplinare all'altro. E, dunque, fare scienza è un'attività interpretativa e non una presa d'atto delle cose così come sono. Insisto che questo è importante per accrescere il bagaglio culturale di tutti e anche per risolvere alcune contraddizioni che io vedo nel modo in cui le scienze sono intese e, conseguentemente, vengono insegnate.

MV – Ci sono parole che sono risuonate e che credo risuonino anche nelle tue corde, quelle di ricerca e didattica.

EG – È stato detto che è importante creare degli spazi di ricerca interdisciplinare nel senso più pregnante e propositivo di questo termine. Sicuramente di questo c'è bisogno, ma ciò implica anche che tutte le discipline debbano dotarsi di aree di ricerca didattica riconosciute, il che per

le discipline scientifiche non è sempre il caso. Ci sono alcune discipline che riconoscono la ricerca didattica, storica ed epistemologica come parte integrante del proprio spazio di ricerca, e altre che, purtroppo, non sono così avanti. Ritengo ci sia l'urgenza di promuovere spazi di ricerca disciplinari che siano direttamente indirizzati alla didattica e, accanto a questa, alla ricerca storica ed epistemologica, che sono collegate alla ricerca didattica almeno per quanto riguarda le discipline. Questa è una esigenza che, ad esempio, molti chimici avvertono.

MV – Chiederei a Carlo e Francesca di intervenire anche loro brevemente su questo punto, se si sentono di commentare.

CC – L'unica cosa che terrei sullo sfondo riguardo la ricerca in didattica, non soltanto rispetto all'insegnamento, ma nel senso più generale, è anche comprendere come si è trasformata l'università in quanto tale negli ultimi anni, perché è mancata una riflessione seria e laica su questo aspetto. Per laica intendo dire non ancorata a visioni troppo ideali dell'università. Capire anche che cosa scricchiola del tardo modello humboldtiano, visto che sono diversi decenni che diciamo che non c'è più. La didattica universitaria, soprattutto dall'ingresso nel processo di Bologna, dalla revisione del 3+2, ha cambiato pelle. È necessario pensare ad una differenziazione delle università, università di ricerca e di didattica, pensare a equilibri differenti. I modelli possono essere diversi, ma devono essere pensati. Soprattutto perché se non lo facciamo noi, lo farà qualcun altro e, quindi, è nostra responsabilità verso gli studenti e verso noi stessi.

FT – È stato sottolineato che è necessaria una sinergia tra tutte le parti per ottenere dei risultati funzionali, ma anche per creare un ambiente in cui il singolo venga continuamente stimolato nei confronti delle modalità con cui insegna, accompagnato e stimolato a tutti i livelli. Bisogna immaginare delle strutture, delle modalità operative, che effettivamente portino questa abitudine a discutere del come si insegna, provare a sviluppare metodologie, ad analizzarle e sperimentarle in maniera assennata. Penso che questo sia un buon indirizzo. So anche come sia complesso realizzare questa sinergia, ma so che questa è la direzione nella quale è conveniente muoversi.

MV – Dovrei dire qualcosa in conclusione, ma non ho conclusioni da proporre. Nel senso che gli argomenti di cui si è discusso hanno bisogno di una riflessione profonda e meditata. L'università deve ripensare sé stessa, a come è cambiata e a come vorrebbe essere, perché questa è una riflessione che manca, che non abbiamo fatto neppure noi che siamo gli attori di questi processi. Ringrazio Carlo Cappa, Elena Ghibaudi e Francesca Tovenà per i loro contributi alla discussione. Tutte le volte che parlo con uno di loro imparo qualcosa e, quindi, ho sfruttato questa occasione per impararne di nuove, spero insieme ai lettori di Chimica nella Scuola.

Corpuscoli ed elettroni: verso un nuovo modello di reazione chimica (redox)

Eleonora Aquilini e Antonio Testoni

Divisione di Didattica della Società Chimica Italiana

e-mail: ele.aquilini6@gmail.com; antonio.testoni55@gmail.com

Abstract: The late 1800s and early 1900s saw the emergence of a revolutionary new model of the atom. An atom that could no longer be conceived as having no structure of its own, but it had to be understood as a complex of particles. Of these particles, the electron was the one that precisely marked the affirmation of the atomic model of matter. Indeed, the belief in the electron as a particle also presupposed a firm belief in the existence of atoms. The existence of ions, evoked in Arrhenius' theory of electrolytic dissociation, confirmed the presence of positive and negative charges due to the transfer of electrons from atom to atom.

Keywords: ione; elettrone; elettricità; atomo; soluzioni; acidi; basi; sali

Premessa

Questo contributo non è e non vuole essere una puntuale ricostruzione storica degli eventi che portarono alla nascita di un nuovo modo (modello) per interpretare e rappresentare le reazioni chimiche (redox), né, tanto meno, vuole ripercorrere tutte le vicende che portarono alla nascita del concetto di elettrone (su questo argomento rimandiamo ai tanti articoli e libri che sono stati pubblicati). Si tratta, invece, di un tentativo per mettere in luce alcuni aspetti, quelli che noi riteniamo più significativi per una trasposizione didattica che abbia al centro anche il “come e il perché dei cambiamenti concettuali intervenuti all’interno della disciplina”, in altre parole i “processi e non solo i prodotti conoscenza”. Ci collochiamo in un periodo storico a cavallo fra l’800 e i primi anni del ’900 del secolo scorso, un periodo che determinò una svolta nell’interpretazione di fenomeni, come quelli che avvengono in una cella elettrochimica. Una svolta che fa perno sul modello dell’elettrone “corpuscolo” ipotizzato e sviluppato da Thomson negli anni 1897-1899 (una particella materiale caratterizzata da una carica e da una massa ben definite). Un modello di elettrone che, visto con gli occhi di oggi, non esiteremmo a considerare assolutamente inadeguato per rappresentare una realtà così complessa, ma che rimane, pur sempre, una pietra miliare nel processo, ancora oggi in corso, di comprensione e di interpretazione della struttura intima della materia. Un processo contrassegnato da un magnifico articolo di Thomson del 1897¹ che, a ragione, viene ritenuto un vero e proprio “*spartiacque nella storia della scienza nonché uno straordinario modello di chiarezza. Un’enorme quantità di scienza del XX secolo prende le mosse da questo articolo e si può affermare che merita pienamente il plauso che ha ricevuto nel tempo...*”.² Ricordiamo che in questo lavoro Thomson non solo dimostra la natura particellare dei raggi catodici, ma determina il rapporto carica/massa di tali corpuscoli e ipotizza che siano particelle subatomiche.

Dal punto di vista storico, come citato prima, ci collochiamo a cavallo fra l’800 e il ’900. Un periodo che segnò, non a caso, anche l’affermazione di un nuovo e rivoluzionario modello di

¹ J. J. Thomson, Cathode rays, *Philosophical Magazine*, 1897, **44**, 293-316.

² G.E. Smith, J. J. Thomson and the electron: 1897-1899. An Introduction, *The chemical Educator*, 1997, **2**, 1-42.

atomo. Un atomo che non poteva più essere concepito come privo di una sua struttura, ma doveva essere inteso come un “complesso edificio costituito da un certo numero di particelle uguali, agenti l’una sull’altra secondo una qualche legge di forza”.³ Di queste particelle, l’elettrone è stato non solo quello primigenio, ma quello che ha segnato proprio l’affermazione del modello atomico della materia, perché la credenza dell’elettrone come particella presupponeva anche una ferma convinzione nell’esistenza degli atomi. Infatti, all’inizio del secolo scorso, la questione della realtà degli atomi era strettamente connessa a quella dell’esistenza degli elettroni e, conseguentemente, a un nuovo modello di atomo.

Se dal punto di vista storico, non c’è ombra di dubbio che “la nascita della fisica dell’atomo [primi anni del ’900] fu un evento rivoluzionario per gli effetti che produsse non solo sulle scienze fisiche, ma anche su quelle chimiche e biologiche” e che “la credenza nella realtà della struttura discreta della materia, nel volgere di una quindicina d’anni, fu rafforzata da una serie impressionante di nuovi risultati teorici e sperimentali”.⁴

Siamo in presenza di un vero e proprio cambio di paradigma nell’interpretazione dei fenomeni, segnato dal passaggio da un modello di atomo indivisibile, che ha caratterizzato la nascita e lo sviluppo dell’atomismo chimico per tutto l’800, a un nuovo modello di atomo divisibile rappresentato dall’atomo elettrico.

Dal punto di vista didattico nascono alcune domande:

- Oggi ha ancora senso dare spazio a questioni, a teorie, a modelli ormai ampiamente superati?
- Perché dovremmo insegnare qualcosa che, in seguito, dovrà essere *disappreso*?
- Non c’è il rischio di indurre idee *fuorvianti* nello studente alle prime armi?
- Non è meglio puntare, fin da subito, su un insegnamento che sia contenutisticamente più aggiornato?
- La questione del *come si è arrivati alla conoscenza di...* è importante? Oppure riteniamo che sia una questione del tutto secondaria rispetto ai contenuti della conoscenza medesima?

Sono questioni assolutamente sensate, centrali non solo nell’insegnamento dell’elettrochimica, ma delle scienze in generale, e che per questo meritano un’attenta considerazione.

A tal riguardo, riportiamo una prima, breve ma significativa riflessione, tratta da un testo di uno dei più grandi pedagogisti del secolo scorso, che cercheremo poi di calare nel contesto della Scuola di Ricerca Educativa e Didattica Chimica “Ulderico Segre” che si è tenuta nel 2022 e che aveva come tema “Osservabili e modelli nella didattica dell’elettrochimica”. Il libro è “*Come pensiamo*” e l’autore è John Dewey. Proprio in riferimento all’insegnamento scientifico, Dewey sottolinea un aspetto importante, spesso sottovalutato: “*Quella specie di elaborazione logica che contrassegna la materia trattata nello stadio della maturità non è l’unica possibile e quella la specie di organizzazione che si trova nel materiale scientificamente elaborato [manuale/libro di testo] è di fatto indesiderabile finché la mente non abbia raggiunto un grado di maturità capace di comprendere perché si adotta proprio questa forma piuttosto che un’altra. In realtà, ciò che è strettamente logico dal punto di vista della materia trattata rappresenta le conclusioni di una mente esperta ed educata*”.⁵ Questa mente non è certo quella di studenti che sono all’inizio di un percorso di studi (poco importa che sia scuola o università). Dal punto di vista degli studenti, è preferibile possedere un modello in grado di *accrescere* la loro capacità di comprensione e di interpretazione dei fenomeni, anche se lo si dovrà abbandonare o modificare più avanti, piuttosto che dover imparare, fin da subito, delle idee più raffinate, più profonde, ma difficilmente

³ J. J. Thomson, Cathode rays, *Philosophical Magazine*, 1897, **44**, 293-316.

⁴ R. Maiocchi, *La “Belle époque” dell’atomo*, Franco Angeli, 1988.

⁵ J. Dewey, *Come pensiamo*, La Nuova Italia, 1999.

assimilabili. I modelli dell'elettrone "*corpuscolo*" di Thomson e dell'atomo "*elettrico*" (Lewis, Thomson, Rutherford, Bohr), in una situazione di approccio iniziale al mondo subatomico, rappresentano il terreno ideale per introdurre un livello della struttura della materia che va oltre quello degli atomi e delle molecole. Quello che era sembrato, fino ad un certo punto, il fondo dell'infinitamente piccolo, ora non lo è più:

Siamo in presenza di un nuovo stato della materia, uno stato in cui la suddivisione della materia è portata al di là di quanto accade nel comune stato gassoso: uno stato in cui tutta la materia è di un solo genere. E questa materia è la sostanza con cui sono costituiti tutti gli elementi.⁶

Thomson non utilizza il termine elettrone, anche se nel 1897 la parola "*elettrone*" esisteva già – essa era stata coniata da G. Stoney nel 1891 – ma parla genericamente di "*corpuscoli negativi*" di cui, come detto prima, calcola il rapporto carica/massa. Un rapporto dal valore insolitamente anomalo che lo spinge a determinare la carica e successivamente la massa per poter meglio caratterizzare questi corpuscoli.

Va comunque precisato che Stoney aveva già stimato la *carica* di quelli che lui definì "*elettroni*" partendo dalle leggi dell'elettrolisi di Faraday. Leggi che costituiscono, senza ombra di dubbio, il contributo più importante dello scienziato inglese all'elettrochimica. Nel 1834, a conclusione delle sue indagini sui processi elettrolitici, Faraday giunse alle seguenti conclusioni.

- Le quantità delle sostanze che si consumano o che si formano nel corso dell'elettrolisi sono proporzionali alla quantità di corrente che attraversava il circuito.
- Per ogni peso equivalente delle sostanze prodotte/consumate viene impiegata una quantità fissa di elettricità (un "*faraday*" pari a 96.496 coulomb).

Le leggi di Faraday vengono spesso considerate come una dimostrazione dell'esistenza di un'unità di carica di tipo atomico. Va, comunque, ricordato che Faraday non era un atomista "alla Dalton" e anche se il termine '*atomo*' compare, occasionalmente, nelle sue opere, l'idea dell'atomo come corpuscolo solido indivisibile e impenetrabile che si muove nello spazio vuoto gli appariva oltremodo dubbia. "*Devo confessare – scriveva Faraday in proposito nelle "Experimental researches in electricity" – che diffido del termine atomo; poiché sebbene sia assai facile parlare di atomi, è molto difficile farsi un'idea precisa della loro natura*". La critica principale di Faraday riguardava, per l'appunto, l'ipotesi del *vuoto*, che contrastava con l'idea, fortemente radicata nelle sue convinzioni religiose, di un Universo pervaso di forze fisiche, in cui si manifestava la potenza di Dio. Egli privilegiò il modello degli atomi puntiformi intesi come centri di forze, piuttosto che come particelle materiali (Faraday concepiva la legge come una conferma dell'idea secondo cui l'affinità chimica non era che una conseguenza dell'attrazione elettrica tra le particelle di diverse sostanze), contrariamente a quanto ipotizzato da Stoney e da Helmholtz, i quali, atomisti convinti, vedevano l'insieme dei fatti quantitativi dell'elettrolisi in modo nettamente diverso da Faraday.

La ricostruzione degli eventi, che ne fa Stoney in un articolo del 1894, chiarisce sinteticamente e molto bene, le loro posizioni, nonché la sequenza temporale delle loro teorizzazioni.

Nel 1881, Hermann von Helmholtz, giunse a queste conclusioni: Il risultato più stupefacente della legge di Faraday è forse questo: se accettiamo l'ipotesi secondo cui le sostanze elementari sono composte da atomi, non possiamo non concludere che anche l'elettricità, sia positiva che negativa, è divisa in definite porzioni elementari che si comportano come "atomi di elettricità". Se facciamo di questa quantità definita di elettricità, che chiameremo

⁶ J. J. Thomson, Cathode rays, *Philosophical Magazine*, 1897, **44**, 293-316.

E, la nostra unità di misura dell'elettricità – aggiunge Stoney – probabilmente avremo fatto un passo molto importante nello studio dei fenomeni molecolari.⁷

Questo perché secondo Stoney a ogni legame chimico rotto all'interno di un elettrolita corrisponde sempre una *stessa carica* (E) associata allo ione (+) e allo ione (–) monovalenti. Idee che Stoney, in effetti, aveva già espresso nel 1874. Infatti, collegandosi al processo di revisione delle *unità di misura elettriche* avviato dalla British Association (1860), Stoney propose di costruire un nuovo sistema di unità di misura a partire da “*unità fondamentali*” (costanti fisiche fondamentali). Due grandezze erano già state individuate: c e G . Nella ricerca di una terza grandezza che riguardasse i fenomeni elettrici, egli giunse a una particolare lettura delle leggi di Faraday sull'elettrolisi, che lo portò ad individuare “*una singola definita quantità di elettricità, sempre presente e invariante rispetto al tipo di reazione elettrolitica*”, che proprio per essere “*invariante*”, si prestava a essere “*l'unità di carica elettrica*” → elettrone (1891).

Avendo così individuato una “*definita quantità di elettricità*” tramite la quale, o tramite multipli di essa, gli atomi sembravano combinarsi chimicamente tra di loro, Stoney ne ricavò il valore: $E \approx 10^{-20} C$. A questa carica unitaria (*quantità definita di elettricità*) Stoney, come ricordato prima, darà il nome di *elettrone*.

Come mai J. J. Thomson nel 1897 non utilizzò questo valore di carica elettrica per ricavare la massa dei suoi corpuscoli, visto che aveva già ricavato il valore del rapporto carica/massa? In altri termini: come mai Thomson chiamò le particelle dei raggi catodici “corpuscoli” e non “elettroni”? Questo gli avrebbe permesso facilmente di avvalorare l'ipotesi di considerare i corpuscoli come particelle subatomiche.

Un conto era pensare, come sino a quel momento si era pensato, che gli atomi o le molecole contenessero una o più cariche unitarie e che queste, come per primo aveva suggerito Stoney, stessero alla base dei legami chimici e dei fenomeni elettrolitici. L'atomo, in questo modo, risultava certamente una struttura complessa, ma pur sempre indivisibile. Un altro conto, invece, era supporre, come fece Thomson nel 1897, che l'atomo non solo fosse costituito da particelle materiali cariche – i corpuscoli – ma che esso potesse rompersi e scindersi in questi corpuscoli: in questo caso l'indivisibilità dell'atomo, che, fino a quel momento, non era mai stata messa in discussione, veniva a cadere. Ribadiamo che questo è un *passaggio cruciale*, che andrebbe adeguatamente puntualizzato e valorizzato in ambito didattico; non solo la fisica, ma anche *la* chimica dopo Thomson volta pagina: non solo i fenomeni vengono interpretati e reinterpretati in un'ottica completamente diversa, ma ad esempio, vengono formulate le prime teorie sul legame chimico (si ricorda che la prima formalizzazione della teoria di Lewis è del 1901-1902). Da questo ben si capisce che elettrone da un lato e corpuscolo dall'altro, erano nati e continuavano a presentarsi come due entità non necessariamente legate fra loro e come tali dovevano essere trattate.

Pertanto, tra il 1897 e il 1899 Thomson intraprese un intenso programma di ricerca con l'obiettivo di ottenere una misura diretta della *carica* del corpuscolo (conseguentemente anche la massa). Non essendo riuscito in questo intento con i raggi catodici, Thomson prese in esame nuove fenomenologie in cui erano coinvolti corpuscoli con lo stesso rapporto carica/massa di quelli dei raggi catodici, ma che, a differenza di questi, consentivano una misura diretta della carica. Le fenomenologie studiate riguardarono principalmente il comportamento:

1. di un gas investito da una radiazione di raggi X
2. di una superficie metallica colpita da una radiazione ultravioletta
3. di un filamento metallico o di carbone portato all'incandescenza

⁷ G. J. Stoney, Of the “electron”, or atom of electricity, *Philosophical Magazine*, 1894, **38**, 418-420.

La tecnica innovativa che permise tali misure si basò sulla cosiddetta “camera a nebbia di Wilson”,⁸ una metodica che si è rivelata fondamentale nello studio delle particelle subatomiche e che, per ragioni di tempo, non possiamo trattare.

Solo alla fine di questo programma di ricerca Thomson poté verificare che il suo corpuscolo e l’elettrone di Stoney erano la stessa cosa, unendo così due aspetti della realtà che fino ad allora erano sembrati due entità distinte. Particolarmente interessanti e pregnanti sono le conclusioni dei suoi lavori, che Thomson trasse nell’articolo del 1899 e delle quali riportiamo quelle che ci riguardano più da vicino.

Gli esperimenti appena descritti, presi congiuntamente ai precedenti sul valore di m/e per i raggi catodici, mostrano che nei gas a basse pressioni l’elettricità negativa, anche se prodotta con mezzi diversi, è costituita da unità dotate ciascuna di una determinata carica negativa; l’entità di questa carica negativa è di circa 6×10^{-10} unità elettrostatiche [$1,8 \times 10^{-19}$ C] ed è uguale alla carica positiva trasportata dall’atomo di idrogeno nell’elettrolisi delle soluzioni. Nei gas a bassa pressione queste unità di carica elettrica negativa sono sempre associate a portatori di una determinata massa. Questa massa è estremamente piccola, essendo solo circa $1,4 \times 10^{-3}$ di quella dello ione idrogeno, la massa più piccola finora riconosciuta come capace di un’esistenza separata.

Da quel momento in poi le misurazioni della carica del corpuscolo, utilizzando la camera a nebbia, si affinarono sempre più, sia per migliorare la misura della carica sia per ricavare altre costanti universali, come il numero/costante di Avogadro. A tal riguardo, il contributo teorico e sperimentale di Millikan risultò fondamentale. Nel 1913 Millikan, utilizzando una camera a nebbia opportunamente modificata, ottenne per la carica elementare, e quindi anche per l’elettrone, un valore medio di $1,592 \times 10^{-19} \pm 0,003 \times 10^{-19}$ C (un valore che differisce di meno del 1% da quello attuale che è $1,6021892 \times 10^{-19} \pm 0,0000046 \times 10^{-19}$ C) e, conseguentemente, ricavò un valore della costante di Avogadro con un’accuratezza mai vista prima.

La produzione di elettrificazione negativa comporta quindi la scissione di un atomo, poiché da un insieme di atomi si stacca qualcosa la cui massa è inferiore a quella di un singolo atomo... i corpuscoli distaccati si comportano come ioni negativi, portando ciascuno una carica negativa costante, che chiameremo per brevità carica unitaria ... I cambiamenti nella carica elettrica su un atomo sono dovuti ai corpuscoli che si spostano dall’atomo quando la carica positiva aumenta, o ai corpuscoli che si spostano verso di esso quando la carica negativa aumenta. Così quando anioni e cationi vengono liberati agli elettrodi nell’elettrolisi delle soluzioni, lo ione con carica positiva viene neutralizzato da un corpuscolo che si sposta dall’elettrodo allo ione, mentre lo ione con carica negativa viene neutralizzato da un corpuscolo che passa dallo ione all’elettrodo. I corpuscoli sono i veicoli attraverso i quali l’elettricità viene trasportata da un atomo all’altro.⁹

Nessuno prima di Thomson si era espresso in questi termini. Come ebbe a dire Bohr (1926), Thomson, concependo l’elettrone come parte integrante di una teoria della struttura della materia, “*ha aperto le porte a una terra sconosciuta alla scienza*” e ha determinato una svolta epocale nella lunga ricerca per comprendere la “*struttura della materia e la natura dell’elettricità*”. Una svolta che ha gettato una luce completamente nuova e feconda anche sui fenomeni elettrochimici.

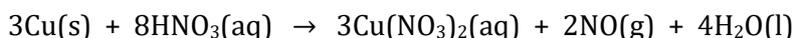
⁸ Per questa invenzione, C. R. T. Wilson verrà insignito del premio Nobel per la Fisica nel 1927.

⁹ J. J. Thomson, On the masses of the ions in gases at low pressures, *Philosophical Magazine*, 1899, **48**, 547-567.

Il concetto di “*trasferimento di elettroni fra atomo e atomo*” nasce e prende corpo da queste idee, scaturite, per l'appunto, dal lavoro di Thomson. Non da ultimo, in questo articolo risulta ancor più evidente il carattere innovativo del significato che egli attribuì al termine “*elettrone*” rispetto a Stoney e che, per certi versi, ne giustifica anche la paternità della “*scoperta*”.

Da tale nuova visione dei processi elettrochimici, nel volgere di pochi anni, si affermò anche un nuovo modo per bilanciare le reazioni basate sulla conservazione degli “*elettroni corpuscolo*”, cioè degli elettroni atomici. Un modo che si aggiunse ad altri metodi già messi a punto dai chimici nel corso della seconda metà del 1800, come ad esempio, il metodo della conservazione della valenza.

A seguito della generalizzazione dell'ossidazione come aumento di valenza e la riduzione come diminuzione della valenza, la quantità conservata diviene ora il cambiamento di valenza:



ossidazione: $[\text{Cu}^0 \rightarrow \text{Cu}^{\text{II}}(\text{NO}_3)_2]$ guadagno di valenza = $\Delta V = 2$

riduzione: $[\text{H}(\text{N}^{\text{V}}\text{O}_3) \rightarrow \text{N}^{\text{II}}\text{O}]$ perdita di valenza = $\Delta V = 3$

Da cui:

ossidazione: $3[\text{Cu}^0 \rightarrow \text{Cu}^{\text{II}}(\text{NO}_3)_2]$ guadagno di valenza netto = $3 \times \Delta V = 3 \times 2 = 6$

riduzione: $2[\text{H}(\text{N}^{\text{V}}\text{O}_3) \rightarrow \text{N}^{\text{II}}\text{O}]$ perdita di valenza netta = $2 \times \Delta V = 2 \times 3 = 6$

Questo approccio fu per la prima volta articolato dal chimico americano Otis Coe Johnson nel 1880.¹⁰

La proposta di Johnson¹¹ è, per certi versi, sbalorditiva nella sua attualità:

My method is a chemical one, and is derived directly from principles of oxidation. It is founded upon a system of negative bonds. I here use the term bond in a sense partially new, which can better be understood by the illustrations that follow than by any definition which can be framed.

By the bonds of an element is meant the amount of oxidation it has sustained, or a bond is the measuring unit of oxidation.* The terms positive and negative are used not in an electrical but in a strictly numerical sense. The bonds of an element may always be ascertained with certainty by one of the following rules:—

- (1.) Free elements have no bonds, and may be represented by zero, written thus— Cl^0 or Cl_2^0 , Ba^0 , Al^0 , &c.
- (2.) Hydrogen in combination has always one bond, and it is positive, written thus, H^{I} .
- (3.) Oxygen in combination has two bonds, always minus, written thus, $\text{O}^{-\text{II}}$.
- (4.) The bonds of the metals in combination are usually plus. The most prominent exceptions are their combinations with hydrogen, $\text{Sb}^{-\text{III}}\text{H}^{+\text{III}}$, $\text{As}^{-\text{III}}\text{H}^{+\text{III}}$.
- (5.) The sum of the bonds of any compound is always zero. Thus, $\text{H}^{\text{I}}\text{N}^{+\text{V}}\text{O}_3^{-\text{VI}}=0$; that is, the H has one positive bond, the N five positive bonds, and each atom of O has two negative bonds, and the three atoms have

six negative bonds: six positive bonds added to six negative equals zero. In the same way, $\text{H}^{\text{I}}\text{Cl}^{+\text{V}}\text{O}^{-\text{VI}}=0$, $\text{H}_2^{\text{II}}\text{S}^{+\text{VI}}\text{O}_4^{-\text{VIII}}=0$, $\text{H}_3^{\text{III}}\text{P}^{+\text{V}}\text{O}_4^{-\text{VIII}}=0$, $\text{Ba}^{\text{II}}\text{O}_2^{-\text{IV}}\text{H}_2^{+\text{II}}=0$, $\text{Fe}_2^{\text{VI}}\text{O}_6^{-\text{XII}}\text{H}_6^{+\text{VI}}=0$, $\text{Ba}^{\text{II}}\text{H}_4^{+\text{IV}}\text{P}_2^{+\text{X}}\text{O}_8^{-\text{XVI}}=0$.

(6.) Acid radicals are always negative, $\text{H}^{\text{I}}\text{I}^{+\text{V}}\text{O}_3^{-\text{VI}}=0$, or $\text{H}^{\text{I}}(\text{IO}_3)^{-\text{I}}=0$, $\text{Pb}_3^{\text{VI}}\text{P}_2^{+\text{X}}\text{O}_8^{-\text{XVI}}=0$, or $\text{Pb}_3^{\text{VI}}(\text{PO}_4)^{-\text{VI}}=0$.

The bonds of the radicals being equal to the number of atoms of hydrogen with which it is capable of combining. An oxidising agent is one that can increase the number of bonds of some other substance; hence oxidation of one substance must involve the reduction of some other. The number of bonds gained by one are lost by the other. The real bonds are transferred from the oxidising to the reducing agent. Thus in the equation—

$$2\text{PbCrO}_4 + 5\text{Zn} + 16\text{HCl} = 2\text{Pb} + \text{Cr}_2\text{Cl}_6 + 5\text{ZnCl}_2 + 8\text{H}_2\text{O}$$

it can be proven that the ten bonds lost by the lead chromate are transferred to the zinc.

From these principles is derived a rule for writing equations, by which every equation involving oxidation may be balanced almost at a glance, if we know the products

¹⁰ W. B. Jensen, Balancing redox equation, *Journal of Chemical Education*, 2009, **86**, 681-682.

¹¹ O. C. Johnson, Negative bonds and rule for balancing equations, *Chem News*, 1880, **42**, 51.

Dopo Thomson, il bilanciamento delle reazioni redox con il metodo delle due semi-reazioni basato sulla conservazione degli elettroni atomici, si impose a quello proposto da Johnson, basato invece sulla conservazione della valenza, come dimostrato da una serie di importanti contributi pubblicati all'inizio del 1900 (Fry 1912, Fry 1914, Fry 1915, Brinkley 1925, Jette e La Mer 1927, Hall 1929). Per brevità, ne citiamo uno (quello che, in poche battute, chiarisce molto bene questo punto):¹²

La teoria di Johnson della riduzione e dell'ossidazione è sorprendentemente simile alle visioni più moderne; tanto è vero, infatti, che quando la teoria elettronica fu enunciata per la prima volta, ogni insegnante che aveva usato il metodo di scrittura delle equazioni di Johnson vide subito l'applicazione della teoria elettronica alle reazioni di ossido-riduzione. A dire il vero, Johnson ha enfatizzato i legami negativi, ma quello che ha detto sui legami negativi si può dire di quelli che oggi chiamiamo elettroni.¹³

Completiamo ora questa presentazione soffermandoci ad analizzare un ultimo contributo, che è una parte molto importante della nostra narrazione e che non è stato ancora affrontato. Ci riferiamo alla Teoria della dissociazione elettrolitica di Arrhenius (1884 - 1887). Una teoria che rappresenta un tassello fondamentale del contesto che stiamo delineando. Se Thomson nel 1899 è giunto alle conclusioni che abbiamo visto prima e parla di "trasferimento di elettroni fra atomo e atomo", è stato grazie anche al contributo decisivo di Arrhenius il fatto di aver chiarito, ad esempio, che gli ioni Na^+ e Cl^- sono già presenti nella soluzione acquosa di NaCl e non vengono, invece, generati dalla d.d.p. che viene applicata alla cella contenente la soluzione salina, come fino a quel momento si era pensato. Questo è un passaggio cruciale che verrà approfondito nella parte che segue.

La teoria di dissociazione elettrolitica

Dagli esperimenti di Michael Faraday era noto che una parte positiva e una parte negativa di una molecola potessero migrare verso gli elettrodi a carica opposta della cella elettrolitica sotto l'influenza dell'elettricità. La teoria della dissociazione elettrolitica fu pubblicata da Svante Arrhenius nel 1887 e si riferisce al discioglimento in acqua di acidi, basi e sali che si dividono spontaneamente in ioni carichi positivamente e negativamente.¹⁴ Già nella sua tesi di dottorato del 1884 aveva fatto cenno alla teoria, ma a causa della contrarietà del suo mentore, il Professor Teodor Cleve, scelse di parlare di parti attive e inattive della molecola. Le prove raccolte da Arrhenius a sostegno della sua teoria sono presenti nella pubblicazione del 1887 e sono poi ampiamente argomentate nel suo libro di testo sull'elettrochimica,¹⁵ nella Nobel Lecture del 1903 e nella sua conferenza Silliman a New Haven.¹⁶

I risultati di queste prove sono ben sintetizzati da Kevin De Berg¹⁷ e riguardano esperimenti di conducibilità elettrica, di depressione del punto di congelamento, di pressione osmotica e di abbassamento della pressione di vapore.

¹² Occorrerà però aspettare la ponderosa opera di W. M. Latimer del 1938 sugli stati di ossidazione degli elementi e sui potenziali di ossidazione per una definizione più puntuale di stato di ossidazione e numero di ossidazione.

¹³ W. T. Hall, Oxidation-reduction reactions, *Journal of Chemical Education*, 1929, **6**, 479-485.

¹⁴ S. Arrhenius, Über die dissociation der in wasser gelösten stoffe, *Zeitschrift für Physicalische Chemie*, 1887, 631-648.

¹⁵ S. Arrhenius, *Textbook of Electrochemistry* (translated by John McCrae), Longmans, London, 1902.

¹⁶ S. Arrhenius, Electrolytic dissociation, *Journal of the American Chemical Society*, 1912, **34**, 353-364.

¹⁷ K. C. De Berg, The development of the theory of electrolytic dissociation, *Science & Education*, 2003, **12**, 397-419.

La conducibilità elettrica

Il fatto che le soluzioni saline conducano elettricità per Arrhenius era di supporto all'esistenza di specie cariche. Particolarmente significativa era la *relazione fra la conduttività e il grado di diluizione del sale*.

A mano a mano che la diluizione aumentava, la conducibilità molare aumentava fino a raggiungere un valore limite. Arrhenius propose che esistesse una parte attiva e una parte inattiva e la proporzione della parte attiva aumentasse con la diluizione secondo lo schema:



A diluizione infinita esistono solo le due specie dissociate e il grado di dissociazione può essere calcolato come il rapporto fra la conduttanza molare a qualsiasi concentrazione e quella a diluizione infinita (Figura 1).

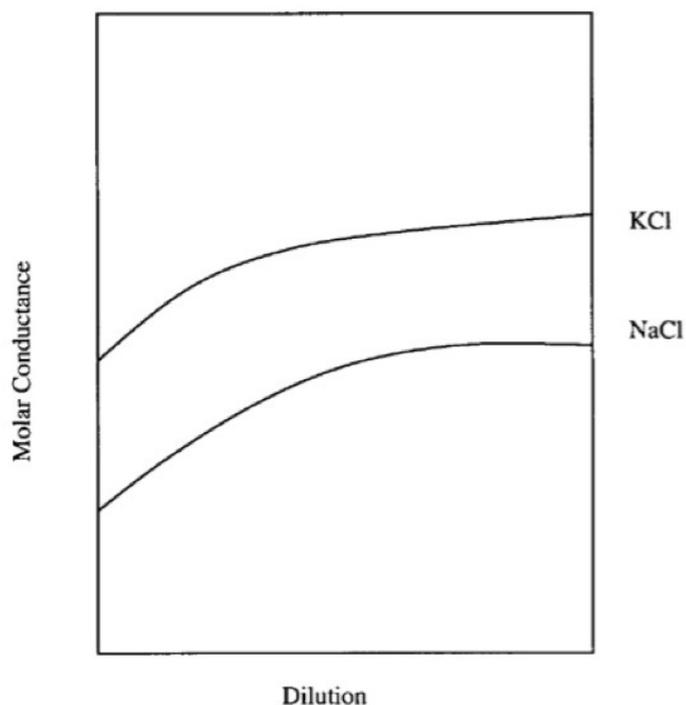


Figura 1. Forma generale del grafico della conduttanza molare contro la diluizione per due soluzioni saline, NaCl e KCl (nessuna unità di misura indicata da Arrhenius); tratto da De Berg, 2003

Wilhelm Ostwald diede un gran sostegno ad Arrhenius e alle sue idee sulla dissociazione elettrolitica (Legge della diluizione di Ostwald). Nel 1888 applicò la legge dell'equilibrio all'equazione di ionizzazione parziale:



E dedusse che il rapporto $\alpha^2c/(1-\alpha)$ doveva essere una costante, dove α è il grado di dissociazione e c la concentrazione dell'elettrolita in acqua.

Come si evince dalla figura 2, su una variazione di concentrazione di 15000, i valori della costante cambiano di circa il 14% e non è, quindi, irragionevole supporre che il rapporto sia effettivamente costante. Questo significa che il grado di dissociazione aumenta con la diluizione.

<u>Volume in litres in which one mole of acetic acid is dissolved</u>	<u>Electrical conductivity</u>	<u>K(Equilibrium constant) at 14.1°</u>
0.994	1.27	1.63×10^{-5}
2.02	1.94	1.88×10^{-5}
15.9	5.26	1.76×10^{-5}
18.9	5.63	1.71×10^{-5}
1500	46.6	1.69×10^{-5}
3010	64.8	1.76×10^{-5}
7480	95.1	1.73×10^{-5}
15000	129	1.87×10^{-5}
∞	316	-

Figura 2. Dati sulla costante di equilibrio per l'acido acetico basati sui risultati di van't Hoff; tratto da De Berg, 2003

La depressione del punto di congelamento

Arrhenius studiò i dati di Raoult sull'abbassamento del punto di congelamento (Figura 3). Rispetto a un fattore di abbassamento molecolare calcolato di 18,6 per molecole non dissociate in soluzione, notò che un certo numero di soluzioni davano valori molto diversi da quelli attesi (da 1,66 a 2,10 volte superiori al valore calcolato). Arrhenius attribuì alla dissociazione in ioni gli effetti anomali sul punto di congelamento.

Solutions in Water			
(Calculated Molecular Lowering Factor, 18.6)			
Methyl alcohol	17.3	Hydrochloric acid	39.1
Ethyl alcohol	17.3	Nitric acid	35.8
Glycerol	17.1	Sulphuric acid	38.2
Cane sugar	18.5	Potassium hydroxide	35.3
Formic acid	19.3	Sodium hydroxide	36.2
Phenol	15.5	Potassium chloride	33.6
Acetic acid	19.0	Sodium chloride	35.1
Butyric acid	18.7	Calcium chloride	49.9
Ether	16.6	Barium chloride	48.6
Ammonia	19.9	Potassium nitrate	30.8
Aniline	15.3	Magnesium sulphate	19.2
Oxalic acid	22.9	Copper sulphate	18.0

Figura 3. Risultati ottenuti da Raoult relativi all'abbassamento molecolare del punto di congelamento per soluzioni in acqua; tratto da De Berg, 2003

La pressione osmotica

Van't Hoff, contemporaneo di Arrhenius, osservò che la pressione osmotica soddisfaceva un'equazione simile all'equazione del gas ideale con le moli di gas sostituite dalle moli di soluto e il volume del recipiente del gas sostituito dal volume della soluzione:

$$P = (n/V) \times RT \qquad \pi = c \times RT$$

Le soluzioni saline come il cloruro di sodio davano pressioni osmotiche quasi doppie rispetto a quelle previste e Arrhenius notò che questo poteva essere spiegato sulla base della dissociazione ionica.

Nel suo libro del 1902 Arrhenius utilizzò i risultati di De Vries del 1888, riguardanti i coefficienti isotonici che rappresentano le concentrazioni di soluzioni richieste per pressioni osmotiche uguali, basate su un valore di 3 per il nitrato di potassio (Figura 4). Una soluzione di 3

mol/L di glicerolo avrebbe, pertanto, la stessa pressione osmotica di una soluzione di nitrato di potassio contenente 1,78 mol/L.

<u>Substance</u>	<u>Isotonic coefficient</u>
Glycerol	1.78
Glucose	1.88
Cane sugar	1.81
Malic acid	1.98
Tartaric acid	2.02
Citric acid	2.02
Magnesium sulphate	1.96
Potassium nitrate	3.00
Potassium chloride	3.00
Sodium chloride	3.00
Potassium iodide	3.04
Sodium nitrate	3.00
Sodium iodide	2.90
Sodium bromide	3.05
Potassium acetate	2.85
Potassium bromide	3.05
Potassium sulphate	3.90
Calcium chloride	4.05
Potassium citrate	4.74

Figura 4. Coefficienti isotonici per differenti soluzioni, assumendo valore 3 per la soluzione di nitrato di potassio; tratto da De Berg, 2003)

L'abbassamento della pressione di vapore

Nella tabella riportata da Arrhenius nel 1902¹⁸ sali monovalenti abbassano la pressione di vapore di quasi il doppio rispetto a ciò che ci aspetterebbe senza dissociazione e sali trivalenti, come ad esempio CaCl_2 , la abbassano di circa 2,5 volte (Figura 5).

<u>Substance</u>	<u>Vapour pressure(mm Hg) lowering for 0.5 moles in 1000 grams of water.</u>
Calculated value (no dissociation)	6.8
Potassium chloride, KCl	12.2
Sodium chloride, NaCl	12.3
Potassium hydroxide, KOH	15.0
Aluminium chloride, AlCl_3	22.5
Calcium chloride, CaCl_2	17.0
Sodium sulphate, Na_2SO_4	12.6
Succinic acid, $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4$	6.2
Citric acid, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$	7.9
Lactic acid, $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$	6.5
Boric acid, $\text{B}(\text{OH})_3$	6.0
Sulphuric acid, H_2SO_4	12.9

Figura 5. Abbassamento della pressione di vapore (mmHg) per 0,5 moli di sostanza dissolta in 1000 g di acqua; tratto da De Berg, 2003

Arrhenius, Ostwald e van't Hoff si convinsero che tutte le proprietà citate (conducibilità elettrica, depressione del punto di congelamento, pressione osmotica, abbassamento della pressione di vapore) dipendessero dalla dissociazione parziale in ioni.

¹⁸ S. Arrhenius, *Textbook of Electrochemistry* (translated by John McCrae), Longmans, London, 1902.

Anche altre proprietà, come ad esempio il calore di neutralizzazione acido/base (quantità equivalenti di calore indipendenti dall'entità dell'acido e della base), venivano considerate importanti per giustificare l'ipotesi della dissociazione elettrolitica.

In generale si notava in queste proprietà una dipendenza dal *numero di specie* in soluzione.

Le critiche alla teoria di Arrhenius

Le obiezioni alla teoria della dissociazione elettrolitica, come sintetizzato da De Berg,¹⁹ riguardavano principalmente l'esistenza in soluzione degli ioni di carica opposta che avrebbero dovuto in qualche modo ricombinarsi.

Scrivono E. F. Herroun nel 1896 *"Perché gli ioni, se liberi di muoversi sotto l'influenza di forze elettriche esterne, non si attraggono con forze immense se sono carichi di tali enormi quantità di elettricità positiva e negativa...da dove hanno preso queste cariche in primo luogo?"*

E Pickering si chiede: *"Possono gli atomi, per esempio il cloro e l'idrogeno, uniti così saldamente insieme, volare via spaventati l'uno dall'altro al solo avvicinarsi di alcune molecole d'acqua, che sono rappresentate come più o meno inerti e prive di qualsiasi forte attrazione per gli atomi dissociati? [Possono questi atomi] così fortemente carichi di elettricità di segno opposto, vagare nel liquido con un supremo disprezzo per i loro precedenti associati e le cariche attrattive che essi portano?"*

Del resto, Armstrong nel 1896²⁰ aveva chiamato la nuova teoria "l'ipotesi non sensata della dissociazione ionica" (che asserisce che il cloruro di idrogeno e alcuni altri composti cadano a pezzi quando si dissolvono in acqua). L'idea di Armstrong (1896) e di Pickering (1897) era che la soluzione riguardasse *un fenomeno di associazione con l'acqua piuttosto che un fenomeno di dissociazione in ioni*.

Le proprietà della pressione di vapore, del punto di congelamento e dell'osmosi erano imputabili al numero di molecole di "idrone" libero (H₂O). Quindi la depressione della pressione di vapore era dovuta a un minor numero di molecole di idrone libere disponibili nel liquido.

Nel caso della soluzione con acido cloridrico, secondo Armstrong, una molecola di HCl immobilizza due molecole d'acqua, con conseguente abbassamento della pressione di vapore.

Il ruolo del solvente era, quindi, considerato diverso dagli oppositori della teoria della dissociazione in ioni. Armstrong, tuttavia, rivendicava correttamente il ruolo dell'acqua nel processo di soluzione.

È interessante la posizione di W. Dampier Whetham: *"La dissociazione degli ioni l'uno dall'altro non vieta l'ipotesi che gli ioni siano legati ad una o più molecole di solvente"*.

Armstrong fu critico nei confronti di questa posizione considerata diplomatica e di compromesso.

L'idratazione degli ioni forniva un modo per conciliare le due teorie e un motivo per giustificare la dissociazione elettrolitica di un sale.

È curioso come Armstrong mise in discussione l'uso della misurazione fisica e delle formule chimiche derivate dagli esperimenti in una disciplina come la chimica.

Armstrong nel 1928, citando Sir Oliver Lodge, disse che "i chimici si sono lasciati ingannare da un'infarinatura di quasi matematica e da un eccesso di formule empiriche" e che "il chimico fisico non è stato né chimico, né fisico nel cuore. La mutazione da chimico a chimico fisico sembra aver certamente comportato la perdita del fattore primario della chimica: il sentimento chimico". Aggiunse anche che Pickering (verso la fine della sua carriera) "cadde vittima della malattia moderna, la misurazione fisica, inevitabile, senza dubbio, come il morbillo".²¹

Armstrong rimase un acerrimo oppositore anche quando W. L. Bragg pubblicò i risultati del suo studio a raggi X del cloruro di sodio e concluse che non esistevano molecole di cloruro di

¹⁹ K. C. De Berg, The development of the theory of electrolytic dissociation, *Science & Education*, 2003, **12**, 397-419.

²⁰ H. E. Armstrong, Letters to the editor, *Nature*, 1896, **55**, 78-79.

²¹ H. E. Armstrong, The nature of solutions, *Nature*, 1928, **121**, 48-51.

sodio, NaCl, ma ioni sodio e cloruro distribuiti a scacchiera in un reticolo tridimensionale. Infatti, nel 1927 sentenziò definitivamente che questo modello “è ripugnante al senso comune, assurdo all’ennesima potenza ... La chimica non è né scacchi, né geometria, qualunque sia la fisica dei raggi X”.

Il modello di Bragg dava grande sostegno alla teoria della dissociazione ionica, poiché si poteva concludere che gli ioni esistevano già nel solido e il processo di soluzione semplicemente li separava.

Conclusioni

De Berg nel 2004²² ha citato proprio l’esempio della storia della dissociazione elettrolitica, per illustrare la differenza fra la storia della scienza e il suo utilizzo nell’insegnamento. Ha chiamato *storia pedagogica* la contestualizzazione storica che permette di capire lo sviluppo delle idee scientifiche.

Una storia pedagogica si differenzia dai casi di storia della scienza (HOS) pubblicati da Klopfer... in quanto include informazioni relative all’insegnamento e all’apprendimento di un particolare concetto tratte dalla letteratura di ricerca. Lo scopo dello sviluppo di una storia pedagogica di un concetto chimico è quello di mostrare agli studenti come un’idea chimica sia stata sviluppata da informazioni rudimentali a un concetto sostanziale, utilizzando importanti informazioni sulle concezioni alternative che gli studenti hanno dimostrato di possedere e combinandole con importanti considerazioni storiche e filosofiche tratte dalla letteratura. La storia e la filosofia sono state concepite per ridare vita a ciò che Norman Robert Campbell (1953) ha definito "le ossa secche della conoscenza da cui è partito il respiro". La conoscenza di concezioni alternative ha lo scopo di aiutare gli studenti a passare da quelle che spesso sono conoscenze di senso comune a conoscenze scientifiche.

²² K. C. De Berg, The development and use of a pedagogical history for a key chemical idea: the case of ions in solution, *Australian Journal of Education in Chemistry*, 2004, **64**, 16-19.

Applicazioni comuni di reologia dei polimeri

Parte I: fluidi non-Newtoniani

Vincenzo Villani

Laboratorio di Chimica delle Macromolecole,
Dipartimento di Scienze, Università della Basilicata
e-mail: vincenzo.villani@unibas.it

Abstract: In Elementary Principles of Polymer Rheology, found in the *Keywords section* of this issue, the fundamentals of viscosity of polymer materials have been introduced and pseudoplastic, dilatant, thixotropic, rheopectic, and plastic non-Newtonian behaviors have been discussed. In this contribution some significant cases of non-Newtonian behavior of common polymers will deal with. It is a very vast subject which often, due to its complexity, is not explored in school programs, but whose knowledge is increasingly required in current technological applications.

Keywords: fluidi tixotropici; fluidi reopectici; liquidi di Bingham; addensanti; gelificanti; Effetto ketchup

Un viaggio nei polimeri che incontriamo quotidianamente

I *fluidi tixotropici*, la cui viscosità diminuisce durante il flusso, sono comuni per le soluzioni di polisaccaridi e polipeptidi utilizzate nell'industria alimentare, cosmetica, farmaceutica, delle vernici, ecc. Al contrario, questo stato è poco comune per i polimeri allo stato fuso, il cui flusso è attivato dall'agitazione termica ad alta temperatura.

Un comune fluido tixotropico è il *ketchup* che passa per agitazione dalla fase *gel* a quella *sol*; le sue proprietà reologiche sono essenzialmente dovute ai polisaccaridi modificatori di reologia, come la pectina o la gomma xantana. In ambito tecnologico, abbiamo elastomeri liquidi (sigillanti siliconici) e vernici tixotropiche (a base di acido polimetacrilico, PMAA, Figura 1).

Questi liquidi, in quiete formano un labile *polymer network*, tuttavia durante il flusso danno la transizione *gel* → *sol* che permette una posa facile e senza gocciolamento.

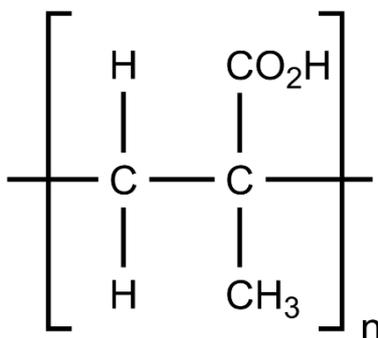


Figura 1. Struttura molecolare dell'acido polimetacrilico, PMAA

Per un *fluido reopectico*, la cui viscosità aumenta durante il flusso, si genera una struttura interna che si oppone allo scorrimento: durante transizione *sol* → *gel*, gli aggregati isolati dello stato *sol* sono via via trasformati nell'aggregato connesso dello stato *gel* del fluido macromolecolare. Un comune fluido reopectico è la maionese, emulsione di olio-in-acqua, stabilizzata dalla

lecitina (un fosfolipide, Figura 2) del tuorlo d'ovo, che agisce da *tensioattivo*: sotto l'azione del flusso, le micelle si interconnettono formando una rete.

Altresì, sono tixotropici lo yogurt, in cui la caseina denaturata forma il *protein network*, e la sospensione acqua-argilla nella produzione della ceramica.

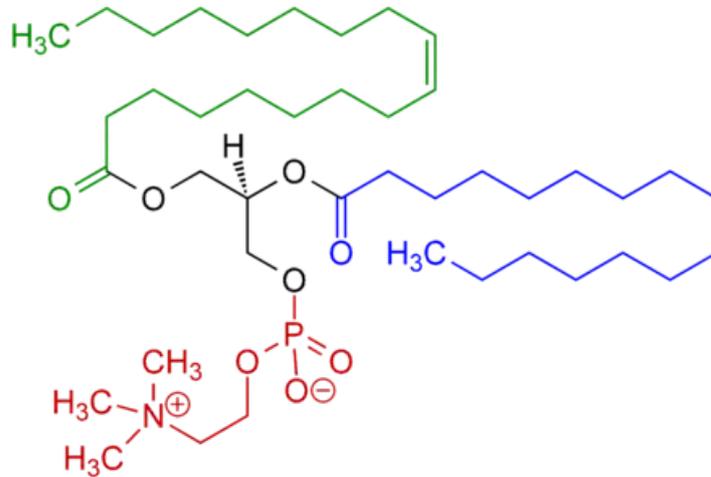


Figura 2. Formula di struttura della lecitina

I *liquidi plastici* o di Bingham, possono essere sia tixotropici che reopettici: sono caratterizzati dal fatto che presentano uno *sforzo di soglia allo scorrimento*, ovvero cominciano a scorrere solo al di sopra di un dato sforzo. Questo comportamento è dettato dalla presenza di una rete estesa di interazioni di non-legame del tipo legame idrogeno o aromatiche $\pi-\pi$. Si comportano come solidi fino alla soglia detta *yield-stress* $\tau = \tau_y$ con modulo di taglio G , mentre per $\tau > \tau_y$ scorrono come fluidi in modo lineare o non-lineare. Un comune liquido plastico è il dentifricio (a base di silicati o polisaccaridi come addensanti). Altresì, un composito termoplastico (il polistirene, ad esempio) o elastomerico (di gomma naturale o gomma stirene-butadiene, ad esempio) allo stato fluido, caricato con particelle di nerofumo (*carbon black*) o silice amorfa in percentuale sufficientemente alta, presentano una soglia di sforzo allo scorrimento e si comportano da fluido di Bingham (Figura 3).

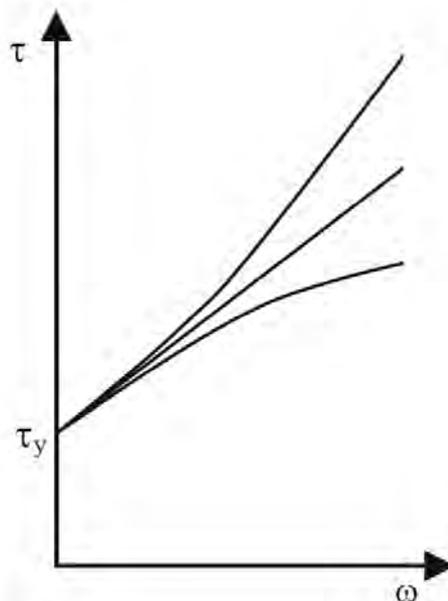


Figura 3. Curve di flusso $\tau = \tau(\omega)$ di un fluido plastico di Bingham

Come è stato spiegato nella *sezione Keywords* di questo numero, per descrivere il comportamento di un fluido sia Newtoniano che non-Newtoniano vale una legge di potenza. Analogamente, per un fluido plastico scriveremo:

$$\tau = \tau_y + \eta_p \omega^n$$

Oltre a essere spesso dipendente dalla velocità di scorrimento e dal tempo, la viscosità è altamente sensibile alla temperatura. L'effetto di quest'ultima sulla viscosità dei liquidi è descritto dall'*Equazione esponenziale di Andrade* (1913):

$$\eta = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \Rightarrow \ln \eta = \ln A + \frac{B}{T}$$

dove A e B sono costanti caratteristiche del materiale e T è la temperatura assoluta. In particolare, la costante B descrive l'energia d'attivazione dello scorrimento viscoso:

$$B = \frac{\Delta E}{R} \Rightarrow \eta = A \cdot e^{\frac{\Delta E}{RT}}$$

Come si può notare, la dipendenza è esponenziale e comporta importanti implicazioni nella lavorazione e caratterizzazione dei materiali polimerici.

Nelle applicazioni tecnologiche si utilizzano una moltitudine di polimeri tixotropici, reopettici, di Bingham come modificatori di reologia (*rheology modifier*). In questo modo abbiamo i *thinning agent* che riducono la viscosità del materiale, i *thickening agent* (*addensanti*) che aumentano la viscosità, i *gelificanti* (*gelling agent*) che formano lo stato gel. Questi *modifier* sono importanti nell'industria alimentare, cosmetica, farmaceutica, della detergenza, del cemento, ecc. Vediamo qualche esempio. Sono *thinning agent*, il poliossietilene (PEG, $(-O-CH_2-CH_2-)_n$) le cui soluzioni acquose diluite presentano un comportamento *pseudoplastico*: a questo scopo sono utilizzate dai vigili del fuoco in quanto permettono un getto della soluzione molto maggiore di quello ottenuto con sola acqua. Analogamente, polimeri tipo PEG sono utilizzati come *superplasticizer* per diminuire la viscosità del cemento, riducendo in questo modo il rapporto acqua/cemento e migliorando le proprietà finali.

È un *gelling agent* la Xanthan gum, largamente usata nell'industria alimentare e cosmetica. Si tratta di un polisaccaride ramificato (Figura 4) che è stato ottenuto negli anni 1960 da processi fermentativi e che ha sostituito in larga misura la pectina.

Alla concentrazione di meno dell'1% in peso, produce un forte aumento di viscosità creando uno stato *gel* nell'alimento; aumentando, però, la velocità di scorrimento permette il passaggio allo stato *sol* proprio del comportamento tixotropico: è il responsabile dell'*Effetto ketchup*, in cui, come è noto, la salsa passa facilmente dallo stato *gel* allo stato fluido per scuotimento. L'effetto tixotropico della Xanthan gum è sfruttato nei prodotti più svariati, dal dentifricio alla cosmetica, agli *hydrogel* bio-compatibili.

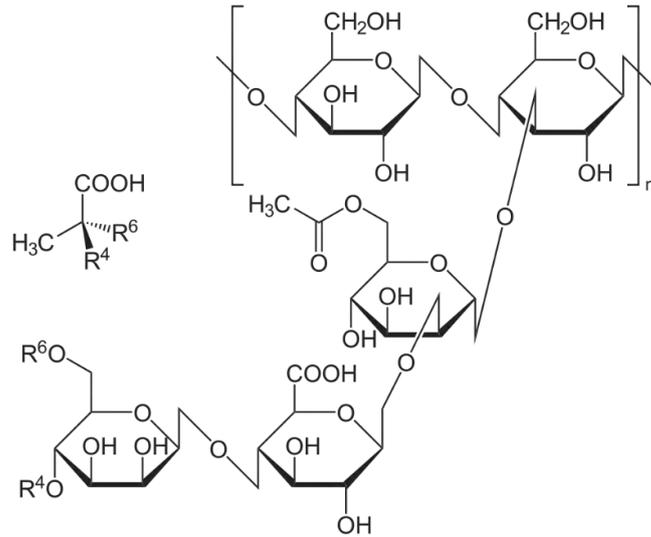


Figura 4. La struttura ramificata della Xanthan gum

È un *thickening agent* il Carbopol, ovvero l'acido poliacrilico e suoi copolimeri, $-(CH_2-CH(C(=O)-OH))_n-$ (Figura 5); è utilizzato come agente addensante nei detersivi, in cosmetica e nella preparazione del calcestruzzo, rendendo il prodotto più coeso.

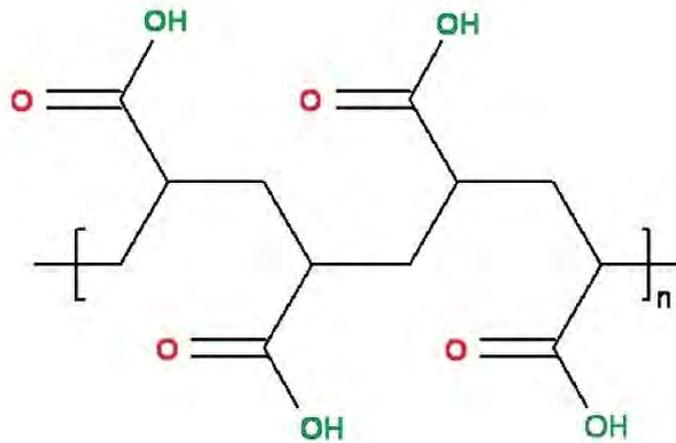


Figura 5. Struttura dell'acido poliacrilico (Carbopol)

La metilcellulosa (MC) è un agente addensante ed emulsionante largamente usato (Figura 6):

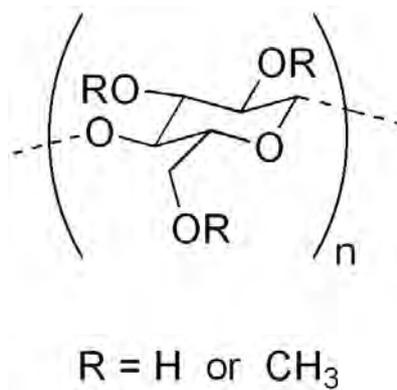


Figura 6. Struttura della metilcellulosa

La Cellulose gum, ovvero la carbossimetilcellulosa (CMC) (Figura 7), è un addensante alimentare che trova impiego anche dell'industria della carta.

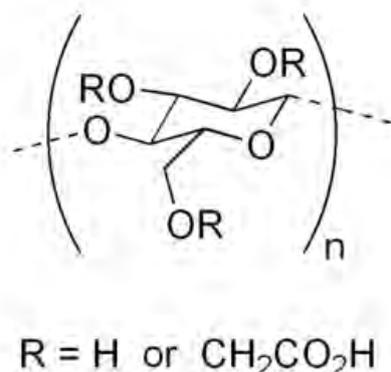


Figura 7. Struttura della carbossimetilcellulosa (Cellulose gum)

L'idrossipropilcellulosa (HPC) (Figura 8) è un *thickener* utilizzato come *emulsion stabilizer* in prodotti farmaceutici. Al variare della concentrazione in acqua dà luogo a mesofasi cristallo-liquido (comportamento *liotropico*). È il principale componente del Cellugel, per il trattamento e conservazione della pelle e del cuoio.

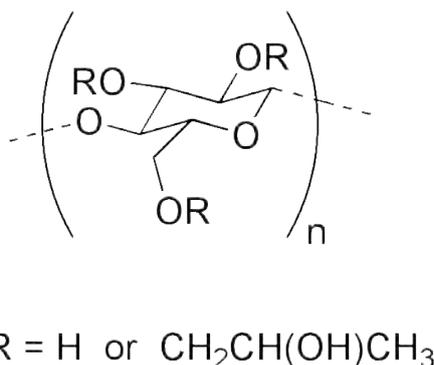


Figura 8. Struttura dell'idrossipropilcellulosa

Infine, consideriamo brevemente le ben note creme alimentari dal punto di vista reologico.

Nella crema pasticcera (o pasticciera, a base di latte, tuorlo d'uovo e zucchero) l'amido (amilopectina 80% e amilosio 20%, polisaccaridi rispettivamente ramificato o lineare) agisce da *gelling agent* (Figura 9). Si ottiene un materiale solido, ma facilmente scorrevole, dunque un *fluido di Bingham*.

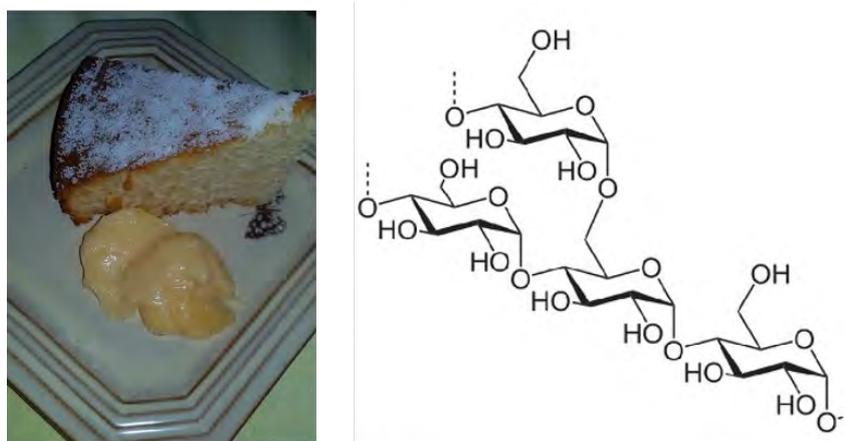


Figura 9. La crema pasticcera (a destra) e la struttura dell'amilopectina, l'agente gelificante (a sinistra)

Nella crema Chantilly (crema pasticcera e panna montata) la lecitina del tuorlo agisce da agente emulsionante della panna (a base di trigliceridi di acidi grassi saturi) e l'amido da *gelling agent*. La crema inglese (crema pasticcera senza amido) resta un'emulsione fluida; al contrario nella crema bavarese, l'amido della crema pasticcera è sostituito dalla gelatina animale (a base di collagene), o vegetale (a base di carragenina).

La realizzazione delle creme alimentari può diventare un accattivante strumento didattico per introdurre allo studio degli intriganti comportamenti reologici dei materiali polimerici.

Bibliografia essenziale

- N. Grizzuti, *Reologia dei materiali polimerici: scienza ed ingegneria*, Edizioni Nuova Cultura, 2012.
- V. Villani, *Lezioni di Scienza dei Materiali Polimerici*, Aracne Editrice, 2020.
- V. Villani, *Lezioni di Chimica e Tecnologia dei Polimeri*, Aracne Editrice, 2021

Decifrare le proteine: un fondamentale aiuto dall'Intelligenza Artificiale

Matteo Chioccioli

Istituto "Marsilio Ficino" di Figline Valdarno (Firenze)

e-mail: matteo.chioccioli@tiscali.it

Abstract: Proteins are key biological macromolecules which play a pivotal role both in living organisms and in chemical and pharmaceutical research. One of the major obstacles in understanding these polymers has long been the experimental determination of their tridimensional structures. This field of research has recently drawn the attention of the major Artificial Intelligence (AI) companies which have developed highly sophisticated algorithms aimed at solving this scientific problem. This article underlines the fact that these AI programs not only have been able to predict the 3-D structures of every known protein found in nature, in the last two years, but also to create artificial proteins from scratch. As a consequence, this will greatly speed up research ranging from designing new drugs to tackling technological and energetic challenges.

Keywords: struttura tridimensionale delle proteine; Intelligenza Artificiale; algoritmi di *deep learning*; proteine mutate; progettazione di proteine artificiali; proteine intrinsecamente disordinate

Alcuni algoritmi stanno rivoluzionando la ricerca in campo chimico, biologico e farmaceutico

Introduzione

Il mio interesse per le proteine e la loro struttura spaziale è nato durante gli anni del dottorato di ricerca, quando queste importanti molecole biologiche rappresentavano dei bersagli sui quali modellare potenziali candidati farmaci. Poi sono sopraggiunti la mancanza di fondi e un esplicito invito da parte dei docenti universitari ad allontanarmi da questo fantastico universo. L'invito consisteva, infatti, nell'investire risorse nel Superenalotto, se avessi voluto trovare un lavoro davvero remunerativo.

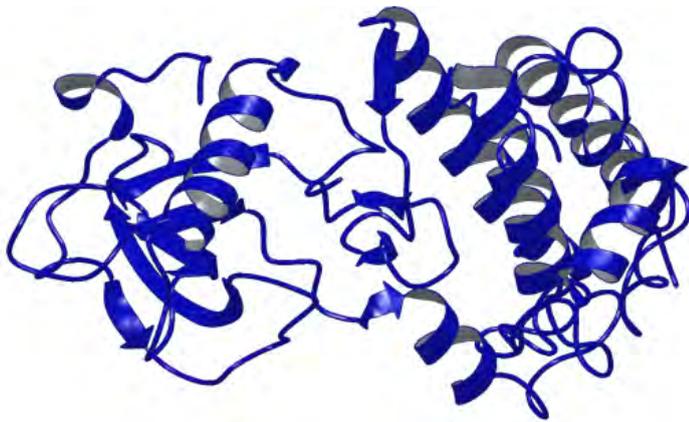
L'inaspettato ritorno di fiamma verso questo mondo ha coinciso con la recente impresa di alcuni giganti dell'hi-tech che attraverso lo sviluppo di software di Intelligenza Artificiale (tra i quali AlphaFold, rilasciato da DeepMind, ProteinMPNN e Meta AI) sono riusciti a delucidare la struttura di quasi tutte le proteine conosciute, e non solo. Questi programmi stanno addirittura raggiungendo ottimi risultati nella progettazione e nel design di nuove proteine [1-5].

Se non avessi avuto l'esperienza di cui parlavo, mi sarei forse chiesto il perché dell'interesse di questi colossi tecnologici a investire risorse e dedicare del tempo prezioso ad un argomento ritenuto specialistico e quasi "da intenditori", quando potrebbero esserci altri settori scientifici, ritenuti ben più stimolanti, da indagare.

Le proteine... al primo posto

Ebbene, occorre innanzitutto chiarire che indagare l'universo delle proteine è molto più che un mero esercizio accademico.

Le proteine, ad esempio, contengono già nel nome uno dei motivi della loro importanza negli organismi viventi, derivando dal termine greco *proteios* che, un po' immodestamente, le mette "al primo posto". Ma se questo non bastasse, potremmo aggiungere che le proteine sono coinvolte in fondamentali processi biologici; che l'emoglobina è una proteina che assicura il trasporto dell'ossigeno nel sangue, e che sono delle proteine a permettere la contrazione muscolare e talvolta a fare la differenza tra un oro olimpico e un rimpianto mondiale. Sono inoltre degli integratori a base di proteine a riempire i pensieri degli amanti del fitness e anche quando chiediamo al parrucchiere di fiducia di eseguire una permanente andiamo a modificare la struttura di specifiche proteine.



Modello di proteina umana – codice 2OH4 (Fonte: Protein Data Bank (PDB) - <https://www.rcsb.org>)

Ciò, tuttavia, non sarebbe sufficiente a giustificare l'interesse degli scienziati e delle aziende hi-tech verso queste straordinarie molecole biologiche. Dietro la conoscenza della forma tridimensionale ordinata che caratterizza la gran parte delle proteine naturali si cela, infatti, la chiave per lo sviluppo di nuovi farmaci, la comprensione dell'origine di numerose patologie umane e la messa a punto di tecnologie da impiegare nelle sfide epocali del cambiamento climatico e dell'inquinamento.

Come l'universo in cui viviamo è formato soltanto da una novantina di elementi chimici naturali, tutta la diversità delle forme proteiche si

origina da appena una ventina di amminoacidi. Queste piccole unità hanno generalmente dei nomi esotici, dal triptofano alla glicina, per i quali a prima vista è difficile comprendere la derivazione etimologica, all'asparagina, che deve il suo nome a una prelibatezza culinaria, o almeno così la ritengono alcuni.

Si potrebbero immaginare le strutture proteiche, formate dalla successione di centinaia, talvolta migliaia, di questi amminoacidi, come dei nastri da ginnastica ritmica fatti roteare nello spazio da leggiadre ginnaste che vanno ad assumere miriadi di forme diverse.

L'Intelligenza Artificiale e le proteine... un incontro fruttuoso

Il fantastico mondo delle proteine da un po' di tempo ha ricevuto un interesse sempre crescente da parte di algoritmi di Intelligenza Artificiale. Questi software, in grado di imitare le capacità dell'intelligenza umana, erano in precedenza associati prevalentemente a programmi per le traduzioni di testi e il riconoscimento delle immagini. Negli ultimi anni, invece, sono stati indirizzati con sempre maggior successo verso problematiche delle scienze della vita.

Gli algoritmi di *deep learning* che sono impiegati in questo campo d'indagine hanno la capacità di apprendere analizzando un'enorme mole di dati che non potrebbero essere altrimenti processati da operatori umani.

È da questo incontro che è scaturita la soluzione al rompicapo proteico su cui gli scienziati si sono arrovellati per oltre mezzo secolo. Tali software, esaminando e confrontando le caratteristiche strutturali delle proteine già conosciute, cioè determinate per via sperimentale nel

corso degli ultimi cinquant'anni, hanno imparato a generare la struttura di una nuova proteina a partire unicamente dalla conoscenza della catena di amminoacidi da cui è composta. Sarebbe stato impensabile solo pochi anni fa.



Foto di Gerd Altmann via Pixabay

Mentre, infatti, è relativamente semplice conoscere la “ricetta” con cui gli organismi le preparano e la successione degli amminoacidi che le caratterizzano, le informazioni strutturali sulle proteine sono molto difficili da ricavare in laboratorio. Fino a qualche anno fa, ad esempio, potevano essere ottenute solamente le strutture delle proteine più semplici attraverso complesse procedure sperimentali e costose strumentazioni, come raggi-X, risonanze magnetiche e microscopi elettronici, spesso a disposizione solo nei principali centri di ricerca.

Questi, tra l'altro, erano proprio i metodi di indagine delle strutture proteiche che conoscevo prima che mi dedicassi a giocare al Superenalotto; o meglio, questo era ciò che mi era stato consigliato in ambito accademico. In realtà non ci ho mai provato e mi sono dedicato ad altro.

Oggi, parlando di strutture tridimensionali delle proteine, ripenso a quello che una volta mi disse una persona sapendo di avere di fronte un chimico: “Mi piacerebbe guardare il mondo come lo guarda lei. Sono sicuro che vedrei molecole in tre dimensioni, come tante minuscole figure geometriche, che mi ruotano intorno in ogni momento della giornata”.

In realtà, con questi speciali occhiali “da chimico”, non si vedrebbero solamente molecole muoversi intorno a noi, ma le si osserverebbero soprattutto dentro di noi. Vi è, infatti, in ogni organismo vivente, un mondo di microscopiche strutture tridimensionali, soprattutto proteine, che hanno le più svariate forme e svolgono innumerevoli funzioni. Sarebbe un po' come addentrarci in una città dove gli edifici siano stati progettati da architetti diversi, talvolta dai gusti decisamente eclettici, ma a partire dagli stessi materiali da costruzione.



Foto di Chokniti Khongchum via Pexels

E come per gli edifici la destinazione d'uso è spesso legata alla struttura (anche se nei tempi moderni questa non è più una regola generale), per la maggior parte delle proteine la funzione è legata alla forma tridimensionale ordinata che esse assumono nello spazio.

Da qui è facile comprendere l'importanza dei dati strutturali ottenuti con gli algoritmi di *deep learning*, che negli ultimi due anni hanno predetto centinaia di milioni di strutture di proteine naturali. Queste strutture sono state messe a disposizione dell'intera comunità scientifica in database liberamente accessibili online. [6-8] L'aspetto importante è che queste predizioni si sono dimostrate molto accurate e hanno superato il confronto con le più sofisticate tecniche sperimentali ampiamente validate. Tali informazioni sulle proteine naturali stanno permettendo agli scienziati in tutto il mondo di ridurre notevolmente i tempi necessari per le loro scoperte. E questo straordinario risultato ottenuto nell'ambito delle scienze della vita è testimoniato da recenti articoli apparsi su due delle riviste scientifiche più prestigiose al mondo come *Science* e *Nature*.

Anche nel mondo delle proteine qualcosa può andare storto...

Occorre aggiungere che spesso la ricerca della struttura 3D delle proteine è finalizzata anche a capire l'effetto di quelle che vengono chiamate mutazioni, cioè delle modifiche nella successione degli amminoacidi rispetto alla proteina perfettamente funzionante; è in questi difetti che spesso si cela la comprensione dell'origine di una patologia. Per fare solo un esempio, è la modifica in un unico amminoacido nell'emoglobina umana a determinare quella patologia nota come anemia falciforme, caratterizzata da globuli rossi che anziché avere una normale forma a disco assumono una forma a falce. Potremmo dire che piccole differenze microscopiche sono all'origine di notevoli conseguenze a livello degli organismi.

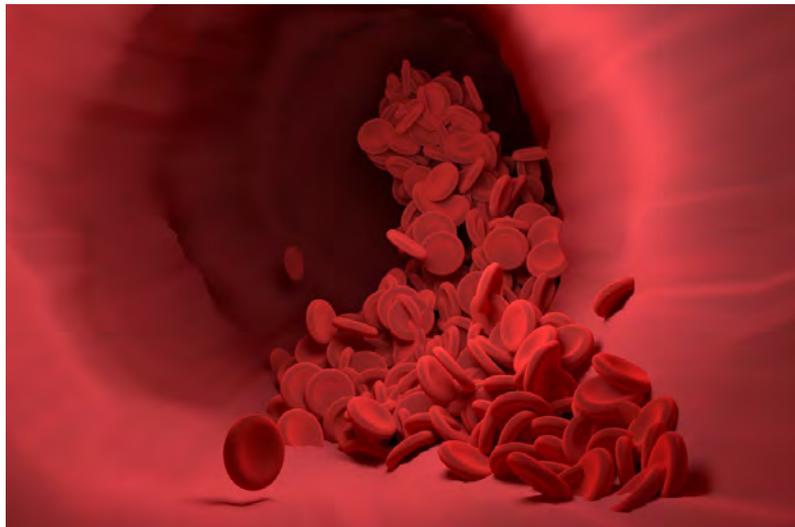


Immagine di globuli rossi di forma normale (Foto di Narupon Promvichai viaPixabay)

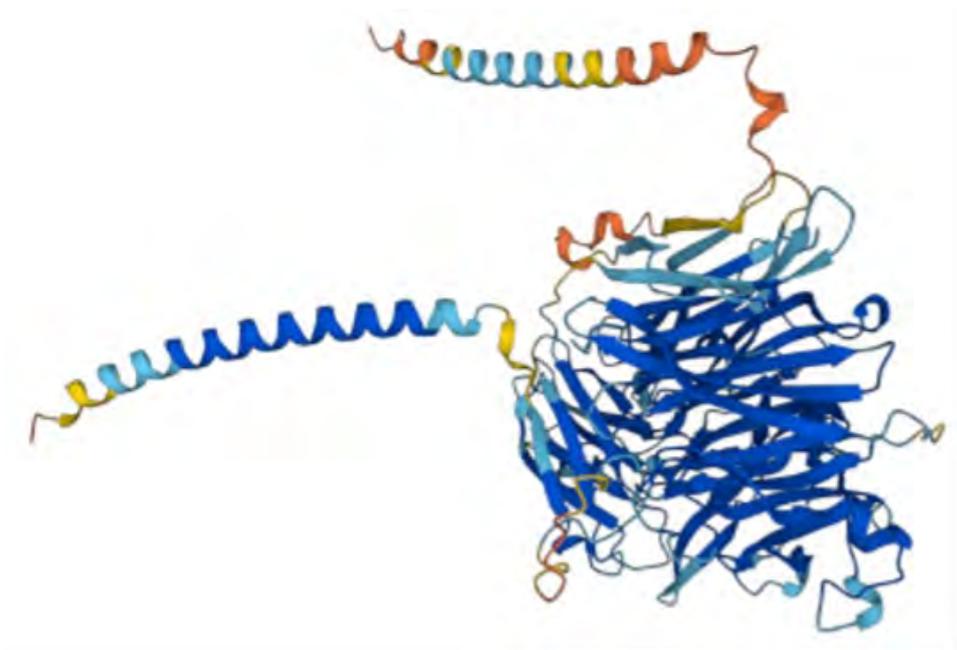
Provate adesso a immaginare che in una città un progettista un po' distratto, e nei sistemi biologici si deve parlare piuttosto di casualità che di distrazione, abbia fatto realizzare una piscina olimpionica dieci centimetri più corta della lunghezza canonica di cinquanta metri. La piscina continuerà ad essere tale e forse verrà destinata ad altri nobili scopi come far divertire giovani nuotatori nel periodo estivo, o forse meno poeticamente semplicemente demolita, ma certo non avrà più la funzione per la quale era stata pensata nel progetto originario. In pratica, gli sfortunati spettatori non avranno mai occasione di vedervi gareggiare campioni olimpionici. Con le mutazioni abbiamo un problema analogo. Avremo una proteina con una diversa struttura rispetto a quella funzionante e, quindi, con una diversa funzione, cosa che spesso ha effetti deleteri sugli

organismi viventi. Anche qui è facile comprendere quanto possa essere importante l'apporto dell'Intelligenza Artificiale.

Una nuova prospettiva...

Se in un primo momento l'incontro tra i due mondi, quello delle proteine e dell'Intelligenza Artificiale, ha permesso di esplorare l'universo delle molecole naturali, la nuova frontiera è addirittura quella di progettare proteine completamente nuove e non presenti in natura, aprendo un campo di indagine ancora inesplorato e potenzialmente molto fruttuoso.

Recentemente sono state mostrate le potenzialità degli algoritmi nel trovare soluzioni sempre più rapide e accurate alle sfide poste dal design di nuove proteine artificiali. [9] Queste nuove macromolecole, che permetteranno agli scienziati di esplorare zone dell'universo proteico che la natura stessa non ha ancora indagato, potranno rivelarsi potenzialmente utili in campo medico, energetico e tecnologico. Sarà come avere a disposizione un nuovo potente telescopio James Webb che nei prossimi mesi ci potrà inviare immagini di forme proteiche ancora del tutto sconosciute.



Modello di struttura proteica da *Plasmodium falciparum* (Fonte: AlphaFold Protein Structure Database, <https://alphafold.ebi.ac.uk>, via CC-BY-4.0 licence)

Problemi ancora aperti... quando anche il disordine diventa utile

Esiste, tuttavia, un settore dell'universo delle proteine naturali che ancora in gran parte risulta inesplorato e solo parzialmente descritto dagli algoritmi di Intelligenza Artificiale: è quello rappresentato dalla galassia delle proteine intrinsecamente disordinate. [10] Tali strutture sono state catalogate nel database DisProt, liberamente accessibile online. [11, 12]

Questa nuova galassia, scoperta da alcuni decenni, sembra governata da leggi diverse da quelle sulle quali si è basata fino ad ora la nostra tradizionale comprensione del ruolo delle proteine. Tali molecole, talvolta coinvolte anche nell'insorgenza di patologie, sono infatti in grado di svolgere le loro funzioni biologiche pur non avendo un'unica struttura tridimensionale ordinata e ben definita. Presentano, invece, un'elevata flessibilità strutturale e plasticità che le rendono capaci di modificare nel tempo la loro architettura spaziale adattandola alle diverse funzioni da svolgere. La comprensione delle regole che governano questa galassia, e della mobilità che caratterizza queste proteine, è una grande sfida posta alla comunità scientifica e all'Intelligenza Artificiale.

Quello delle proteine disordinate è, tuttavia, solo uno dei campi d'indagine in cui ancora gli algoritmi di *deep learning* presentano dei limiti e non riescono a sostituire gli studi sperimentali.

Altre problematiche aperte riguardano la comprensione del processo di *folding*, cioè del modo in cui le proteine si strutturano nello spazio e degli aspetti dinamici connessi alla funzione delle macromolecole. L'immagine statica che spesso abbiamo delle proteine non rende conto, infatti, di quella che è l'elevata dinamicità che caratterizza queste molecole. [13]

Sapere se, e quando, l'Intelligenza Artificiale fornirà delle risposte anche a questi interrogativi è solo una questione di tempo.

Riferimenti

- [1] J. Jumper, R. Evans, A. Pritzel, et al., *Nature*, 2021, **596**(7873), 583–589.
- [2] J. Dauparas, I. Anishchenko, N. Bennett et al., *Science*, 2022, **378**(6615), 49–56.
- [3] E. Callaway, *Nature*, 2022, **608**(7921), 15–16.
- [4] E. Callaway, *Nature*, 2022, **609**(7928), 661–662.
- [5] E. Callaway, *Nature*, 2022, **611**(7935), 211–212.
- [6] R. F. Service, *Science*, 2021, **373**(6554), 478.
- [7] <https://alphafold.ebi.ac.uk/>
- [8] <https://esmatlas.com/>
- [9] A. Madani, B. Krause, E. R. Greene, et al., *Nat. Biotechnol.*, 2023. DOI: 10.1038/s41587-022-01618-2.
- [10] V. N. Uversky, *Frontiers in Physics*, 2019, **7**, DOI: 10.3389/fphy.2019.00010, (<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphy.2019.00010>)
- [11] <https://disprot.org/>
- [12] F. Quaglia, B. Mészáros, E. Salladini, et al., *Nucleic Acids Research*, 2022, **50** (D1), D480–D487.
- [13] G. Villani, Rappresentazioni e modelli del mondo molecolare in *Immagini e strumenti digitali nella didattica delle scienze*, 02/2023, Pisa University Press, 21-31.

Principi elementari di reologia dei polimeri

Parte I: fluidi non-Newtoniani

Vincenzo Villani

Laboratorio di Chimica delle Macromolecole,
Dipartimento di Scienze, Università della Basilicata
e-mail: vincenzo.villani@unibas.it

Abstract: Rheology is a highly interdisciplinary approach, transversal to all natural sciences and technologies. Chemistry plays a fundamental role in it, in fact the models at the molecular level are the interpretative key of the experimental data. The mathematics and physics used can be very sophisticated, however using only the fundamental elements of mathematical analysis (supplied to the last years of secondary schools) and the fundamental concepts of structure and molecular interactions it is possible to develop a coherent and rigorous framework. It is certainly useful to the teachers and students of chemistry and, more generally, of natural sciences.

Keywords: reologia; polimeri; viscosità; elasticità; viscoelasticità

Introduzione

La *reologia dei polimeri* si occupa sia della *resistenza allo scorrimento* del materiale polimerico allo stato liquido (soluzioni, stato sol, gel e fuso polimerico) sia della *resistenza alla deformazione* del materiale allo stato solido (polimero termoplastico, termoindurente, elastomero e composito a matrice polimerica e particelle eterogenee). Viscosità, elasticità e viscoelasticità sono le *keyword* fondamentali: in questo numero esaminiamo il comportamento non-Newtoniano dei fluidi polimerici.

Metodi e Modelli

Consideriamo un liquido tra due superfici piane e parallele, una fissa (quella inferiore, ad esempio) e l'altra mobile (quella superiore). Alla lastra superiore di *area superficiale* A applichiamo la *forza di taglio* T (parallela alla superficie) a cui corrisponde lo *sforzo di taglio* pari a:

$$\tau = \frac{T}{A}$$

Allora, lo strato liquido si deforma con un *profilo di velocità* $u(y)$ (il diagramma triangolare di frecce in figura 1) dove dx è la deformazione applicata, du la velocità di deformazione e dy l'altezza dello strato fluido lungo l'asse y (trasversale alla direzione di deformazione x).

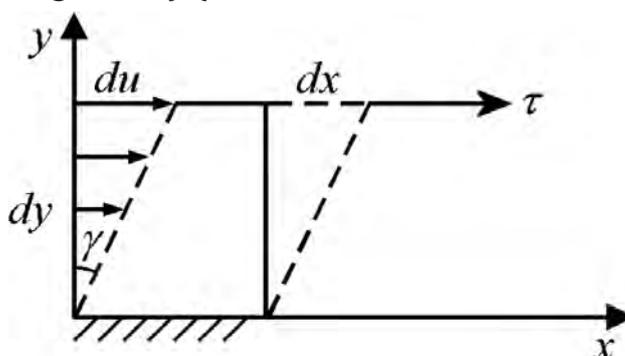


Figura 1. Deformazione di taglio di un elemento di spessore dy

Otteniamo la deformazione angolare γ e la velocità di deformazione definita da:

$$\omega = \frac{d\gamma}{dt}$$

La velocità, u , varia lungo y secondo la funzione $u = u(y)$ detta *profilo di velocità*. La velocità del fluido è solidale con i piatti: a contatto con il piatto superiore, la velocità di flusso coincide con la velocità di taglio applicata, diminuisce a mano a mano che si scende nello strato liquido, finché a contatto con il piatto inferiore il fluido risulta in quiete. Il profilo di velocità $u(y)$ può essere una retta o una curva qualsiasi.

Il materiale sottoposto allo sforzo di taglio si deforma come un mazzo di carte: si conserva il volume, ma variano gli angoli degli spigoli laterali (Figura 2).

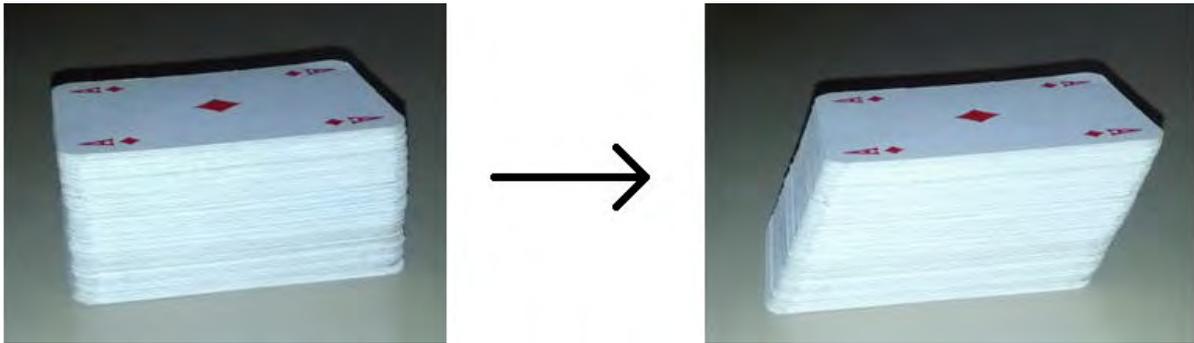


Figura 2. Deformazione di taglio di un mazzo di carte

Scriviamo ora l'equazione di Newton alla base dello scorrimento dei fluidi viscosi:

$$\tau = \eta \times \omega$$

dove τ è lo sforzo di taglio (*shear-stress*) applicato al liquido, ω la velocità di deformazione (*shear-rate*) e la costante di proporzionalità η è la viscosità del liquido espressa in *Poise* = [$Pa \times s$].

La velocità di deformazione è la derivata temporale:

$$\frac{d\gamma}{dt}$$

Però, è altrettanto utile esprimerla come *gradiente di velocità*, dove u è il profilo di velocità lungo lo spessore y dello strato liquido:

$$\frac{du}{dy}$$

Risulta quindi:

$$\omega = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{du}{dy}$$

In modo analogo, per i solidi elastici abbiamo l'equazione di Young:

$$\tau = G \times \gamma$$

dove lo sforzo di taglio è proporzionale alla *deformazione* γ mediante il *modulo di taglio* G : entrambe le equazioni descrivono la resistenza meccanica del materiale, allo stato liquido o solido, rispettivamente.

In reologia è necessario conoscere il *gradiente di velocità* ovvero:

$$\omega = \frac{du}{dy}$$

Allora, se il profilo di velocità è una retta, il gradiente è costante in tutto lo strato liquido, la relazione di Newton è valida e il fluido è detto *Newtoniano*; se il profilo di velocità è curvo (ad esempio, parabolico), il gradiente di velocità non è più costante, ma varierà da punto a punto nello spessore liquido, l'equazione di Newton sarà modificata e il fluido è detto *non-Newtoniano*.

In generale, la *viscosità di un fluido* è data dal rapporto *shear-stress* su *shear-rate*:

$$\eta = \frac{\tau}{\omega}$$

Per conoscere il comportamento reologico di un fluido è necessario costruire la *curva di flusso* $\tau = \tau(\omega)$ e la *curva di viscosità* $\eta = \eta(\omega)$ in cui lo sforzo o la viscosità è diagrammato in funzione della velocità di deformazione. Otteniamo allora un comportamento lineare (newtoniano) o non-lineare (non-newtoniano): se la curva è sopra-lineare il comportamento è detto *shear-thickening* e il fluido *dilatante*, se invece la curva è sub-lineare si parla di comportamento *shear-thinning* e di fluido *pseudoplastico* (Figura 3). In genere, il fuso polimerico ha una curva del tipo *thinning* che rappresenta la *fingerprint* della sua reologia.

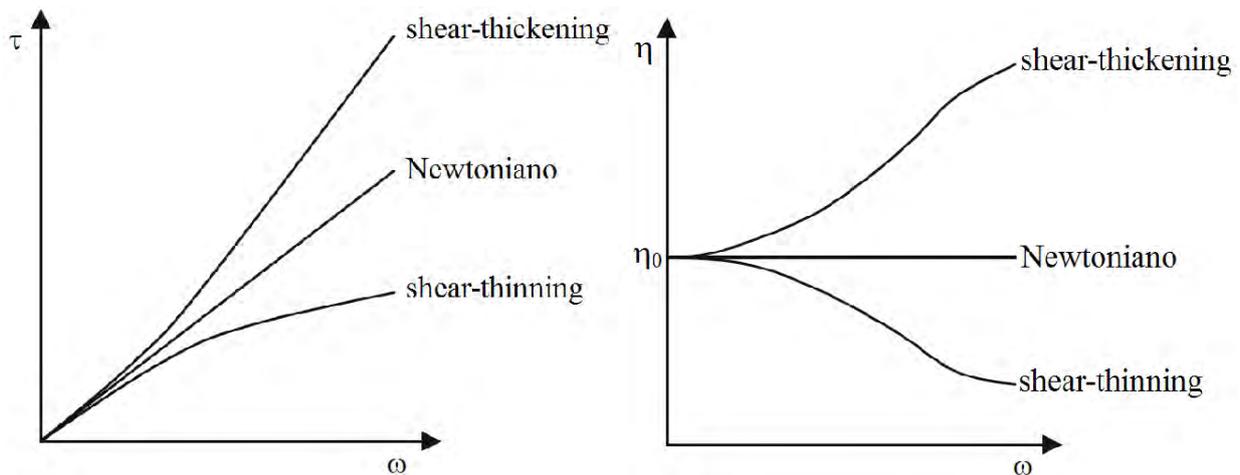


Figura 3. Curve di flusso $\tau = \tau(\omega)$ (a destra) e curve di viscosità $\eta = \eta(\omega)$ (a sinistra) per liquidi Newtoniani o non-Newtoniani

A livello molecolare, questi comportamenti sono dovuti all'effetto del gradiente di velocità sulla macromolecola. La macromolecola in soluzione o nel fuso polimerico ha una forma sferoidale (detta *random coil*) sufficientemente grande (tipicamente, 100-200 nm, 1 nm = 10^{-9} m, 1 miliardesimo di metro) da "sentire" il gradiente di velocità e, quindi, i segmenti di catena sperimentano differenti forze d'attrito viscoso. Dunque, le forze d'attrito danno luogo a un *momento meccanico* μ che fa ruotare lo sferoide attorno a un asse passante per il baricentro (Figura 4).

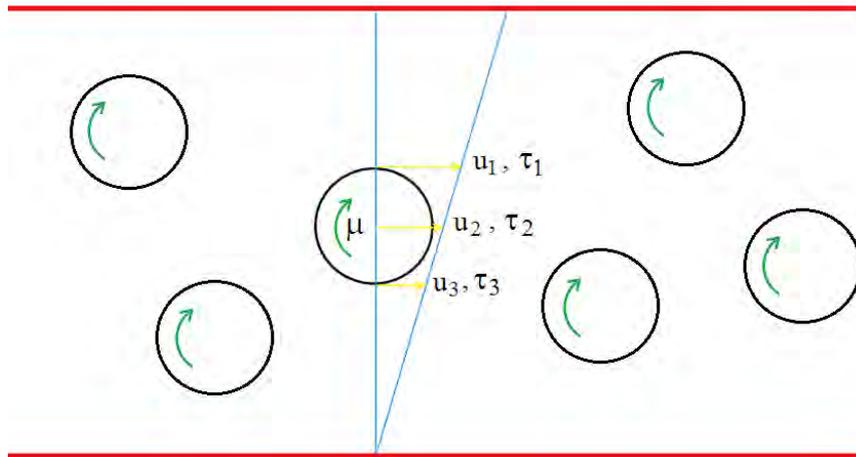


Figura 4. Schema molecolare della rotazione delle macromolecole indotta dal gradiente di velocità

Allora, la macromolecola non solo trasla, trascinata dal flusso, ma anche ruota, dando luogo ad un moto roto-traslazionale. Essendo *la viscosità una misura della resistenza del fluido a scorrere*, se parte dell'energia del moto traslazionale viene dissipata in moto rotazionale, il flusso rallenta e la viscosità del fluido aumenta, ragion per cui, una soluzione polimerica risulta più viscosa del solvente puro.

All'aumentare della velocità di deformazione (e quindi del gradiente di velocità), gli sforzi di taglio tendono a schiacciare il *random coil* in un *ellissoide orientato con la direzione del flusso*. Di conseguenza, i moti rotazionali dissipativi si riducono e la viscosità del fluido diminuisce determinando il comportamento *shear-thinning* osservato per le soluzioni polimeriche e il fuso polimerico (Figura 5).

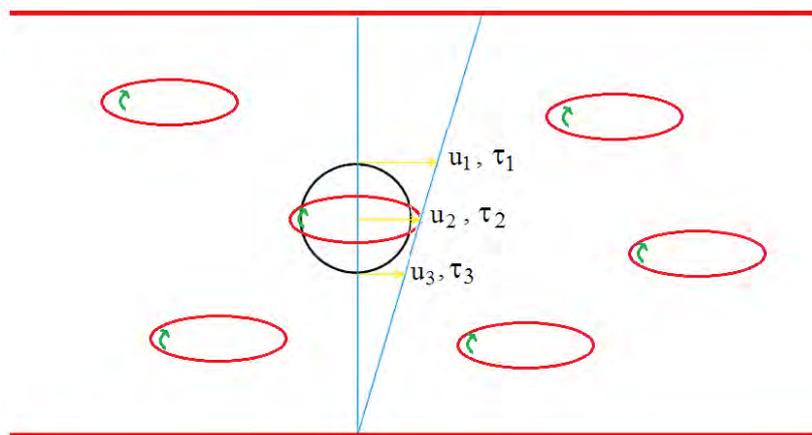


Figura 5. Schema molecolare dell'orientamento degli ellissoidi col flusso

Al contrario, il comportamento *shear-thickening* è tipico delle *dispersioni*, ovvero di un *liquido composito* in cui sono disperse particelle eterogenee di dimensione micrometrica ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$), ciò è tipico dello stato *sol* in cui si formano aggregati micrometrici. Queste particelle si comportano in modo rigido, conservano la forma sferoidale con il flusso, ma all'aumentare della velocità di scorrimento si aggregano dando luogo a particelle più grandi che sperimentano un gradiente di velocità maggiore e, quindi, moti rotazionali dissipativi più intensi con il conseguente aumento della viscosità osservata (Figura 6).

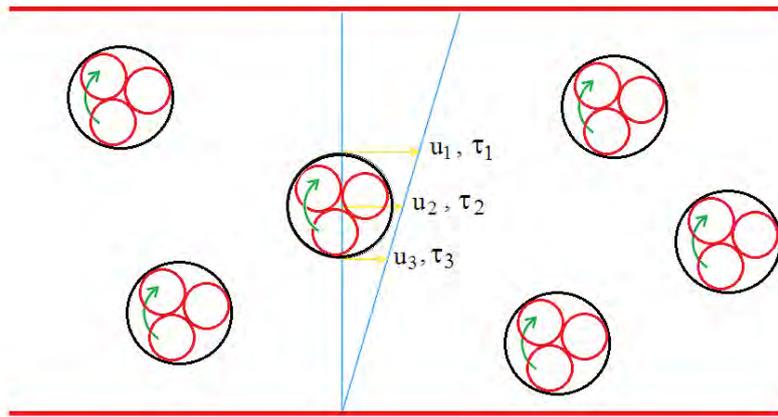


Figura 6. Schema molecolare degli aggregati *sol* sotto l'azione del gradiente di velocità

Un *fluido dilatante* può essere descritto da un'equazione del tipo $\tau = \eta_0 \times \omega^2$ con andamento parabolico sovra-lineare, quindi:

$$\frac{\tau}{\omega} = \frac{\eta_0 \cdot \omega^2}{\omega} \Rightarrow \eta = \eta_0 \cdot \omega$$

da cui deriva un andamento lineare crescente della viscosità.

Analogamente, un *fluido pseudoplastico* può essere descritto da $\tau = \eta_0 \times \omega^{1/2}$ con andamento sub-lineare, quindi:

$$\frac{\tau}{\omega} = \frac{\eta_0 \cdot \omega^{1/2}}{\omega} \Rightarrow \eta = \eta_0 \cdot \omega^{-1/2}$$

Da cui deriva un andamento decrescente della viscosità. In generale, le curve di flusso sono descritte da *leggi di potenza*, che rappresentano lo scostamento dalla linearità newtoniana.

Dalle curve di flusso e di viscosità risulta che il *polymer melt*, sia a basse che ad alte *shear-rate*, assume un comportamento Newtoniano, che può essere sfruttato utilmente nella caratterizzazione e nel *processing* dei polimeri, rispettivamente.

Il comportamento di molti fluidi non-Newtoniani, oltre ad essere funzione della velocità di taglio $\eta = \eta(\omega)$, è funzione del tempo $\eta = \eta(t)$: in generale abbiamo $\eta = \eta(\omega, t)$. Mantenendo costante la velocità di deformazione $\omega = \omega_0$ (flusso stazionario), si costruisce la *curva della viscosità dipendente dal tempo*. Se il fluido ha un comportamento Newtoniano, allora osserviamo la retta costante $\eta = \eta_0$. Invece, se il fluido non-Newtoniano presenta una viscosità crescente nel tempo è detto *reopettico*; se mostra una viscosità decrescente nel tempo *tixotropico* (Figura 7).

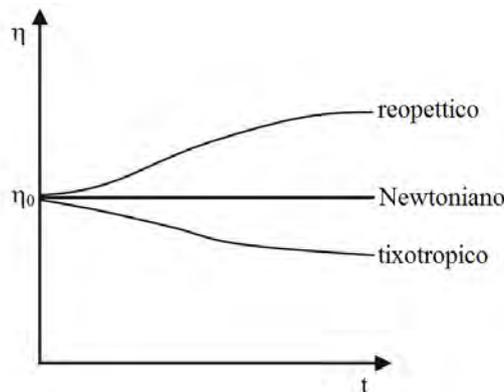


Figura 7. Curve di viscosità in funzione del tempo $\eta = \eta(t)$ per liquidi Newtoniani o non-Newtoniani

Un fluido tixotropico è caratterizzato da una struttura interna che rilassa lentamente, minimizzando la resistenza al flusso. È quanto accade nella transizione *gel* → *sol* in cui il reticolo tridimensionale (*polymer network*) dello stato *gel*, in virtù delle interazioni di non-legame di tipo van der Waals, si disgrega reversibilmente formando aggregati isolati, la dispersione propria dello stato *sol*. Possiamo dire che nello stato *sol* gli “aggregati macromolecolari sono dispersi nella matrice continua del solvente”, mentre nello stato *gel* “il solvente è disperso nella matrice continua macromolecolare” (Figura. 8).

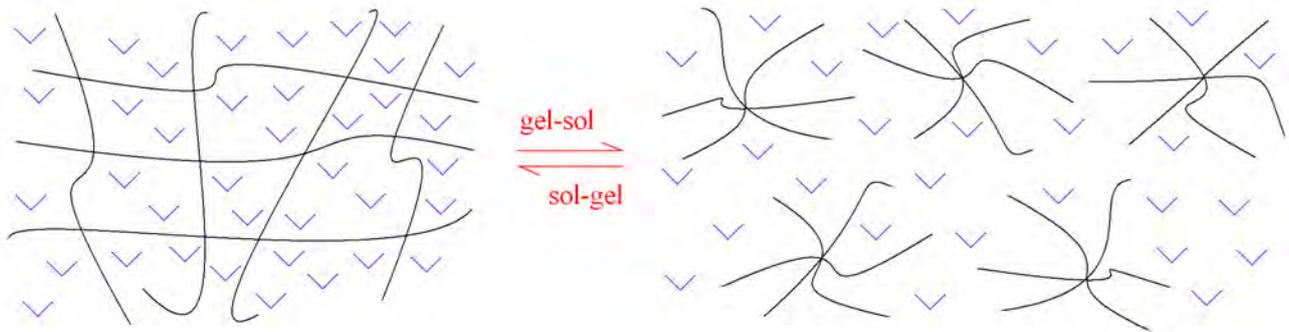


Figura 8. Schema dell'equilibrio sol-gel

Bibliografia essenziale

- N. Grizzuti, Reologia dei materiali polimerici: scienza ed ingegneria, Edizioni Nuova Cultura, 2012.
- V. Villani, Lezioni di Scienza dei Materiali Polimerici, Aracne Editrice, 2020.
- V. Villani, Lezioni di Chimica e Tecnologia dei Polimeri, Aracne Editrice, 2021.

La Chimica industriale e applicata nella Facoltà di Ingegneria dell'Università di Palermo dalle origini al 1923

Giuseppe Silvestri

Professore emerito di Chimica Industriale
dell'Università di Palermo
e-mail: aposilve@gmail.com

Abstract. This insight on the first part of the pathway which led to the widening of the presence of disciplines dealing with applied and industrial Chemistry starts, in 1834, with the institution of the teaching of Chemistry applied to arts and trades and arrives, in 1923, to the stabilization of the school of application for engineers, as institution with legal and administrative autonomy, as premise to the Faculty of Engineering and then to the degree in chemical Engineering.

Keywords: Ingegneria chimica; Chimica applicata; tecnologie industriali; storia della Chimica

Premessa

Possiamo individuare le premesse didattiche e scientifiche che diedero origine all'istituzione del Corso di Laurea in Ingegneria Chimica nell'Università di Palermo nel nascere e nel progressivo evolversi di quella parte delle scienze chimiche alla quale si accedeva per la soluzione di specifici problemi tecnici, o per la sperimentazione di nuovi processi produttivi; questa parte fu via via definita "applicata" o "docimastica" dal momento che aveva per oggetto minerali, o materiali prevalentemente di uso comune, dei quali studiare, più che le ragioni strutturali, gli aspetti macroscopici del comportamento, nonché le connesse valutazioni economiche e merceologiche.¹

Gli inizi: La cattedra di Chimica applicata alle arti e ai mestieri

Questo percorso iniziò nel 1834, quando il Governo borbonico decise di aggiungere all'insegnamento della Chimica [1], presente nel curriculum degli studenti della Facoltà di Medicina dell'Università di Palermo fin dalla sua istituzione nel 1806, anche quello di Chimica applicata alle arti e ai mestieri. Dopo pochi anni, il nome dell'insegnamento perse prima i mestieri e successivamente le arti.

Occorsero sei anni perché la cattedra fosse attivata e primo docente fu Gioacchino Romeo, che era da alcuni anni dimostratore di Chimica, che restò sulla cattedra di Chimica applicata alle arti fino alla sua morte, nel 1844.

Nell'almanacco Reale del 1841 è riassunto il programma del corso che si tiene nel palazzo del Conte Federigo: Tratterò in



¹ Vedere, per esempio, Cosmo Di Giovanni, e Lucchesi, *Metallurgia, e docimastica articolo 2. del piano mineralogico formato di real comando da d. Cosmo Di Giovanni, e Lucchesi, per lo sperimento da farsi della natura delle miniere siciliane prima di entrare il real erario nelle grandi spese*, Napoli, 1790.

questo anno de' corpi semplici e delle loro combinazioni, giusta l'opera di Giuseppe Giulio [?] aggiungendovi le riforme, e scoperte posteriori, e praticherò gli analoghi esperimenti. La lezione si farà a mezzo giorno.

Sulla cattedra di Chimica, diventata col tempo Chimica filosofica e farmaceutica, in quegli anni si erano succeduti Giovanni Meli [2] fino al 1815 e Antonino Furitano dal 1823 al 1836. Nel 1841 Filippo Casoria vinse il concorso e tenne la cattedra fino al 1859. I "vuoti" nella copertura furono causati da scontri interni all'Ateneo per l'attribuzione della cattedra.²

La Facoltà di Scienze Fisiche e Matematiche

Francesco Dotto Scribani, Filippo Casoria

Nel 1840 fu istituita e attivata la nuova Facoltà di Scienze Fisiche e Matematiche nella quale confluirono le due discipline appena citate e i connessi laboratori. L'insegnamento della Chimica restò anche nella Facoltà di Medicina.

Nel 1851 Francesco Dotto Scribani, dimostratore di Chimica filosofica e farmaceutica fu nominato professore sulla cattedra di Chimica applicata alle arti, vacante per la morte di Romeo. I contenuti del suo insegnamento sono sinteticamente esposti nel Prospetto degli studi dell'Annuario scolastico 1859-60: *Parlerà delle arti industriali, che dipendono dal trattato dei metalloidi e dall'altro delle loro combinazioni* [3]. Dotto Scribani si occupò della estrazione di acido citrico, della concia delle pelli, della utilizzazione di minerali solfatici e dell'industria estrattiva e della purificazione dello zolfo, ma *ebbe pochi mezzi per installare un piccolo laboratorio destinato a questo ramo della chimica: due camerette nelle soffitte del Palazzo Universitario, bastevoli appena per ricevere due persone* [4].

I rivolgimenti conseguenti allo sbarco di Garibaldi in Sicilia nel maggio 1860 si ripercossero anche sull'Università di Palermo. L'amministrazione provvisoria retta dal prodittatore Antonio Mordini sostituì il rettore padre Filippo Cumbo con Filippo Casoria, coadiuvato dal collegio dei presidi delle Facoltà dell'Ateneo. Casoria fu il primo rettore laico dell'Università di Palermo; morì ad appena un anno dal suo insediamento.

Stanislao Cannizzaro, Emanuele Paternò, la Scuola di applicazione per gli Ingegneri

Il 1860 fu anche un anno cruciale per lo sviluppo delle scienze e delle tecnologie chimiche nell'Università di Palermo: un decreto del prodittatore Mordini istituì la Scuola di applicazione per gli Ingegneri annessa alla Facoltà di Scienze fisiche matematiche e naturali e Stanislao Cannizzaro tornò a Palermo, per prestare, ove occorresse, l'opera sua per il consolidamento della rivoluzione [5].

L'impostazione didattica della Scuola di applicazione per gli Ingegneri era conforme alla legge sulla pubblica istruzione promulgata a Torino un anno prima. La Scuola avviò i suoi corsi nel 1866. La Chimica applicata, presente nei piani di studio dell'Università da un quarto di secolo, non fu attivata per cinque anni (1862-1867), probabilmente a causa dei lavori di sistemazione del laboratorio di Cannizzaro, che furono completati nel 1867. Il corso riprese nell'A. A. 1868-69, con il titolo Chimica applicata all'Ingegneria, tenuto da Giovanni Campisi, già assistente alla Scuola di Chimica. Dopo un anno, il titolo diventò Chimica applicata alle costruzioni, ancora assegnato a Campisi. L'indecisione tra un titolo più generico e uno molto specifico si risolse nell'A. A. 1875-1876: l'insegnamento, ancora impartito da Campisi, prese il nome di Chimica docimastica e fu inserito nei due corsi della Scuola per conseguire i diplomi di ingegnere civile e di architetto. Dall'anno successivo la cattedra fu tenuta per incarico da Emanuele Paternò fino al 1893 [6].

² O. Cancila, *Storia dell'Università di Palermo*, cit. Nelle pp. 304 e segg. è riassunta la sequenza di incarichi interinali, di mancati concorsi e di litigiosi tentativi di attribuzione della Cattedra di Chimica prima dell'assegnazione a Casoria.

Sotto la direzione di Cannizzaro l'insegnamento della Chimica, nelle sue diverse declinazioni, si consolidò coinvolgendo un gruppo di collaboratori molto qualificati scientificamente. In particolare, per quanto riguarda gli aspetti applicativi, Cannizzaro tenne l'insegnamento di Analisi di Chimica minerale, coadiuvato da Guglielmo Koerner e Domenico Amato, e la direzione



della Scuola di Farmacia, dove Francesco Dotto Scribani insegnava Chimica farmaceutica e tossicologia e Storia naturale dei medicamenti. Tenne, inoltre, la direzione del Laboratorio di Chimica generale e Scuola pratica di Chimica di cui era vicedirettore Giovanni Campisi e preparatori Koerner, Amato e Paternò.

Nel 1872 Cannizzaro si trasferì a Roma. Nell'A.A. 1872-1873 Paternò subentrò a Cannizzaro nella maggior parte delle funzioni svolte da quest'ultimo. Nell'A.A. 1875-76 si formalizzò la divisione, di fatto già esistente, tra il "Corso che apre l'adito alla Scuola di applicazione", biennale, afferente alla Facoltà di

Scienze, e la Scuola di applicazione che diventò triennale. Il corso biennale comprendeva l'insegnamento di Chimica generale (obbligatorio) e altri come Chimica organica, Zoochimica, Chimica applicata all'Igiene (liberi); Teodoro Leone tenne quest'ultimo insegnamento dal 1892 al 1926 [7]. Nel 1891 aveva diretto il Laboratorio chimico municipale di Palermo.

Paternò fu in quegli anni una figura di grande rilievo non solo nella Facoltà di Scienze, ma nell'intero Ateneo palermitano e dal 1885 al 1890 tenne l'ufficio di rettore. Pur appartenendo, per ruolo, formazione e interessi scientifici, alla Facoltà di Scienze, ebbe un peso anche nella Scuola di Applicazione, nella quale furono attivi, come incaricati o come assistenti, ricercatori suoi allievi (Giuseppe Oddo, Vincenzo Oliveri, Gaetano Minunni, Alberto D. Peratoner, Eugenio Manzella).

Osservando la produzione scientifica di Paternò e dei suoi collaboratori negli anni palermitani si nota che quella riferibile alla Facoltà di Scienze è più ampia e diversificata rispetto a quella riferibile ai temi più applicativi delle Scuole di applicazione e di Farmacia. Una minore produzione scientifica derivava non già da disinteresse verso temi specifici della realtà isolana, come la vitivinicoltura – produzione di tartrato acido di potassio (il cremor tartaro) e di acido tartarico, messa a punto di metodi analitici appositi per l'analisi dei vini e l'utilizzazione di zolfo come antiparassitario – o l'industria dei derivati agrumari – estrazione delle essenze e produzione di citrato di calcio e di acido citrico – o ancora l'industria olearia, bensì spesso dalla riservatezza che la committenza imponeva a chi si occupava di specifici problemi aziendali. Nel 1910 Peratoner, chimico torinese assistente di Paternò fin dal 1889, brevettò un interessante metodo di produzione di essenza e acido citrico dai limoni in un unico stadio preparativo [8]. Nell'ampio ventaglio di interessi di quel laboratorio trovavano inoltre posto ricerche sulla chimica dei leganti e dei materiali da costruzione e sulle acque di corpi idrici siciliani. Tra gli assistenti del laboratorio di Chimica docimastica Oliveri, Oddo, e Manzella si occuparono con più continuità di questi ultimi temi.

Nell'A.A. 1892-1893 Paternò si trasferì a Roma. La cattedra di Chimica restò vacante per alcuni anni: ancora nel 1894, all'inaugurazione dell'Anno Accademico, il rettore Giuseppe Gugino riferì che alle richieste di assegnazione urgente di un nuovo titolare il *Signor Ministro* [...] *dichiara, senza prendere alcun impegno, che sarà lieto, se le condizioni di bilancio gliene offriranno modo, di provvedere all'insegnamento della Chimica generale. Che cosa questo significhi si lascia di leggieri comprendere, ed è grandemente doloroso che in tal guisa si rompano le gloriose tradizioni*

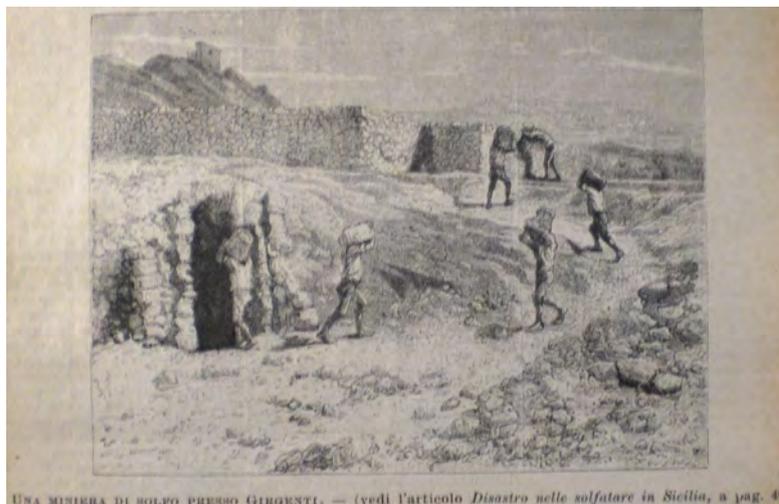
di questo insegnamento nel nostro Ateneo, che creò la scuola chimica in Italia e diede valorosi insegnanti a tutte le Università del regno [9].

Stefano Pagliani, Eugenio Manzella

Dal 1892 la separazione tra Scienze ed Ingegneria per l'insegnamento di materie chimiche nel triennio di applicazione fu pressoché definitiva, mentre restò ancora a lungo appannaggio di Scienze l'insegnamento della Chimica generale nel corso biennale propedeutico. La Scuola di Applicazione trasferì al suo interno l'insegnamento di Chimica docimastica che fu assegnato a Stefano Pagliani, laureato in Chimica a Torino, da due anni titolare della cattedra di Fisica tecnica.³ Tra gli assistenti alla cattedra di Chimica docimastica prima elencati, solo Manzella restò nel laboratorio di Chimica docimastica e concentrò i suoi interessi scientifici su leganti, materiali da costruzione ed acque. Manzella, laureato all'Università di Palermo in Ingegneria e in Chimica, iniziò la sua carriera universitaria collaborando con Giuseppe Oddo nelle sue prime ricerche sul confronto fra alcuni cementi nazionali ed esteri e sui fenomeni che avvengono durante la loro presa; promosse la fondazione a Palermo dell'Istituto Superiore Commerciale, nel quale insegnò Chimica docimastica, e fu consulente di industrie chimiche del palermitano. Oddo svolse importanti ricerche sia sul versante della chimica organica sia su quello della chimica applicata e industriale: Paoloni, ricordandone i meriti scientifici e il contributo dato allo sviluppo industriale della Sicilia paragona il suo ruolo innovatore a quello di Cannizzaro nel secolo precedente [10].

Nel 1900 la Scuola di Applicazione, nei locali dell'ex convento della Martorana, ospitò un Gabinetto e Laboratorio di Chimica docimastica, diretto da Pagliani, che è uno dei più ampi, comprendendo, oltre a vari locali, una lunga sala per le esercitazioni e varie stanze di lavoro, tutte montate alla moderna, essendo esso Gabinetto di data recente [11].

Sul piano didattico Pagliani affrontò con impegno la Chimica docimastica, che nel programma di insegnamento chiamò analitica: un testo di due pagine, dettagliato e orientato più su argomenti di chimica applicata e industriale che sugli aspetti dell'analisi chimica. Tra i temi trattati: combustibili, metalli e leghe, lubrificanti, materiali da costruzione, coloranti, esplosivi, e l'industria dello zolfo [12], dall'estrazione alla raffinazione. Quest'ultimo argomento era di grande attualità per la Sicilia, allora produttrice dell'85% dello zolfo mondiale. Verso la fine dell'800 cominciò a svilupparsi nell'isola l'industria di raffinazione del minerale e, utilizzando la materia prima locale, la produzione di acido solforico e di fertilizzanti fosfatici. Queste iniziative imprenditoriali, cui furono estranei i proprietari delle cave di zolfo, tradizionalmente sordi alle innovazioni tecnologiche, fecero uso di processi moderni, ed ebbero il loro momento di massimo sviluppo nel primo quarto del secolo seguente, più nella zona costiera della Sicilia orientale, a Catania in particolare [13]. È possibile che in queste iniziative siano stati coinvolti alcuni dei laureati della Scuola di Applicazione provenienti dalle province centro-orientali dell'isola, dato che nel



UNA MINIERA DI ZOLFO PRESSO GERGENTI. — (vedi l'articolo *Disastro nelle solfature in Sicilia*, a pag. 40)

³ L'Annuario 1890-91 riporta le pubblicazioni di Stefano Pagliani dal 1879 al 1890: dei 24 titoli citati, 10 sono da ascrivere all'area delle Scienze e Tecnologie chimiche e i rimanenti all'area della Fisica tecnica.

periodo 1882-1907 si laurearono in ingegneria a Palermo una sessantina di giovani provenienti da queste province.

Pagliani lasciò l'insegnamento di Chimica docimastica dopo soli due anni, per tornare, sempre nell'ambito della Scuola, all'incarico di Elettrotecnica. Nel 1918 lasciò l'Università per fare il consulente industriale prima a Roma e poi a Genova.

Nell'A.A. 1903-04 Clemente Montemartini vinse la cattedra di Chimica docimastica bandita dalla Scuola; dopo un anno si trasferì a Torino per tenervi la cattedra di Chimica applicata. Montemartini vide la sua permanenza a Palermo così provvisoria che non cercò casa e restò alloggiato alla pensione Svizzera di via Monteleone. L'incarico venne allora conferito ad Eugenio Manzella, che nel frattempo era diventato "privato docente"⁴ di Chimica docimastica e assistente ordinario. In quegli anni Manzella progettò l'Istituto di Chimica Generale e Farmaceutica in via Archirafi [14] e pubblicò un testo didattico di chimica applicata [15]. Il programma del suo corso era orientato verso i materiali da costruzione e solo in appendice forniva nozioni sulla chimica industriale dello zolfo, dei derivati del cloruro sodico e di asfalti e bitumi. Sull'asfalto siciliano Manzella pubblicò una memoria nel 1907. Lo sfruttamento dei giacimenti di bitume si sviluppò a Ragusa, nel 1918 [16]; ancora a Ragusa, negli anni '50, fu realizzato uno stabilimento per la distillazione di idrocarburi dalle rocce asfaltiche e la loro utilizzazione per la calcinazione del residuo calcareo e la produzione di cemento [17].

La sezione industriale della Regia Scuola di Applicazione per gli ingegneri: il corso di Laurea in Ingegneria industriale e l'Istituto di Chimica tecnologica

Il progetto di attivare una sezione industriale nella Scuola di Applicazione, fortemente propugnato da Michele Capitò, Direttore della Scuola e professore di Idraulica, trovò la sua base normativa con la legge 14 luglio 1907, n. 571. La sezione vide la luce nel 1909, ma Capitò non vide realizzarsi il suo progetto: morì infatti il primo gennaio di quell'anno. La convenzione, citata nella legge istitutiva, prevedeva che la Scuola fosse cofinanziata da Università di Palermo, Comune di Palermo, Provincia, Cassa di Risparmio di Palermo, Camere di commercio di Palermo, Trapani e Caltanissetta, Società Navigazione generale italiana e da un privato, il Comm. Carlo Pintacuda. Il ruolo organico comprendeva un professore ordinario di Chimica industriale, con stipendio di 5.000 lire annue e due incaricati, rispettivamente di Chimica analitica e Chimica docimastica, ciascuno con stipendio di 1.250 lire annue. La Chimica docimastica rimase solo nei corsi per ingegneri civili e per architetti, affidata per incarico a Manzella.

Mario Giacomo Levi

Nell'anno accademico 1908-1909, vinse il concorso di Chimica tecnologica Mario Giacomo Levi, padovano, chimico di grande valore, appena trentenne, ma già con una ampia esperienza di ricerca sia di base sia applicata vissuta prima nell'Università di Padova e poi in quella di Pisa. Durante il periodo padovano, grazie a una borsa di studio, aveva trascorso quasi un anno in uno dei più importanti centri di ricerca sull'elettrochimica del tempo, il laboratorio di Leblanc presso l'Istituto di Chimica Fisica ed Elettrochimica del Politecnico di Karlsruhe, da dove aveva effettuato una ampia ricognizione dei laboratori di ricerca tedeschi. La familiarità verso il tema dell'industria zolfifera gli proveniva dal padre, direttore e proprietario di una raffineria di zolfo a Padova.

Un filo di continuità collegava Cannizzaro, tramite Paternò e Nasini, a Levi e alla Scuola di Applicazione: Levi fu infatti allievo e stretto collaboratore di Nasini a Padova e, quando Nasini vinse a Pisa la cattedra di Chimica, lo seguì e venne nominato aiuto e incaricato di Chimica applicata.

Quando Levi arrivò a Palermo aveva già pubblicato trentotto tra memorie scientifiche e brevetti, con importanti contributi al campo dell'elettrochimica, sia di base che applicata, con

⁴Qualifica che diventò in seguito "libero docente" e rimase in uso nell'Università italiana fino agli anni '70.

ricerche sulla preparazione di persolfati e di iposolfiti. Tra i suoi oggetti di studio si devono menzionare anche l'azione del catalizzatore nel processo Deacon per la preparazione del cloro, la produzione di acido cloridrico per sintesi dagli elementi, la radioattività dei soffiatori boraciferi in Toscana e di alcuni prodotti vulcanici della eruzione del Vesuvio del 1906. A Pisa aveva, inoltre, lavorato sulla preparazione del borace; su questo argomento aveva presentato a Londra, al VII Congresso internazionale di Chimica, una memoria sulla reazione tra cloruro sodico e acido borico, grazie a una delle prime borse di studio istituite su iniziativa di Paternò per permettere a giovani studiosi italiani di partecipare a manifestazioni scientifiche all'estero.

Levi si trovò bene nell'ambiente palermitano, che così ricordò una volta a Bologna: *sarei ingrato se non rivolgessi il mio pensiero affettuoso e riconoscente a quella meravigliosa e cara città che, dopo lunga esitazione, ho lasciata per voi. Palermo mi ospitò maternamente per undici anni, avvincendomi con l'azzurro del suo mare e del suo tepido cielo, con il verde profumato dei suoi agrumeti, con la gentilezza ospitale dei suoi abitanti, con gli entusiasmi e la bontà della sua gioventù; a Palermo vissi undici anni di vita operosa nella Scuola fra Colleghi e discepoli carissimi, nell'industria e nella vita cittadina fra salde e non dimenticate amicizie* [18].

A Palermo Levi svolse un'intensa attività didattica, di ricerca, organizzativa e di contatto con il mondo industriale e produttivo. Nell'ambito della Scuola di applicazione fondò l'Istituto di Chimica tecnologica dove svolse ricerche sulla decomposizione dei formiati a idrogeno e sull'utilizzazione di zolfo greggio per la lotta contro l'oidio. Nel corso per ingegneri industriali Levi tenne le lezioni di Chimica tecnologica del secondo e del terzo anno, impostando programmi moderni, in cui trovavano posto le tecnologie più aggiornate dell'industria chimica

del tempo; tenne, inoltre, per incarico il corso di Chimica analitica, anche in questo caso con un programma impostato modernamente, in cui erano presenti oltre all'analisi chimica inorganica qualitativa e quantitativa per via umida, tecniche di analisi organica e di analisi dei gas. Accanto alla didattica, si occupò con passione dei problemi legati all'affermazione della professionalità del chimico, sia come analista che come addetto all'industria, propugnando la creazione di Facoltà di Chimica industriale che, più e meglio delle Scuole di Applicazione, fornissero le competenze adatte alla piena utilizzazione delle innovazioni che in quegli anni andavano registrandosi nella letteratura scientifica e tecnica [19].

Levi ebbe come aiuto Manzella, che raccolse e pubblicò le sue lezioni di Chimica tecnologica [20].

Nell'Annuario Accademico 1910-11 oltre a Levi, titolare di Chimica tecnologica ed incaricato di Chimica analitica, risultavano afferenti all'area chimica della Scuola di Applicazione: Eugenio Manzella, aiuto di Chimica tecnologica, "privato docente" di Chimica docimastica e

incaricato della stessa materia per i corsi di laurea in ingegneria civile e in architettura, Vincenzo Oliveri, "privato docente" di Chimica docimastica, Amedeo Ceccherelli, assistente di Chimica docimastica. Nell'anno accademico successivo diventò assistente di Chimica docimastica anche Agide Piva. Manzella in quegli anni si occupò attivamente dell'utilizzazione delle acque madri delle saline siciliane, compiendo una visita agli impianti della «Salin de Giraud, Bouche-du-Rhône» e presentando un progetto, che non trovò applicazione, sull'estrazione dei sali potassici. Piva collaborò in quegli anni con Levi alle ricerche sulla decomposizione del formiato, sulla reattività e sulla determinazione quantitativa del monossido di carbonio, sulla determinazione del carbonio negli acciai e nelle ghise.



Levi entrò a far parte del Consiglio di amministrazione dell'officina comunale del gas di Palermo, portandovi un contributo di ampia conoscenza delle tecnologie allora adottate nel nostro Paese [21]. Inoltre, seguì lo sviluppo dell'industria mineraria e della chimica inorganica italiana, dell'industria dei sali potassici e del bromo con monografie e relazioni a convegni. Nel 1916 venne nominato componente del Comitato consultivo permanente per l'incremento delle industrie chimiche costituito presso il Ministero dell'Industria. Erano anni di guerra e all'industria chimica veniva chiesto uno sforzo produttivo nel settore degli esplosivi cui doveva corrispondere un'adeguata promozione tecnologica. In Sicilia, in quel periodo, furono attive tredici fabbriche, a Palermo la Carlo Pallme König e la R. Cappello, specializzate nella produzione di glicerina grezza da utilizzare per la produzione di esplosivi [22]; con molte di queste Levi, per la competenza chimica e per la posizione occupata nell'ambito del Comitato, dovette certamente essere in contatto. Fondò a Palermo nel 1918 l'Istituto superiore commerciale e coloniale e ne fu il primo direttore.

Nel 1920-1921, ancora una volta, dopo Cannizzaro e Paternò, un chimico di grande competenza ed esperienza lasciò l'Università di Palermo. Levi fu chiamato dall'Università di Bologna, che gli affidò la cattedra di Chimica docimastica della Scuola di Applicazione; in quella Università fondò, e ne fu il primo direttore, la Scuola Superiore di Chimica Industriale, dalla quale ebbe origine la Facoltà di Chimica industriale. Nel 1927 si trasferì a Milano, al Politecnico, dove coprì la cattedra di Chimica industriale. In quella sede fondò e diresse fino al 1953 l'Istituto di Chimica industriale. Tra il '38 e il '45 fu costretto a lasciare prima l'insegnamento e poi il Paese per l'entrata in vigore delle leggi razziali.

Il passaggio delle consegne da Levi a Manzella

A seguito del trasferimento a Bologna, nel marzo del 1921, Levi consegnò i beni dell'Istituto di Chimica tecnologica a Manzella: mobili e arredi per 2.093,65 lire, strumenti scientifici per 18.697,73 lire, libri per 13.676,33 lire [23].

Nell'A.A. 1922-1923 per il corso di laurea in Ingegneria industriale Teodoro Leone ebbe l'incarico anche di Chimica analitica e Antonio Romano e Francesco Occhipinti furono assistenti rispettivamente di Chimica tecnologica e Chimica docimastica.

Manzella restò direttore degli Istituti di Chimica tecnologica e di Chimica docimastica e incaricato di Chimica docimastica per i corsi di Ingegneria civile ed Architettura fino al 1928. Proseguì nello studio sulla produzione di sali potassici, e sulla razionalizzazione dello sfruttamento delle saline che avevano grande importanza nel panorama industriale dell'Isola: alla metà degli anni Venti erano attive quarantasette saline nel trapanese e undici sulla costa orientale, con una produzione complessiva annua di sale marino che nel 1925 arrivò a 214.000 tonnellate [24]. Pubblicò una ricognizione sulle principali attività industriali siciliane [25] e uno studio sulla deterpenazione delle essenze di agrumi. Nel 1925 fu nominato "professore non stabile" di Chimica tecnologica, di cui continuò a tenere i due insegnamenti al secondo e al terzo anno del Corso di laurea in Ingegneria industriale. Anche se tutta la didattica di quegli anni seguì l'impostazione tracciata da Levi, Manzella pubblicò un suo testo di appunti di Chimica tecnologica [26].

Importanti cambiamenti avvennero in quegli anni nello stato giuridico della Scuola, che, con il R.D. del 30.9.1923 n. 2012 sull'ordinamento dell'istruzione superiore fu compresa negli Istituti a carico dello Stato, con personalità giuridica ed autonomia amministrativa, didattica e disciplinare.⁵

L'avvento del fascismo ebbe ripercussioni via via più pesanti nella vita universitaria, fino alle gravi epurazioni che colpirono i docenti ebrei nel 1938 [27]; alla fine di quel ventennio la chiamata alle armi, i lutti e le distruzioni della guerra coinvolsero pesantemente l'Università di

⁵ Il 22 febbraio 1926 venne firmato l'atto costitutivo del Consorzio volto ad assicurare all'Università ed alla Scuola i necessari mezzi finanziari.

Palermo, sia per la morte di numerosi docenti e studenti sia per i gravi danni al patrimonio edilizio.

Nella seconda parte di questo excursus si riprenderanno questi ultimi temi, e in particolare si seguiranno le restanti tappe del percorso verso l'istituzione del corso di laurea in Ingegneria chimica.

Riferimenti

- [1] O. Cancila, *Storia dell'Università di Palermo dalle origini al 1860*, Editore Gino Laterza & Figli, Bari, 2006; R. Zingales, *La Chimica a Palermo nel XVIII secolo*, La Chimica nella Scuola 2022, 2, pp. 41-47.
- [2] L. Paoloni, *Giovanni Meli docente di Chimica*, comunicazione al Convegno *Giovanni Meli tra arcadia e illuminismo*, Palermo (1997).
- [3] *Prospetto degli studj della R. Università di Palermo per l'Anno Scolastico 1859-1860*, Tipografia Morvillo 1859, p. 11, in M. Romano (a cura di) *I docenti della Regia Università di Palermo 1820-1880*, pubblicazione dell'Università di Palermo, 2006, p. 111.
- [4] *Cenno sugli Istituti scientifici dell'Università, Laboratorio di Chimica Generale*, in *Annuario Accademico della R. Università degli Studi di Palermo 1899-1900*, Stab. Tip. Giannitrapani, 1900, p. 93.
- [5] S. Cannizzaro, *Appunti autobiografici*, in Stanislao Cannizzaro, *Scritti vari e lettere inedite nel centenario della nascita*, Associazione italiana di Chimica generale ed applicata, Tip. Leonardo da Vinci, Roma, 1926.
- [6] R. Zingales, *Stanislao Cannizzaro e la Scuola chimica palermitana*, *Boll. Accad. Gioenia Sci. Nat.*, 2010, Vol. 43, N° 371, pp. 27-40.
- [7] T. Leone, *Sopra alcune trasformazioni che avvengono nelle acque per effetto dei batteri*, *Atti della R. Accademia dei Lincei*, 1887 (4) 284, Vol. 3.
- [8] E. Molinari, *Trattato di Chimica Generale ed Applicata all'Industria Vol. II, Chimica organica, Parte I*, Quarta edizione, Hoepli, Milano, 1927, p. 612.
- [9] G. Gugino, *Relazione del rettore*, in *Annuario della R. Università degli Studi di Palermo 1894-95*, Tipografia Lo Statuto, Palermo, 1895, p. 6.
- [10] L. Paoloni, *I progetti di Giuseppe Oddo (1865-1954) per lo sviluppo dell'industria chimica in Sicilia*, VII Convegno Nazionale di «Storia e Fondamenti della Chimica», L'Aquila, 8-10 ottobre 1997, in F. Calascibetta (a cura di), *Rendiconti della Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL*, 1997, serie V, vol. XXI, parte II, Tomo II°, 375; vedi anche: R. Noto *Giuseppe Oddo: chimico "rivoluzionario" e "irriverente"*. *Chimica nella Scuola*, 2022, 3, pp. 45-49.
- [11] *Cenno sugli Istituti scientifici...*, rif. [4], p. 98.
- [12] O. Cancila, *Storia dell'Industria in Sicilia*, Editori Laterza, Bari, 1995, pp. 181 e segg.
- [13] E. Molinari, *Trattato di Chimica generale ed applicata all'industria, Vol. I: Chimica inorganica, tomo primo*, sesta edizione, Hoepli, Milano, 1939, pp. 434 e segg.
- [14] D. Enea, *L'architettura del polo universitario di via Archirafi*, in *Palermo città delle culture. Contributi per la valorizzazione di luoghi e architetture* a cura di Giovanni Fatta, 40due Edizioni Palermo, 2014, p. 89.
- [15] E. Manzella, *Lezioni di chimica applicata*, Litografia Longo, Palermo, 1904.
- [16] A.A. V.V., *Osservatorio economico del Banco di Sicilia, Notizie sull'economia siciliana*, 1926.

- [17] Nota di redazione, *La Chimica e l'Industria*, 1954, **36**, p. 574.
- [18] M. G. Levi, *Discorso inaugurale della R. Scuola Superiore di Chimica Industriale*, Società Tipografica già Compositori, Bologna, 1922.
- [19] Vedi, ad es., M. G. Levi, *Considerazioni sopra l'insegnamento della Chimica negli istituti superiori con speciale riguardo a quello della Chimica Tecnologica* in *L'industria Chimica*, Torino, 1913.
- [20] M. G. Levi, *Corso di chimica Tecnologica 1910-1911, Lezioni raccolte dal prof. E. Manzella e dal Dott. A Ceccherelli*, Tip. Gazzetta Commerciale, Palermo, 1911.
- [21] M. G. Levi, E. Manzella, *Relazione sugli impianti e sul funzionamento delle principali Officine del Gas d'Italia. Confronti, rilievi, proposte per l'Officina di Palermo*. Officine Tipo-Lit. Anonima Affissioni, Palermo, 1916.
- [22] F. Renda, *Storia della Sicilia dal 1860 al 1970*, Vol. II, 1985, p. 331.
- [23] *Registro inventariale dell'Istituto di Chimica tecnologica della R. Università di Palermo*, anno 1921.
- [24] *Osservatorio economico del Banco di Sicilia*, rif. [16].
- [25] E. Manzella, *Uno sguardo alle principali industrie di Sicilia*. Tip. Castiglia, Palermo, 1925.
- [26] E. Manzella, *Appunti di Chimica tecnologica, raccolti e redatti dall'ing. F. Occhipinti. Corso ordinario, 1920-21*, Arti grafiche G. Castiglia, Palermo. Il testo venne pubblicato anche nell'anno scolastico 1921-22.
- [27] A. M. Maggio, R. Zingales, *La chimica a Palermo tra le due guerre*, *La Chimica nella Scuola*, Numero speciale "Fascismo, Chimica e Scienza", 2022, pp. 100-115.

Quasicristalli prodotti da un fulmine

Silvano Fuso

e-mail: silvanofuso@tin.it

I quasicristalli rappresentano una classe molto particolare di materiali. Creati artificialmente nel 1984 da Dan Shechtman (Premio Nobel per la chimica nel 2011) e osservati in natura da Luca Bindi e Paul Steinhardt (Premi Aspen nel 2018), questi materiali sono solidi in cui gli atomi sono disposti in una struttura ordinata, ma non periodica, come avviene invece nei normali cristalli. Inoltre, presentano simmetrie vietate nei cristalli (ad esempio pentagonale).

I quasicristalli si possono formare spontaneamente in condizioni estreme quali quelle prodotte dall'impatto di corpi extraterrestri o da esplosioni nucleari. Le loro singolari proprietà magnetiche ed elettriche trovano già oggi applicazioni (celle solari che assorbono nell'infrarosso, rivestimenti antiaderenti e a basso attrito, strati termoisolanti, ecc.) e si prospetta che in futuro ne troveranno molte altre.

Qualche mese fa è stata fatta una singolare scoperta che è stata pubblicata sui Proceedings of the National Academy of Sciences.¹ Un quasicristallo dodecagonale si è formato in seguito alla caduta di un fulmine vicino a un cavo ad alta tensione. L'evento è accaduto in una regione sabbiosa degli Stati Uniti, a Sand Hills, nel Nebraska. La roccia è stata rinvenuta nel 2008, dopo un violento temporale, e contiene un minerale chiamato fulgurite, che si forma con una certa frequenza quando i fulmini colpiscono i terreni sabbiosi.

Luca Bindi, professore di mineralogia all'Università di Firenze, che studia i quasicristalli dal 2009, sospettava da tempo che le fulguriti potessero contenere dei quasicristalli. Come lui stesso ha dichiarato: "Ho iniziato a chiedere a colleghi di tutto il mondo di inviarmi campioni di fulguriti di diversa origine e uno di essi conteneva il quasicristallo descritto in questo studio". L'individuazione del quasicristallo è stata possibile attraverso diverse metodiche, tra cui la



tecniche hanno rivelato la presenza di quasicristalli, con atomi disposti in strati di cluster dodecagonali: una disposizione impossibile nei cristalli ordinari. Lo studio di Bindi è stato svolto in collaborazione con Paul Steinhardt, dell'Università di Princeton.

Secondo i ricercatori è stata proprio la scarica elettrica del fulmine a creare temperature

superiori a 1.700 °C, permettendo la formazione del quasicristallo con una simmetria e una composizione mai osservate prima. È stato ipotizzato che anche le scariche prodotte dalla linea elettrica abbattuta abbiano dato il loro contributo. Tuttavia, la fulgurite formata si estendeva ben

¹ L. Bindi, M. A. Pasek, C. Ma, P. J. Steinhardt, Electrical discharge triggers quasicrystal formation in an eolian dune, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 120 (1), 2023 (doi/10.1073/pnas.2215484119).

oltre il punto di contatto con il cavo e presentava una morfologia simile a quella di altre fulguriti prodotte da fulmini.

La scoperta potrebbe aprire la strada a nuove vie per la sintesi di quasicristalli artificiali. Lo stesso Bindi ha inoltre dichiarato: "Oltre a nuove applicazioni tecnologiche dei quasicristalli che ancora non immaginiamo, il nostro studio può favorire la ricerca in campi come la fisica della materia condensata e la chimica dello stato solido".

Progetto per realizzare un Museo Diffuso della Strumentazioni Scientifica Storica

Luigi Campanella

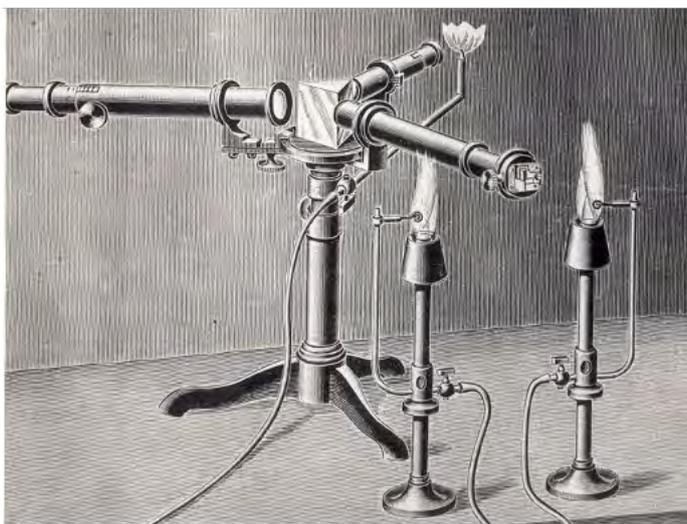
Sapienza Università di Roma

e-mail: luigi.campanella@uniroma1.it

Gli strumenti scientifici a seguito dell'innovazione si sono sempre più trasformati in scatole nere, sacrificandone trasparenza e quindi opportunità didattiche. Anche le dimensioni si sono mediamente ridotte di un ordine di grandezza con conseguente guadagno di spazio e di portabilità. Quanto è sopravvissuto alle rottamazioni imposte dalla mancanza di spazio può rappresentare un patrimonio prezioso da condividere.

Per dare contenuto e valore a tale patrimonio, anche integrato con quello di Istituzioni (Federchimica, Polo Museale di Ateneo, Sistema scolastico di Fermo) attive in questo campo, eventualmente esteso anche a libri storici e reagenti, prodotti di sintesi e prodotti naturali, arredi personali e di laboratorio, ancora custoditi in diverse sedi, e soprattutto a impianti industriali, sarà creato un riferimento web, in prima applicazione postato nel website della Società Chimica Italiana. In tale sito verrà predisposto un catalogo condiviso di immagini, corredato da quanti più possibile dati informativi.

Inoltre, si ha intenzione di organizzare un Convegno di sensibilizzazione e lancio, sin da ora previsto a Fermo nel gennaio 2024 presso L'Istituto Tecnico Tecnologico "G. e M. Montani", e di programmare un ciclo di conferenze gestite dal Gruppo Nazionale di Fondamenti e Storia della Chimica.



Dallo spettroscopio di Kirchhoff e Bunsen ai moderni spettrofotometri: dalla trasparenza alle scatole "nere"