

CnS

La Chimica nella Scuola

n. 3 anno 2025

- **Scuola Superiore: la densità come concetto chiave**
- **La potenzialità didattica dei musei e delle collezioni di strumenti scientifici**
- **Catalisi ecosostenibile**
- **Un documento da non dimenticare: l'enciclica di papa Francesco**
- **Alcuni materiali di cui non potremo mai fare a meno**
- **Un chimico senior racconta**
- **E altro ancora ...**



DIRETTORE ONORARIO

Gianluca Farinola

COMITATO EDITORIALE

Direttore: Margherita Venturi

Vice-direttori: Eleonora Aquilini, Giovanni Villani

COMITATO DI REDAZIONE

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

COMITATO SCIENTIFICO

Presidente: Luigi Campanella

Vincenzo Balzani, Agostino Casapullo, Carlo Fiorentini



ISSN: 0392-8942

REGISTRAZIONE: 03/05/1996 n. 219

presso il Tribunale di Roma.

PERIODICITÀ: Bimestrale

Indice

Editoriale

- Che dire dell’Homo Sapiens Sapiens?..... 1
Margherita Venturi

Percorsi laboratoriali per la Scuola Superiore

- La densità come concetto chiave: un percorso verticale e fenomenologico .. 5
Marco Caruso

Musei scientifici e didattica

- Insegnare (e imparare) la chimica attraverso i musei e le collezioni di strumenti scientifici..... 13
Valentina Domenici e Gaetano Angelici

Keywords

- Le nuove frontiere della catalisi ecosostenibile: un viaggio, dai catalizzatori omogenei alla fotocatalisi, ripercorrendo le tappe storiche più rilevanti per il suo sviluppo..... 25
Marcello Crucianelli e Nicola Di Nicola

Transizione ecologica

- L’enciclica Laudato si’ di papa Francesco – Un documento che farà epoca.. 35
Vincenzo Balzani
- I protagonisti nel mondo materiale – Prima parte: sabbia, sale, carbone, ferro e rame..... 41
Fabio Olmi

Pagine di Storia

- La teoria molecolare di Ampère: una visione di primo Ottocento carica di stimoli di riflessione..... 61
Vincenzo Villani

Dare voce agli studenti

ChemEscape: studenti coinvolti nella chimica	73
Monja Schilling	

Esperienze di chimica e di vita vissuta

Un chimico senior racconta ... incontri importanti nella sua vita accademica.....	77
Domenico Misiti	

News

Project "Teaching with Objects"	87
X Scuola Nazionale di Didattica della Chimica «Giuseppe Del Re»	89
I fisici e i chimici si confrontano sulla didattica	90

Che dire dell'*Homo Sapiens Sapiens*?

Margherita Venturi

Cara lettrice e caro lettore,

sto scrivendo questo editoriale in un pomeriggio di metà luglio rovente per la calura e per le “bollenti” notizie che ci arrivano da varie parti del mondo. Confesso di essere sempre più confusa: se il clima è indiscutibilmente fuori controllo, mi sembra che l'essere umano lo sia ancora di più.

I dati scientifici ci dicono che, mese dopo mese, stiamo infilando una serie infinita di nuovi record di temperatura, a Siviglia 45 °C, giusto per citare un dato; parallelamente stiamo contando una serie altrettanto infinita di eventi estremi, come alluvioni e tornado/cicloni improvvisi e devastanti, come avvenuto in Texas, di nuovo per citare solo un caso.

Mi domando se esiste ancora qualcuno che nega la crisi climatica. Forse in Italia i negazionisti sono diminuiti, ma anche coloro che la ammettono (difficile negare l'evidenza!) si ostinano a dire che non è di origine antropica, che i combustibili fossili e il nostro comportamento irresponsabile non c'entrano, che non dobbiamo deturpare l'ambiente con impianti fotovoltaici e, soprattutto, eolici e che è inutile spendere soldi pubblici per potenziare le energie rinnovabili.

Chi si erge a paladino di questo “risparmio”, però, dovrebbe insorgere contro l'aumento della spesa pubblica per le armi. Certamente, sono molto allettanti le parole della Meloni “ci saranno significative ricadute economico-industriali e occupazionali per il nostro Paese”, ma nascondono il fatto che i soldi pubblici destinati all'acquisto di nuovi armamenti andranno, prevalentemente, nelle tasche di Leonardo e Fincantieri (e, in cascata, alla loro rete di sub-fornitori), che da sole rappresentano il 75% dei ricavi militari in Italia (stimati da Mediobanca in circa 20 miliardi di euro).

Poi c'è il piano *ReArm Europe*, sul quale mi domando: perché l'Europa si dovrebbe riarmare? Qualcuno ci ha dichiarato guerra? Forse la risposta la troviamo in una recente intervista del professore emerito di Economia Civile all'Università di Bologna, Stefano Zamagni, che relativamente a questo piano ha detto “Oggi è l'industria delle armi che guida la danza. La politica non è più libera e chi comanda è il complesso militare-industriale-finanziario”.

È veramente cinico pensare che la guerra sia profitto e chiudere gli occhi di fronte ai civili, morti nei bombardamenti in Ucraina, e, soprattutto, ai bambini e alle donne, che vengono uccisi a Gaza mentre sono in fila per avere un po' d'acqua e di cibo.

Io sono solo una chimica e non sono in grado di capire fino in fondo la complessa situazione geopolitica, ma rimango allibita quando leggo che Trump si erge a paladino della pace e che, dopo aver parlato con Putin per trovare una qualche soluzione a questa guerra che si trascina da più di tre anni, invia armi a Zelensky; non mi sembra proprio la strada per arrivare a un accordo, eppure qualcuno ha proposto Trump al Premio Nobel per la Pace. Sono ancora più esterrefatta dalla notizia che Netanyahu è infastidito dalla guerra, che lui stesso ha scatenato, perché lo distrae dai preparativi per il matrimonio del figlio e che, nonostante abbia avuto un mandato di arresto con l'accusa di sterminio, di utilizzo della fame come metodo di guerra e di stragi contro civili, è ancora lì a fare il bello e il cattivo tempo.



I protagonisti della triste storia di oggi: D. Trump, V. Putin e B. Netanyahu

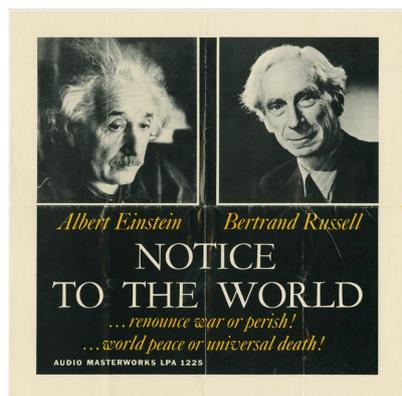
Ultimamente in questo scenario si è inserito l'Iran e, allora, la discussione si è concentrata sulla percentuale di arricchimento dell'uranio che questo Paese è riuscito a raggiungere; alcune fonti dicono 50%, altre 60% e altre ancora oltre il 60%.

Capisco che la questione sia importante e delicatissima, perché ciò permette di ottenere bombe all'uranio, per intenderci quella che rase al suolo Hiroshima, ma, secondo me, ci si doveva focalizzare soprattutto su un altro aspetto e, cioè, che c'è sempre una commistione fra nucleare civile e nucleare militare e il caso dell'Iran ne è la chiara dimostrazione. Purtroppo, questo è un problema che viene sempre minimizzato quando si parla, anche in Italia, di costruire nuove centrali nucleari.

Poi, naturalmente, c'è il fatto che le armi nucleari non dovrebbero essere sviluppate e usate per i loro effetti devastanti a breve e a lungo termine (in realtà tutte le armi andrebbero abolite, ma forse sono un'irriducibile sognatrice).

Penso che Albert Einstein si stia rivoltando nella tomba constatando che l'umanità non ha proprio imparato nulla dalla storia; risuonano quanto mai attuali e inascoltate le sue parole, contenute nel manifesto contro l'atomica, firmato assieme a Bertrand Russell: *chiedo ai governi, davanti al bivio tra morte universale della specie umana o nuovo Paradiso, di rinunciare alla guerra e trovare mezzi pacifici per la soluzione di tutti i loro motivi di contesa. Non c'è alternativa. In una qualsiasi guerra futura saranno certamente usate armi nucleari e queste armi minacciano la continuazione dell'esistenza umana.*

Ma anche papa Francesco si sta rivoltando nella tomba; speriamo che vegli su questo *Homo Sapiens Sapiens* che, mi sembra, abbia totalmente perso questo suo duplice attributo.



Scusandomi per lo sfogo, di cui, però, avevo proprio bisogno (mi sono trattenuta per tanto tempo), vengo finalmente alla nostra rivista che, dopo il numero due dedicato ai contributi presentati dalla Divisione di Didattica al XXVIII Congresso Nazionale della Società Chimica Italiana, torna al suo formato tipico. È un fascicolo adatto per essere letto "in vacanza"; infatti, oltre a spunti per il ritorno in classe, trovi argomenti più generali che potrai, comunque, discutere con i tuoi studenti.

Giusto per stuzzicare la tua curiosità: la densità, un concetto tanto comune quanto incompreso dagli studenti; la potenzialità didattica dei musei e delle collezioni di strumenti scientifici; la catalisi ecosostenibile; una rivisitazione dell'enciclica di papa Francesco; alcuni materiali di cui non potremo mai fare a meno; il racconto di un chimico senior che ricorda personaggi importanti e fondamentali per la storia recente della nostra disciplina. E altro ancora ...

Buone vacanze e buona lettura

Elisabetta

La densità come concetto chiave: un percorso verticale e fenomenologico

Marco Caruso

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

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

Abstract. This article presents a vertical teaching path on density, designed for students from middle school to university. A phenomenological approach and the macro-micro-symbolic triangle are used to build a progressive understanding of the concept. Common misconceptions and preconceptions are addressed, with experiments such as saline solution stratification supporting the correction of erroneous ideas. The article incorporates active teaching methodologies and reflects on how density can serve as a gateway to fundamental scientific literacy.

Keywords: densità; approccio fenomenologico; metodologie didattiche attive; alfabetizzazione scientifica

1. Introduzione

La densità, definita come il rapporto tra massa e volume, è un concetto fondamentale nelle scienze, ma spesso mal compreso dagli studenti. Un percorso didattico verticale offre l'opportunità di consolidarne progressivamente la sua comprensione, adattandosi ai diversi livelli cognitivi e alle esperienze degli studenti.

L'approccio descritto in questo articolo nasce dal progetto PLS (Piano Lauree Scientifiche) nel quale sono state sviluppate attività laboratoriali integrate per gli studenti della scuola secondaria di primo e secondo grado. Queste attività sono state successivamente sperimentate in un corso di formazione rivolto agli insegnanti, al fine di supportare l'adozione di metodologie didattiche attive e fenomenologiche. In particolare, il progetto si è concentrato sull'uso di esperimenti pratici e sull'approccio laboratoriale, per rendere la densità un concetto comprensibile e accessibile, partendo dall'osservazione diretta dei fenomeni.

L'approccio si fonda su due pilastri principali:

1. *Metodologia fenomenologica*, che privilegia l'osservazione e la manipolazione diretta dei fenomeni per favorire l'apprendimento esperienziale, come suggerito da Dewey (1938) e da Kolb (1984) [1, 2] nella teoria del ciclo dell'apprendimento esperienziale
2. *Triangolo macro-micro-simbolico*, un modello sviluppato da Johnstone (1991) [3] che collega osservazioni macroscopiche, spiegazioni microscopiche e rappresentazioni simboliche, essenziale per superare le difficoltà cognitive nell'apprendimento della chimica

Secondo Johnstone, l'apprendimento della chimica richiede di partire dall'osservazione diretta del mondo naturale, favorendo un approccio fenomenologico. Questo significa procedere come segue.

- *Iniziare dal macro*: gli studenti devono familiarizzare con fenomeni tangibili, come il comportamento delle sostanze o i cambiamenti di stato. Ciò crea un punto di riferimento concreto, che diventa essenziale per costruire concetti più astratti.
- *Costruire un ponte verso il micro*: l'interpretazione microscopica deve essere introdotta gradualmente e in modo guidato, spiegando come le interazioni tra particelle possano spiegare i fenomeni osservati. Questo passaggio richiede strumenti di visualizzazione (es. modelli tridimensionali, simulazioni) e una comprensione del funzionamento degli strumenti analitici utilizzati per studiare il micro.

- *Integrare il simbolico*: una volta consolidati i legami tra macro e micro, le rappresentazioni simboliche come formule chimiche ed equazioni devono essere introdotte per formalizzare le conoscenze acquisite.

Johnstone sottolinea l'importanza di comprendere a fondo il funzionamento degli strumenti scientifici, come microscopi elettronici, spettroscopi e altri dispositivi analitici. Questi strumenti diventano fondamentali per "sfiurare" la dimensione microscopica, poiché non possiamo accedervi direttamente. Questo richiede una conoscenza chiara delle basi operative degli strumenti, la capacità di interpretare i dati forniti, collegandoli al livello macroscopico, e una consapevolezza delle limitazioni degli strumenti e degli errori sperimentali, per evitare di affidarsi ciecamente ai risultati senza un'adeguata analisi critica. L'approccio triangolare di Johnstone è fondamentale per superare le difficoltà cognitive associate alla chimica. Molti studenti tendono a concentrarsi esclusivamente sul livello simbolico (formule ed equazioni), perdendo il collegamento con il mondo reale, il mondo microscopico e particellare. Altri si bloccano tra il macro e il micro, non riuscendo a immaginare il mondo particellare e a collegarlo ai fenomeni osservati; altri ancora, credono che ciò che osservano sia spiegato semplicemente dalle leggi e dalle equazioni che conosciamo oggi, senza rendersi conto che esse stesse sono state sviluppate partendo da osservazioni-esperimenti e non viceversa. Questo malinteso può impedire loro di apprezzare il legame tra teoria e pratica, tra il modello matematico e la realtà fisica. L'approccio triangolare aiuta a colmare queste lacune, mostrando come ogni livello – simbolico, microscopico e macroscopico – sia interconnesso e come il passaggio da uno all'altro richieda una comprensione completa di tutti gli aspetti.

2. Le sfide dell'insegnamento – La densità

Gli studenti spesso arrivano in aula con idee intuitive, ma errate, come la confusione tra densità e peso, o l'errata associazione della viscosità con il galleggiamento. Le misconcezioni più comuni includono:

- L'idea che l'olio galleggi sull'acqua perché è "più leggero" invece che meno denso
- La percezione che materiali più voluminosi siano automaticamente più densi

I preconcetti (intuizioni corrette, ma incomplete) riguardano spesso la definizione di densità come la quantità di massa in un dato volume, ma non si coglie che la densità è una proprietà *intensiva* e non *estensiva*. Questo significa che la densità non varia al variare delle dimensioni del sistema, ma dipende esclusivamente dalla natura della sostanza e dalla temperatura.

3. Metodologie didattiche per affrontare le misconcezioni

Secondo Bruner (1961) [4], un approccio attivo che metta lo studente al centro del processo di apprendimento è essenziale per scardinare le idee errate.

Gli esperimenti progettati devono:

- creare situazioni in cui le misconcezioni portino a risultati non coerenti con le osservazioni
- guidare la riflessione critica sul fallimento, facilitando una ristrutturazione cognitiva

3.1 Approccio fenomenologico

Nel primo biennio della scuola secondaria di secondo grado, l'insegnamento della chimica spesso soffre di un'eccessiva astrazione. L'approccio fenomenologico consente agli studenti di partire da osservazioni dirette e concrete, seguendo un modello di insegnamento induttivo. L'insegnante può introdurre concetti complessi gradualmente, partendo dall'esperienza.

3.2 Triangolo macro-micro-simbolico

Per una comprensione profonda della densità, è essenziale guidare gli studenti attraverso il triangolo di Johnstone:

- *Macro* - Osservazione di fenomeni visibili, come la stratificazione di liquidi
- *Micro* - Spiegazioni basate sulla struttura molecolare (polarità, legami)
- *Simbolico* - Utilizzo di formule chimiche, equazioni e grafici

4. Percorso didattico ed esperimenti

Il percorso didattico proposto richiede prerequisiti di base che solitamente si acquisiscono al termine della scuola secondaria di primo grado. Tra questi: la capacità di riconoscere relazioni di proporzionalità tra grandezze diverse, una comprensione intuitiva del concetto di densità, anche in contesti non scientifici (ad esempio, la densità di popolazione), e la conoscenza empirica del galleggiamento, senza però un'analisi quantitativa dei fenomeni.

Le attività possono essere svolte seguendo l'ordine numerico indicato in questo articolo. Le prime due, basate su un approccio fenomenologico, sono finalizzate a correggere eventuali concezioni errate e a consolidare le conoscenze pregresse; le attività 3 e 4, invece, sono più adatte al primo anno della scuola secondaria di secondo grado, poiché permettono un passaggio graduale dall'osservazione macroscopica all'analisi microscopica e simbolica.

Prima di introdurre attività nuove o esperimenti complessi, è fondamentale ripassare i concetti appresi precedentemente per consolidare la comprensione. Ecco alcune attività pratiche che si potrebbero proporre agli studenti durante il primo biennio della scuola secondaria di secondo grado per riprendere e rafforzare il concetto di densità.

Attività 1. Galleggiamento di materiali diversi

Obiettivo: Rivedere il concetto di densità attraverso il galleggiamento dei materiali.

Materiali: Campioni di diversi materiali (legno, plastica, metallo) e una bacinella con acqua.

Procedura: Gli studenti prendono dei campioni di materiale diverso e verificano se galleggiano o affondano nell'acqua.

Analisi: I materiali che galleggiano sono meno densi dell'acqua, mentre quelli che affondano hanno una densità maggiore. Si possono osservare le forme degli oggetti per dimostrare che il galleggiamento e la densità non dipendono dalla forma (Figura 1), ma dalla relazione tra massa e volume. Gli studenti dovrebbero riflettere sulle condizioni operative, considerando l'importanza di come si conduce l'esperimento, cioè il controllo delle variabili (stesso volume d'acqua, oggetti comparabili per dimensione e composizione) e la ripetibilità della prova.



Figura 1. L'immagine mostra materiali simili per forma e volume, ma di masse diverse: i cilindri sono stati utilizzati dagli studenti per determinare la massa degli oggetti tramite il metodo dell'immersione in acqua, osservando lo spostamento del livello del liquido; l'esperimento ha permesso di comprendere che la densità non dipende solo dalla massa o dal volume considerati separatamente, ma dal loro rapporto, influenzando il galleggiamento e il comportamento nei fluidi (Laboratorio PLS "I.I.S. "G. Ruffini" di Imperia)

Attività 2. Prove di galleggiamento con liquidi diversi

Obiettivo: Confrontare il galleggiamento in vari liquidi per comprendere l'influenza della densità.

Materiali: Acqua, olio, alcol etilico, e piccoli campioni della stessa massa e dimensione (Figura 2). (Si può utilizzare anche un solo campione per le diverse immersioni, purché tra una immersione e l'altra venga pulito e asciugato).

Procedura: Gli studenti immergono il/i campione/i nei diversi liquidi e osservano il comportamento.

Analisi: Il galleggiamento o l'affondamento del/i campione/i dipende dalla densità del liquido in cui vengono immersi.

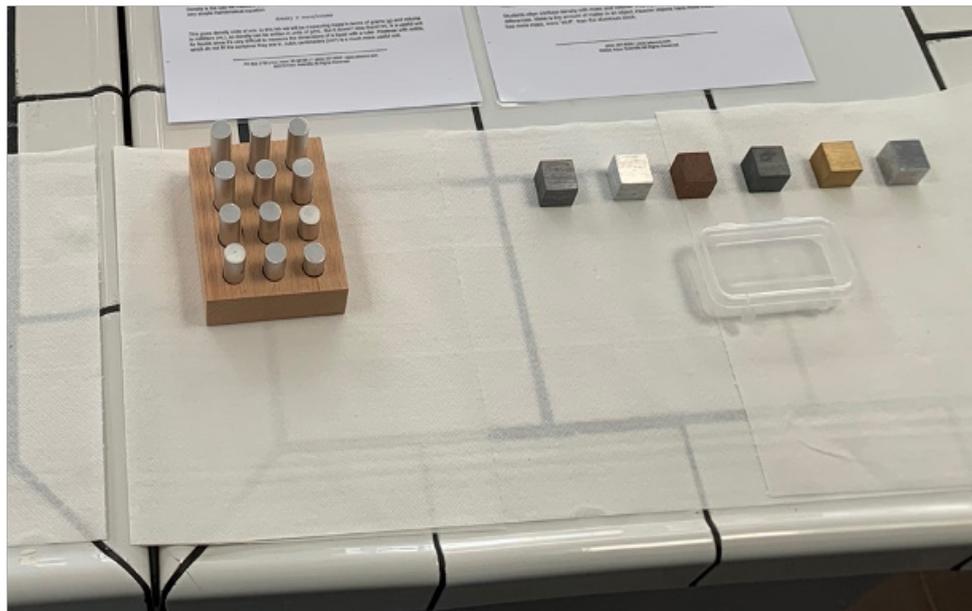


Figura 2. Esempi di campione utilizzabili nelle attività 2 e 4 (Laboratorio PLS "I.I.S. "G Ruffini" di Imperia)

Attività 3. Stratificazione di soluzioni saline

Obiettivo: Mostrare l'effetto della densità in soluzioni saline con stessa natura chimica ma densità diverse.

Materiali: Soluzioni saline con concentrazioni crescenti di NaCl, coloranti alimentari, provette.

Procedura: L'insegnante prepara una provetta contenente soluzioni saline di diversa concentrazione e fa osservare come esse si separano in strati distinti. Gli studenti cercano di replicare l'esperimento e verificano che la stratificazione avviene solo se le soluzioni vengono versate nella provetta con una certa accortezza.

Discussione: Dopo che le soluzioni si sono stratificate, si discute del motivo per cui, se si agita la provetta, la soluzione diventa omogenea. La densità differente è il fattore che ha permesso la stratificazione, ma poiché le soluzioni saline hanno la stessa natura chimica, la separazione scompare quando il sistema è perturbato. A confronto, un esperimento con acqua, olio ed alcol (come mostrato nella figura 3 sulla sinistra) evidenzierà che la differenza chimica tra i liquidi (polarità vs. apolarità) è fondamentale per ottenere una stratificazione stabile.

Sempre in figura 3 si mostra come acqua e olio, avendo densità differenti, si separano nettamente formando due strati distinti, a causa delle loro diverse caratteristiche chimiche. In contrasto, acqua e alcol, pur con densità ancora più dissimili, appaiono, invece, come un miscuglio omogeneo, poiché entrambi polari (vedi il vino).



Figura 3. Densità vs. natura chimica: sulla sinistra una miscela eterogenea di liquidi ottenuti grazie alla diversa densità e natura chimica, sulla destra una provetta contenente soluzioni saline di NaCl colorate con colorante alimentare stratificate solamente grazie alla diversa densità (Laboratorio PLS “I.I.S. “G Ruffini” di Imperia)

Attività 4. La galleggiabilità dei corpi e il Principio di Archimede

Obiettivo: Esplorare la galleggiabilità dei corpi e determinare la densità dei materiali utilizzando il principio di Archimede.

Materiali: Cilindro graduato o bacinella contenente acqua, cilindri o cubetti di diverso materiale come mostrato in figura 2, bilancia tecnica mostrata in figura 1, filo resistente per sospendere gli oggetti.

Procedura: (a) Misura della massa: determinare la massa di ciascun oggetto utilizzando una bilancia tecnica e annotare i risultati (prestare attenzione a portata e sensibilità dello strumento). (b) Determinazione del volume: riempire un cilindro graduato con un volume noto di acqua (prestare attenzione a portata, ma soprattutto sensibilità, divisione e altri dati riportati dal produttore, ad es. temperatura); immergere delicatamente l’oggetto nell’acqua, assicurandosi che sia completamente sommerso; misurare il nuovo livello del liquido e calcolare il volume dell’oggetto come differenza tra il livello finale e quello iniziale.

Calcolo della densità: Applicare la formula della densità scrivendo la formula con le unità di misura e usando nei calcoli il giusto numero di cifre significative.

È essenziale distinguere tra il volume dell’oggetto e il volume di acqua spostata: se l’oggetto è completamente sommerso, il volume di acqua spostata coincide con il volume dell’oggetto; se l’oggetto galleggia, il volume di acqua spostata rappresenta soltanto la parte sommersa dell’oggetto, risultando inferiore al suo volume totale.

Discussione: Gli studenti analizzano la relazione tra densità e galleggiamento, esplorando il concetto di spinta verso l’alto e di volume di fluido spostato. Durante l’esperienza, vengono evidenziati eventuali errori sperimentali, come letture imprecise del livello dell’acqua o masse non perfettamente determinate, e sottolineati alcuni collegamenti con il mondo reale (Figura 4).



Figura 4. Aggancio al mondo reale: nell'immagine si mostra come la diversa densità di Mar Mediterraneo e Mar Morto influisca sulla galleggiabilità dei bagnanti (i dati di densità dei bacini sono facilmente reperibili), evidenziando che una maggiore densità corrisponde a un contenuto maggiore di Sali; nelle tre prove sottostanti i valori mostrati dai tre dinamometri (strumenti per misurare le forze), chiariscono che all'aumentare della densità aumenta la spinta di Archimede e che, conseguentemente, è minore il valore di forza peso registrata

5. Varianti avanzate per proseguire il percorso

Il percorso didattico proposto si sviluppa in modo verticale, con l'obiettivo di accompagnare gradualmente gli studenti dal primo anno della scuola secondaria di secondo grado fino a un livello di approfondimento universitario. La scelta di questa progressione è determinata dalla necessità di introdurre i concetti in modo graduale, partendo da un approccio fenomenologico nelle prime fasi, per poi evolvere verso un'analisi quantitativa più rigorosa.

Le prime attività sono progettate per favorire la comprensione intuitiva della densità e del galleggiamento, senza introdurre formalismi matematici o concetti legati agli errori sperimentali. Solo successivamente, nell'attività 4, si inizia a introdurre la questione della precisione strumentale e delle cifre significative, ponendo le basi per una trattazione più analitica.

Questo percorso trova la sua naturale prosecuzione in ambito universitario, dove la sperimentazione richiede un'analisi dettagliata degli errori e delle incertezze. La trattazione matematica, che negli anni iniziali della scuola secondaria sarebbe prematura, diventa essenziale per comprendere la validità e l'affidabilità delle misure scientifiche. L'obiettivo finale è, quindi, sviluppare negli studenti una consapevolezza progressiva della metodologia sperimentale, conducendoli da una comprensione qualitativa dei fenomeni fino a una loro formalizzazione rigorosa.

Di seguito si delineano le attività specifiche per la determinazione della densità che, in coerenza con quanto esposto, possono essere proposte in ambito universitario.

5.1 Utilizzo di celle di carico a strain gauge

Le celle di carico a strain gauge sono strumenti capaci di misurare direttamente la forza di Archimede. Questi trasduttori, che convertono quanto misurato direttamente in un segnale elettrico, permettono di ottenere dati con un buon grado di accuratezza e introdurre gli studenti all'analisi delle incertezze strumentali e delle fonti di errore.

Usando una configurazione a quattro terminali è possibile effettuare misure di precisione che eliminano l'influenza della resistenza di cavi e connettori, garantendo una maggiore accuratezza. Questa configurazione minimizza errori legati al circuito elettrico.

Per migliorare ulteriormente l'accuratezza delle misure, l'esperimento può essere svolto a temperatura controllata. Un'opzione efficace consiste nell'utilizzo di un bagno di ghiaccio fondente (0 °C, 273 K), verificato tramite termometri a resistenza (RTD) opportunamente tarati.

È importante sottolineare che predisporre di un setup controllato permettere di discutere la propagazione degli errori, sia sistematici sia casuali, offrendo agli studenti l'opportunità di approfondire concetti avanzati di metrologia e fisica sperimentale.

6. Conclusioni

Un percorso verticale e fenomenologico, come quello qui presentato, consente di affrontare e superare le misconcezioni più comuni, permettendo agli studenti di costruire una comprensione solida e progressiva del concetto di densità.

Gli esperimenti proposti sono stati progettati per mettere in crisi le idee errate degli studenti e guidarli verso una ristrutturazione cognitiva basata sull'osservazione e sulla riflessione critica.

Inizialmente, il concetto di densità viene esplorato attraverso il *galleggiamento di materiali diversi*, che permette di evidenziare come il comportamento di un corpo immerso in un liquido dipenda dalla sua densità e non dalla sua massa assoluta.

Successivamente, il *galleggiamento in liquidi diversi* rafforza questa idea mostrando che la spinta di Archimede dipende anche dalla densità del fluido, e non solo da quella dell'oggetto immerso. Il concetto viene poi approfondito con la *determinazione sperimentale della densità dei solidi*, utilizzando strumenti di misura e introducendo un primo approccio quantitativo.

Infine, la *stratificazione delle soluzioni saline* dimostra come la densità influenzi la disposizione dei liquidi nei sistemi eterogenei, ma non sia la sola e unica responsabile di tale fenomeno.

Il percorso didattico qui presentato permette una transizione graduale dall'osservazione qualitativa alla formalizzazione quantitativa, sviluppando negli studenti una crescente consapevolezza metodologica e sperimentale.

L'introduzione di strumenti avanzati nelle fasi più mature del percorso offre, inoltre, l'opportunità di approfondire la metrologia e l'analisi degli errori sperimentali, fondamentali per un approccio scientifico rigoroso.

Questa progressione non solo consente di superare le difficoltà concettuali, ma fornisce agli studenti strumenti per affrontare in modo critico e autonomo problemi più complessi, rafforzando le loro competenze scientifiche e la loro capacità di interpretare dati sperimentali con rigore e consapevolezza.

Riferimenti bibliografici

- [1] J. Dewey, *Experience and Education*, Macmillan, New York, 1938.
- [2] D. A. Kolb, *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs (NJ), 1984.
- [3] A. H. Johnstone, Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem, *J. Comput. Assist. Learn.*, 1991, **7**, 75–83.
- [4] J. S. Bruner, *The Process of Education*, Harvard University Press, Cambridge (MA), 1961.

Insegnare (e imparare) la chimica attraverso i musei e le collezioni di strumenti scientifici

Valentina Domenici e Gaetano Angelici

Dipartimento di Chimica e Chimica Industrial dell'Università di Pisa

e-mail: valentina.domenici@unipi.it; gaetano.angelici@unipi.it

Abstract. In this paper, the educational potential of historical scientific instruments was explored and implemented as part of a special teaching project supported by the University of Pisa during the 2023-2024 academic year. The project, titled *Teaching (and Learning) Chemistry through Museums and Collections of Scientific Instruments*, was coordinated by the authors of this article and it served as an integrative activity for the optional courses “Fundamentals and Methodologies for Teaching Chemistry Education” (Bachelor’s Degree in Chemistry) and “Introduction to Medicinal Chemistry” (Master’s Degree in Chemistry). The project involved fifteen students and resulted in the valorisation and enhancement of part of the collection of historical scientific instruments of the Department of Chemistry and Industrial Chemistry at the University of Pisa. Moreover, the undergraduate students actively contributed in creating the museum collection’s website, enriched with historical and educational descriptions of the instruments. This collaborative work later enabled the undergraduate students to conduct demonstration teaching activities for high school students, which were presented during a concluding event of the project. This article will detail the various steps of the activity and discuss its educational, formative, and cultural outcomes, also taking into account the feedback received from the students.

Keywords: musei; didattica della chimica; contesto non formale; formazione insegnanti; scuole secondarie; didattica universitaria

1. Introduzione

I musei e le collezioni scientifiche rappresentano un contesto molto studiato negli ultimi anni come esempio di contesto non formale per l'apprendimento della scienza [1]. Come gli altri ambiti non formali, anche i musei scientifici, sia i musei conservativi sia i musei interattivi come i cosiddetti *science center*, sono caratterizzati da un insieme di aspetti a loro specifici, come il target, le modalità e i metodi comunicativi, gli obiettivi e, non ultimo, il contesto culturale e sociale nel quale sono inseriti [2]. Alcuni studi hanno mostrato come anche nel caso della chimica, i musei e le collezioni rappresentino un contesto ideale per apprendere alcuni concetti fondanti della disciplina in relazione con la società e per l'apprendimento lungo tutto l'arco della vita, *life-long learning* [3]. Ad esempio, alcuni lavori di letteratura riportano come sia possibile utilizzare il contesto del museo scientifico per affrontare argomenti di chimica legati alla sostenibilità e all'educazione ambientale, promuovendo comportamenti e atteggiamenti positivi nei confronti della disciplina [4-6]. Altri studi hanno evidenziato come il museo scientifico, con i tipici laboratori dimostrativi e interattivi che prevedono una partecipazione attiva dei visitatori, sia efficace nell'aumentare l'interesse verso la scienza, e la chimica in particolare, da parte degli studenti delle scuole che li frequentano [7, 8]. Infatti, accanto al loro ruolo educativo e formativo, i musei scientifici hanno anche il ruolo di suscitare curiosità e divertimento, avvicinando i visitatori alla scienza, affrontando tematiche che non vengono approfondite a livello scolastico [1]. Una caratteristica dei laboratori didattici dimostrati-

vi organizzati nel contesto museale è quella di presentare gli argomenti scientifici in collegamento con la società e con la vita di ogni giorno. Prendendo spunto da situazioni reali, questi laboratori aiutano i partecipanti a sviluppare nuove competenze e abilità, per poter mettere in pratica le conoscenze scientifiche acquisite in diversi contesti. Un altro aspetto tipico dei laboratori in ambito museale è il loro carattere multidisciplinare: ne sono un esempio i cosiddetti laboratori STEM (Science Technology Engineering and Math) [9]. Seguendo un approccio didattico interattivo, i laboratori STEM si basano sull'utilizzo congiunto di conoscenze di diverse discipline scientifiche, che vengono quindi insegnate insieme e non in modo settoriale, perché la risoluzione di problemi o l'interpretazione di un fenomeno richiedono l'utilizzo di più competenze: matematiche, fisiche, tecnologiche, etc... Recentemente, un'altra filosofia pedagogica chiamata STEAM (Science Technology Engineering Arts and Math) si è affacciata nel panorama degli approcci didattici multidisciplinari [10, 11]. Questo nuovo approccio si basa sull'inclusione del termine "Arts" tra le discipline scientifiche, a significare l'importanza della creatività, dello sviluppo di pensieri alternativi nella risoluzione di problemi scientifici e più in generale dell'utilità di integrare anche le conoscenze e competenze delle discipline umanistiche nello studio di fenomeni complessi, naturali e umani [12]. L'approccio STEAM nel campo dell'insegnamento della chimica è coerente con il modello di insegnamento (e di apprendimento) chiamato *tetraedrico*, proposto dal chimico Mahaffy nel 2006 [13] e successivamente sviluppato da Sjöström nel 2013 [14]. Questo modello prevede infatti che l'insegnamento della chimica possa essere realizzato su diversi livelli di complessità in funzione degli allievi [14], partendo da un livello di base (livello zero) centrato sui concetti della disciplina, più teorici e astratti, per arrivare ad un livello avanzato (livello tre) in cui l'insegnamento della chimica non può prescindere dalla contestualizzazione storica e dalla riflessione filosofica ed etica. Il modello tetraedrico è anche il modello di riferimento di un insegnamento della chimica in relazione con le altre discipline, inserito nel contesto di situazioni reali, sperimentabili dagli allievi.

Uno degli autori (Valentina Domenici) ha introdotto recentemente l'approccio STEAM sia come argomento sia come metodologia all'interno di un corso di formazione per futuri insegnanti di chimica, il corso di "Fondamenti e metodologie didattiche per l'insegnamento della chimica" del corso triennale in Chimica dell'Università di Pisa [15-18]. La metodologia STEAM è utilizzata con un approccio integrato all'insegnamento della chimica insieme ad altre metodologie didattiche attive, come il *project-based learning* (PjBL) e il *cooperative learning* [15, 18]. Gli allievi del corso devono progettare una attività didattica seguendo uno schema di progettazione piuttosto strutturato e che parte generalmente dalla visita di un museo o di una collezione scientifica per culminare con la realizzazione di una attività didattica o di un laboratorio nel contesto museale o durante *Open Day* o altri eventi di Terza Missione [15]. Tale strategia didattica è stata sperimentata negli anni passati sia in collaborazione con un museo naturalistico, il Museo di Storia Naturale di Rosignano (MuSNa) [19] sia con un museo di strumenti scientifici storici, il Museo Galileo di Firenze [20]. Queste attività risultano molto formative anche per chi non intende proseguire nel percorso professionale di insegnante, come risulta evidente dai feedback avuti negli anni dagli studenti che hanno seguito il corso [15, 18]. Come vedremo anche nel caso riportato in questo articolo, infatti, l'approccio didattico utilizzato è molto stimolante e permette di inserire la chimica e i suoi concetti fondanti in un contesto, storico e sociale, più ampio rispetto agli approcci didattici più tradizionali. La realizzazione di progetti didattici utilizzando queste metodologie aiuta gli studenti a sviluppare competenze trasversali, come la capacità di comunicare la scienza a diversi pubblici e di progettare delle attività lavorando in team. Il contesto museale, inoltre, essendo meno formale e disponendo di spazi aperti con strutture mobili, permette di sfruttare al meglio le metodologie attive e di utilizzare la creatività.

In questo articolo, presenteremo un progetto svolto nell'anno accademico 2023-2024 con un gruppo di studenti universitari dei corsi di laurea magistrale in Chimica e di laurea triennale in Chimica presso il Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale (DCCI) dell'Università di Pisa. Questo progetto, molto strutturato, come verrà descritto nell'articolo, ha coinvolto quindici studenti con un impegno abbastanza elevato al di fuori delle ore di lezione dei corsi di studio, ed è stato realizzato nell'ambito di un

progetto speciale di didattica finanziato dall'Ateneo di Pisa, intitolato *Insegnare (e imparare) la chimica attraverso i musei e le collezioni di strumenti scientifici* [21]. Come vedremo la parte centrale delle attività svolte dagli studenti è legata ad una collezione storica di strumenti e oggetti di valore storico legati alla scienza chimica che si trovano attualmente dislocati quasi interamente nell'atrio del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale. Uno dei risultati di queste attività è stata anche la realizzazione del sito web della collezione di strumenti scientifici storici del DCCI [22]. Come osservato in un precedente lavoro [18], e in una indagine preliminare su un gruppo di studenti universitari [23], gli strumenti scientifici storici suscitano molto interesse e curiosità da parte degli studenti, che ne comprendono le potenzialità didattiche. Anche a partire da queste riflessioni degli studenti [23], ha preso avvio l'idea di un progetto per la valorizzazione della collezione di strumenti scientifici storici di cui discuteremo l'impatto a livello didattico.

2. Il progetto

Il progetto speciale per la didattica si è svolto nel primo semestre dell'anno accademico 2023-2024, a partire dal mese di ottobre fino all'evento conclusivo del 7 febbraio 2024. Questo progetto è stato finanziato dall'Ateneo attraverso il bando per i progetti speciali per la didattica. L'Ateneo di Pisa, infatti, a partire dall'anno accademico 2018-2019 [21] ha introdotto un bando annuale per l'assegnazione di fondi per *progetti speciali di didattica* associati ai corsi dei propri docenti nelle diverse aree.

2.1 Partecipanti

Il progetto è stato proposto agli studenti dei corsi "Fondamenti e metodologie didattiche per l'insegnamento della chimica" (corso opzionale al terzo anno del corso di Laurea triennale in Chimica, docente: Valentina Domenici) e "Introduzione alla chimica medicinale" (corso opzionale del corso di Laurea magistrale in Chimica, docente: Gaetano Angelici). Hanno partecipato alle varie attività proposte 14 studenti, di cui 4 studenti iscritti al corso di laurea magistrale in chimica e 10 studenti iscritti al terzo e al secondo anno del corso di laurea triennale in chimica. Ha partecipato al progetto anche uno studente del corso di laurea triennale in chimica, vincitore del bando dedicato al progetto per attività di tutorato. All'evento finale, progettato e realizzato dagli studenti partecipanti al progetto, hanno partecipato suddivisi in tre turni circa duecento studenti provenienti da tre classi del Liceo Scientifico "Barsanti e Matteucci" di Viareggio, due classi dall'Istituto d'Istruzione Superiore "E. Santoni" di Pisa, due classi dall'Istituto d'Istruzione Superiore "A. Pesenti" di Cascina (Pisa) e una classe dal Liceo Scientifico (op. scienze applicate) "F. Cecioni" di Livorno, accompagnati da dodici insegnanti [24].

2.2 Metodologie didattiche

Durante le varie fasi del progetto didattico, che saranno descritte nei paragrafi seguenti, sono state utilizzate diverse metodologie didattiche quali: il *brainstorming*, il *cooperative learning*, il *project-based learning* (PjBL), la discussione collettiva, la didattica laboratoriale in ambito museale e la didattica digitale. Come specificato in precedenza, queste scelte metodologiche sono in linea con l'idea che un approccio integrato tra diverse strategie didattiche [25, 26] sia più efficace per un insegnamento della chimica contestualizzato, ovvero inserito in un contesto storico, culturale e sociale, seguendo il modello tetraedrico di insegnamento della chimica [13, 14]. Gli studenti target di questo progetto sono studenti universitari che, alla fine del loro percorso di formazione, devono acquisire una serie di conoscenze, di abilità e di competenze che includono la capacità di riflettere in modo critico sui concetti chiave della chimica e la loro evoluzione storica, sui legami tra chimica e società, sulle applicazioni della chimica nei diversi ambiti della vita e sui risvolti etici della chimica. Tutti questi elementi rientrano nello sviluppo della "componente umana" del modello tetraedrico e il progetto si ispira appunto a tale modello di insegnamento e apprendimento della chimica.

2.3 Le fasi della realizzazione del progetto

Oltre alle lezioni in aula dei rispettivi corsi coinvolti nel progetto, gli studenti e le studentesse hanno partecipato a due visite guidate presso altrettante strutture museali a Firenze e a Pisa. La prima visita è stata effettuata il 28 ottobre 2023 presso il Museo Galileo di Firenze [20] con la guida dell'esperto e curatore delle attività didattiche per il museo, dr. Andrea Gori (Figura 1). Questo museo è una delle realtà più importanti nella regione Toscana per quanto riguarda i musei scientifici e contiene tra le altre le collezioni medicee, iniziate con Cosimo I de' Medici (1519-1574). Le collezioni che sono state ospitate in passato a Palazzo Vecchio, e poi presso gli Uffizi, prima di essere definitivamente spostate nella sede attuale del Palazzo Castellani nel centro storico di Firenze. Nel 1657, grazie alla nascita dell'*Accademia del Cimento*, inaugurata da Ferdinando II (1610-1670) e Leopoldo de' Medici (1617-1675), la collezione scientifica si arricchì di termometri, barometri, strumenti matematici, e successivamente di microscopi, telescopi, strumenti spettroscopici, e oggetti legati alla sperimentazione didattica della fisica. Durante la visita alle varie sale del museo, i ragazzi divisi in gruppi dovevano fare un'osservazione guidata seguendo una traccia contenente alcune domande guida (sui testi, sulla disposizione della collezione, sul materiale multimediale, etc.) [18].

Durante una successiva lezione, le osservazioni raccolte dagli studenti durante la visita al Museo Galileo sono state condivise e discusse, con lo scopo di mettere in evidenza in particolare gli aspetti didattici e comunicativi specifici del contesto museale, come esempio di contesto non formale.



Figura 1. Gruppo degli studenti in visita presso il Museo Galileo di Firenze: spiegazione introduttiva della storia del museo a cura del dr. Andrea Gori (sinistra); uno studente utilizza le “lenti di Galileo” riproducendo una scena di osservazione della collina di fronte al Museo Galileo (destra)

Una seconda visita guidata è stata fatta il 14 novembre 2023 alla sede di due diverse realtà museali che si trovano a Pisa, in strutture adiacenti: il Museo degli strumenti di fisica [27], che al momento della visita era chiuso al pubblico e che è stato gentilmente aperto dal dr. Claudio Luperini, curatore della collezione, e la Ludoteca scientifica [28], un museo interattivo dedicato alle scienze, sotto la guida del direttore, il prof. Sergio Giudici, e di alcuni animatori della Ludoteca (Figura 2).



Figura 2. Studenti in visita presso la Collezione degli Strumenti di Fisica di Pisa, con la spiegazione da parte del dr. Claudio Luperini degli strumenti di Antonio Pacinotti (sinistra); studenti assistono a una dimostrazione presso la Ludoteca Scientifica di Pisa (destra)

Queste due realtà sono molto diverse sia nelle loro finalità sia nelle loro caratteristiche principali. Il primo è un museo conservativo – storico che raccoglie principalmente strumenti di fisica risalenti ai periodi dal XVIII alla prima metà del XX secolo, e includono molte delle invenzioni realizzate da Antonio Pacinotti, dalla celebre “macchinetta di Pacinotti” [29], la prima dinamo-motore a corrente continua, fino agli apparati a trazione elettromagnetica. La Ludoteca scientifica invece è un moderno museo della scienza, della tipologia degli “science center”, con una serie di esposizioni e laboratori dimostrativi dove i visitatori hanno l’obbligo di toccare con mano e sperimentare i principi scientifici e il funzionamento degli strumenti. Qui il divertimento e l’interattività sono aspetti caratterizzanti l’esperienza museale.

Questa attività fuori sede è stata molto significativa per far conoscere diverse tipologie di musei scientifici e per commentare poi con gli studenti le caratteristiche dei laboratori dimostrativi museali.

Un’ulteriore attività introdotta nel progetto è stata una lezione congiunta tra i due corsi coinvolti nel progetto (Figura 3) tenuta da uno di noi (Gaetano Angelici). La lezione aveva due obiettivi principali: far vedere come a partire da un oggetto di una collezione scientifica storica sia possibile costruire una lezione o un intervento didattico, e affrontare alcuni temi interdisciplinari legati alla chimica e al suo impatto sulla società. L’oggetto scelto per la lezione fa parte della collezione di strumenti presenti nel Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell’Università di Pisa, una cassetta di aggressivi chimici del servizio chimico militare [30]. La cassetta contiene un kit di addestramento militare che faceva parte del Servizio Chimico Militare in uso nel periodo 1923-1945. Fu utilizzato dall’esercito italiano sotto il Ministero della Guerra. La cassetta contiene in particolare dei recipienti in vetro, dei dosatori, e probabilmente conteneva anche le fiale di alcuni tra i seguenti aggressivi chimici: fosgene, iprite, difenilcloroarsina e cloropicrina. Prendendo spunto da questo oggetto è stata preparata una lezione sugli aspetti chimici, e soprattutto sugli aspetti storici ed etici legati alle armi chimiche.



Figura 3. Fotografia della “cassetta di aggressivi chimici” conservata presso il Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell’Università di Pisa (sinistra); un momento della lezione del prof. Gaetano Angelici sulle armi chimiche e sull’etica della chimica (destra)

Nella fase successiva del progetto, i ragazzi suddivisi in gruppi di tre o quattro studenti ciascuno hanno iniziato una attività progettuale, secondo la modalità PjBL, che ha rappresentato il cuore del progetto speciale per la didattica. Nel lavoro dei gruppi è stato seguito il cooperative learning formale con la divisione in ruoli, così definiti: 1) comunicatore 1 e osservatore/controllore della dinamica del gruppo; 2) comunicatore 2 e responsabile delle risorse/materiale; 3) facilitatore, aiutante della discussione interna al gruppo e responsabile del materiale fotografico; 4) responsabile della redazione del materiale finale (schede tecniche, materiale didattico per le scuole, etc.) in modo analogo a quanto descritto in precedenti lavori [15, 16, 18].

Con il nostro aiuto e con il supporto di un tutor precedentemente formato, lo studente Marco Matteoni, ogni gruppo doveva scegliere quattro strumenti o oggetti storici presenti nelle bacheche poste al piano terra del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale e realizzare il progetto seguendo questi tre step:

- 1) Ricerca di informazioni storiche e scientifiche su ognuno degli oggetti/strumenti scelti con il supporto di personale docente e del tutor (4-10 ore).
- 2) Preparazione di una scheda tecnica di accompagnamento dell’oggetto scelto (6 ore).
- 3) Preparazione di una attività didattica su ognuno degli oggetti scelti in vista dell’evento finale con gli studenti delle scuole secondarie di II grado (6-10 ore).

Per ogni oggetto o strumento scelto, gli studenti dovevano riempire delle schede tecniche, come quelle che sono scaricabili dal sito web della collezione [22]. Gli studenti potevano avvalersi dell’aiuto del tutor, dei docenti responsabili del progetto e anche del supporto di altri docenti del DCCI che in passato hanno curato il restauro di alcuni strumenti o li hanno utilizzati. Questa parte del lavoro è stata molto importante per gli studenti e le studentesse in quanto hanno capito il funzionamento della strumentazione, i suoi meccanismi e gli accorgimenti tecnici, come sarà discusso alla fine del lavoro. Contemporaneamente alla ricerca delle informazioni storiche e scientifiche sui vari oggetti selezionati, e alla successiva preparazione della scheda, il tutor Marco Matteoni con l’ausilio del tecnico David Macchia, ha iniziato a preparare il materiale fotografico. Tutti gli oggetti e gli strumenti sono stati fotografati con un particolare allestimento che ha permesso di mettere in evidenza anche la bellezza degli strumenti e alcuni dettagli che sono stati utili anche per la catalogazione. In figura 4 è riportato a titolo di esempio il prisma di KBr presente nella collezione [31] e l’etichetta che è stata preparata per la bacheca con incluso il QRcode che permette di accedere alla scheda tecnica dell’oggetto museale.

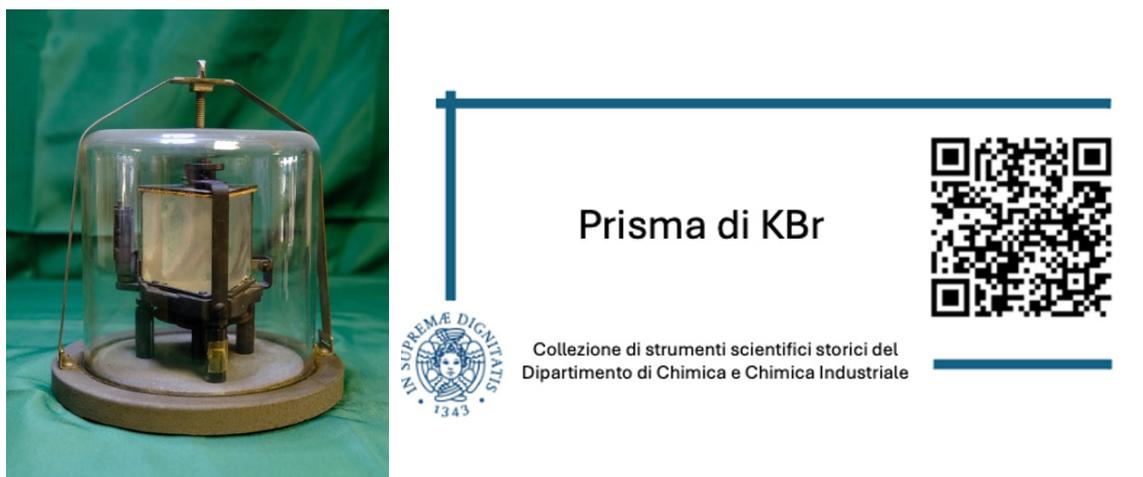


Figura 4. Fotografia in alta risoluzione di un prisma di KBr con allestimento museale (sinistra); etichetta con QRcode che rimanda alla scheda tecnica del prisma di KBr preparata dagli studenti (destra)

Prima dell'evento conclusivo, dedicato alla presentazione del progetto e alle attività didattiche organizzate dagli studenti, il tecnico informatico del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale, insieme al tutor e ad alcuni studenti, ha predisposto la pagina web della collezione degli strumenti scientifici [22] con le schede degli strumenti preparate dagli studenti (Figura 5).



Figura 5. Schermata principale del sito web dedicato alla collezione di strumenti scientifici del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Università di Pisa

In particolare, gli studenti hanno lavorato sui seguenti strumenti/oggetti museali: refrigeranti a spirale; refrigeranti a bolle; tensiometro bifilare Piccardi; rifrattometro di Abbe; filtrofotometro di Pulfrich; spettrometro di Hilger a deviazione costante; elettroscopio; prisma di KBr; Apparato per la misura della temperatura di fusione; Apparuccio di Abel Pensky; apparecchio per la registrazione delle fotografie; colorimetro di Wolff; cassetta degli aggressivi chimici; Reticolo di Rowland; viscosimetro di Engler; spettroscopio di Kirchhoff-Bunsen a tre braccia.

Per ognuno di questi oggetti sono stati preparati una scheda tecnica completa, un testo da inserire nella pagina web dedicata, un QRcode, un set di fotografie e una presentazione legata ad aspetti didattici utile per l'evento finale di cui parleremo nei successivi paragrafi.

3. Realizzazione delle esperienze e presentazioni per le scuole secondarie di II grado

Gli aspetti didattici legati alla strumentazione scientifica presente nella collezione sono stati discussi insieme ai ragazzi durante incontri fatti con i singoli gruppi nel periodo dicembre 2023-gennaio 2024. Inizialmente gli studenti hanno avuto qualche difficoltà nell'identificare i concetti chiave legati ad alcuni oggetti/strumenti e il loro possibile utilizzo a scopo didattico e dimostrativo avendo come target gli studenti delle scuole secondarie di II grado. L'aiuto dei docenti è stato necessario soprattutto per alcuni strumenti che gli studenti non avevano ancora incontrato nel loro percorso di studio. D'altra parte, questa è stata per loro anche un'occasione per imparare molte cose. Ad esempio, strumenti come il tensiometro bifilare Piccardi o il filtrofotometro di Pulfrich erano del tutto sconosciuti agli studenti del corso triennale in chimica. La scelta di questi strumenti è stata inizialmente motivata proprio dalla curiosità e dal "fascino" esercitato da questi oggetti presenti in bacheca, come dimostrato anche dall'indagine preliminare fatta durante il corso di "Storia della chimica ed elementi di didattica" nel 2022 e 2023 [23]. In questa ultima parte del progetto gli studenti hanno concentrato l'attenzione su alcuni aspetti didattici, legati a domande emerse durante le varie discussioni con i gruppi:

Come possiamo spiegare il funzionamento di questo strumento agli studenti della scuola secondaria? Lo strumento è abbastanza 'trasparente' per poter spiegarne il funzionamento? Quali sono i principi fisici o chimici legati al funzionamento di questo strumento? Quali sono le conoscenze che dobbiamo presumere già acquisite da parte degli studenti (prerequisiti)? Possiamo utilizzare lo strumento (ovvero lo strumento funziona sempre)? Possiamo fare dei semplici esperimenti per introdurre i principi fisici/chimici alla base del funzionamento dello strumento? Possiamo fare e/o far vedere dei video? Possiamo far toccare gli strumenti agli studenti? Può essere utile raccontare la storia di questi strumenti (chi li ha costruiti, per cosa sono stati costruiti, sono stati utili per fare qualche scoperta scientifica, etc.)?

Dopo una discussione e uno scambio molto interessante e costruttivo tra studenti e docenti alcuni gruppi hanno deciso di preparare per gli studenti della scuola secondaria una presentazione sulla storia dello strumento e sull'evoluzione fino agli strumenti di oggi. Ad esempio, questa è stata la scelta fatta dagli studenti che avevano lavorato sul rifrattometro di Abbe e sugli strumenti usati per l'analisi del colore (il colorimetro di Wolff e il filtrofotometro di Pulfrich). Altri studenti hanno, invece, scelto di realizzare dei semplici esperimenti per illustrare il funzionamento dello strumento (come esperimenti di ottica nel caso dello spettroscopio di Kirchhoff-Bunsen), o per spiegare i principi fisici dello strumento (come la viscosità dei fluidi nel caso del viscosimetro di Engler). Gli studenti che avevano scelto la cassetta degli aggressivi chimici hanno preparato invece una presentazione divulgativa sull'etica della scienza.

A conclusione di questo percorso molto articolato, interessante e partecipato da parte degli studenti, è stata organizzata una giornata dedicata alla presentazione del progetto, il 7 febbraio 2024, nell'aula magna del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale (Figure 6, 7 e 8). Nell'arco della giornata sono stati presentati i lavori degli studenti su tutti gli strumenti che erano stati scelti. Gli studenti hanno portato di volta in volta gli strumenti in aula magna e hanno fatto le loro presentazioni ed esperimenti davanti alle classi di diverse scuole secondarie di II grado che erano state suddivise su tre turni, due turni nella mattinata e uno nel pomeriggio. I ragazzi delle scuole hanno potuto assistere quindi ad almeno quattro presentazioni, conoscere e vedere da vicino almeno quattro strumenti storici. Gli studenti che non erano impegnati nella presentazione erano, comunque, a disposizione fuori dall'aula magna per fare da guida alle bacheche degli strumenti storici.

Alla giornata conclusiva hanno partecipato oltre duecento studenti delle scuole secondarie di II grado provenienti da quattro scuole diverse della Toscana, tutti del triennio, accompagnati dagli insegnanti. Tutte le presentazioni sono state apprezzate dagli studenti e dagli insegnanti, e in alcuni casi, c'è stata

una notevole interazione e partecipazione da parte degli studenti, che hanno fatto domande e hanno chiesto di poter vedere da vicino e di toccare gli strumenti.

Come discuteremo nella parte conclusiva dell'articolo, questa giornata è stata motivo di grande soddisfazione da parte degli studenti universitari, che si sono dimostrati molto preparati e positivamente colpiti dalla partecipazione e dall'interesse mostrati dagli studenti delle scuole.

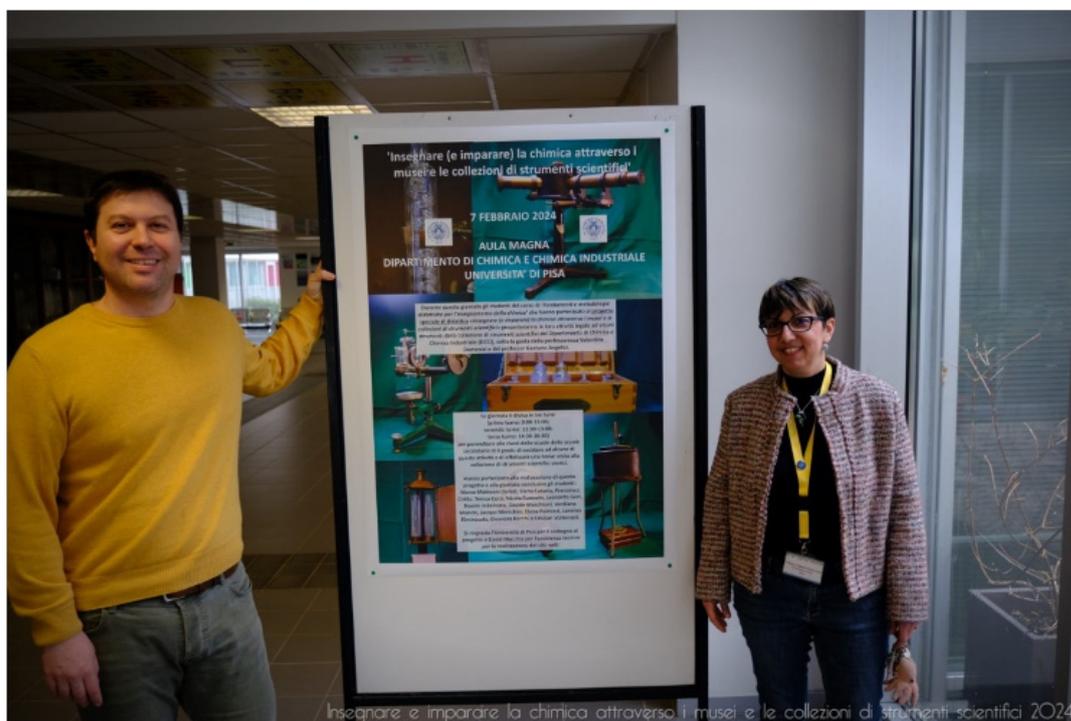


Figura 6. Presentazione della locandina dell'evento finale del progetto "Insegnare (e imparare) la chimica attraverso i musei e le collezioni di strumenti scientifici" del 7 febbraio 2024, alla presenza degli organizzatori (autori del presente articolo): Gaetano Angelici e Valentina Domenici



Figura 7. Foto degli studenti che hanno partecipato al progetto e all'evento finale con la prof. Valentina Domenici e il tutor Marco Matteoni (ultimo a destra)



Figura 8. Alcune fotografie degli studenti universitari durante le loro lezioni e dimostrazioni agli studenti delle scuole secondarie durante la giornata conclusiva del progetto

4. Considerazioni finali

L'evento conclusivo del progetto, con la presentazione da parte degli studenti universitari degli strumenti scientifici storici da loro scelti e delle attività didattiche da loro progettate, davanti agli studenti delle scuole secondarie, ha messo in evidenza vari aspetti notevoli del presente progetto.

Dal punto di vista degli studenti universitari che hanno partecipato, possiamo concludere che diversi obiettivi didattici sono stati pienamente raggiunti. In particolare, gli studenti e le studentesse hanno:

1. partecipato a tutte le fasi del progetto con impegno, mostrando sempre interesse e curiosità ad approfondire gli aspetti storici e scientifici;
2. lavorato in modo cooperativo, dividendosi i ruoli, raggiungendo un ottimo livello di interdipendenza, responsabilità, cooperazione e buone capacità di autovalutazione;
3. sviluppato competenze trasversali (*soft skills*) come una buona capacità di relazionarsi con gli altri, ottima capacità di comunicare argomenti scientifici con linguaggio appropriato davanti al pubblico;
4. imparato a progettare un intervento didattico e divulgativo, in alcuni casi ricorrendo alla didattica laboratoriale dimostrativa, mostrando sempre una discreta originalità nella selezione del materiale da mostrare e nella presentazione;
5. utilizzato in modo critico e responsabile le tecnologie digitali, ad esempio facendo ricerche in rete sugli strumenti storici o sfruttando al meglio le potenzialità delle tecnologie digitali, attraverso la realizzazione dei QRcode o nella fase di progettazione del sito web.

L'utilizzo di una metodologia integrata, in particolare con approccio STEAM, e metodologie PjBL e cooperative learning, ha favorito il pieno raggiungimento degli obiettivi didattici e questo è confermato anche dall'esito dell'esame conclusivo del corso, dove gli studenti che hanno partecipato al progetto hanno ottenuto votazione 30 o 30 e Lode.

Per quanto riguarda gli studenti delle scuole secondarie e i loro insegnanti che hanno partecipato alla giornata conclusiva del progetto del 7 febbraio 2024, la possibilità di osservare da vicino gli strumenti

storici e di assistere alle attività proposte dagli studenti universitari è stata molto apprezzata. Gli studenti in generale hanno mostrato interesse, hanno fatto domande e hanno interagito con gli studenti universitari. Gli insegnanti hanno preso spunto da questa giornata per approfondire alcuni argomenti a scuola, o hanno chiesto materiale aggiuntivo per poter ripetere le attività proposte anche in classe. Un'ulteriore considerazione riguarda le potenzialità dell'utilizzo della strumentazione storica scientifica in ambito didattico. Come evidenziato anche in altri lavori [15-18, 32-37], l'uso degli strumenti storici scientifici permette infatti di:

- raccontare la storia della scienza facendo parlare direttamente gli strumenti e gli scienziati che hanno contribuito alla loro realizzazione;
- spiegare i principi fisici e chimici alla base del loro funzionamento in modo più efficace rispetto agli strumenti moderni che sono spesso "scatole chiuse" e non danno la possibilità ai docenti di mostrare le componenti di cui sono fatti e di spiegarne i meccanismi di funzionamento;
- aggiungere ai dettagli tecnici scientifici anche il lato 'umano' della scienza, in quanto ogni strumento storico ha una sua storia, talvolta anche difficile da conoscere se non attraverso la memoria dei docenti più anziani o la ricerca in materiale di archivio;
- apprezzare e studiare l'evoluzione tecnica e scientifica della scienza e dei concetti scientifici;
- capire meglio lo stretto legame tra scienze e tecnica.

Complessivamente il progetto ha richiesto un notevole impegno, anche in termine di tempo, sia da parte di noi docenti che da parte degli studenti universitari. Tuttavia, i risultati ottenuti con questo progetto sono stati eccellenti e ci auguriamo di poter proseguire in futuro con progetti analoghi.

Riferimenti bibliografici

- [1] V. Domenici, I musei scientifici come risorsa didattica, in *Insegnare e apprendere chimica*, Mondadori Università, Firenze, 2018, pp. 202-212.
- [2] P. Rodari, La missione sociale dei musei della scienza, in *I musei di chimica e la chimica nei musei della scienza* (curatori L. Campanella e V. Domenici), Sapienza Università Editrice, Roma, 2014.
- [3] J. K. Gilbert, A. S. Alfonso, Lifelong learning: approaches to increasing the understanding of chemistry by everybody, in *Chemistry Education. Best practices, opportunities and trends* (Eds. J. Garcia-Martinez and E. Serrano-Torregrosa), Wiley VCH, Weinheim, 2015 (ISBN: 978-3-527-33605-0).
- [4] F. Affeldt, S. Tolppanen, M. Aksela, I. Eilks, The potential of the non-formal educational sector for supporting chemistry learning and sustainability education for all students a joint perspective from two cases in Finland and Germany, *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2017, **18**, 13-25.
- [5] N. Garner, A. Siol, I. Eilks, The potential of non-formal laboratory environments for innovating the Chemistry curriculum and promoting secondary school level students education for sustainability, *Sustainability*, 2015, **7**, 1798-1818.
- [6] E. Luzzi, V. Ambrogi, G. Filippone, B. Liguori, M.S. De Luna, P. Aprea, Increasing awareness of materials and the environment: Hands-on outreach activity presenting water purification materials and concepts, *J. Chem. Educ.*, 2021, **98**, 1296-1301.
- [7] V. Domenici, The role of Chemistry Museums in chemical education for the students and the general public: Italy, a case of study, *J. Chem. Educ.*, 2008, **85**, 1365-1369.
- [8] Autori vari, *La chimica nei Musei. Creatività e conoscenza* (curatori V. Domenici & L. Campanella), Pisa University Press, Pisa, 2020.
- [9] C. Maurizio, Alla scoperta dei Musei delle Scienze: un supporto alle discipline STEM, *La Tecnica della Scuola*, 07/02/2024.
- [10] M. H. Land, Full STEAM ahead: The benefit of integrating the arts into STEM, *Procedia Computer Science*, 2013, **20**, 547-552.
- [11] E. Perignat, J. Katz-Buonincontro, STEAM in practice and research: An integrative literature review, *Thinking Skills and Creativity*, 2019, **31**, 31-43.
- [12] N. Walshe, E. Lee, D. Lloyd, R. Sapsed, STEM to STEAM as an approach to human development, in *Why Science and Art Creativities Matter*, Publisher Brill, 2019, pp. 337-357.

- [13] P. Mahaffy, Moving chemistry education into 3D: A tetrahedral metaphor for understanding Chemistry. Union Carbide Award for Chemical Education, *J. Chem. Educ.*, 2006, **83**, 49.
- [14] J. Sjöström, Towards bilding-oriented Chemistry education, *Science & education*, 2013, **22**, 1873-1890.
- [15] V. Domenici, STEAM project-based learning activities at the Science Museum as an effective training for future Chemistry teachers, *Education Sciences*, 2022, **12**(1), 30.
- [16] V. Domenici, I musei scientifici come luogo privilegiato per la progettazione e la realizzazione di attività educative STE(A)M, in *La chimica nei musei. Creatività e conoscenza* (curatori V. Domenici e L. Campanella), Pisa University Press, Pisa, 2020.
- [17] V. Domenici, Progettazione di attività didattiche STEAM in ambito museale durante i due anni di pandemia Covid-19, *La chimica nella scuola (CnS)*, 2022, **2**, 38-40.
- [18] V. Domenici, Training of future Chemistry teachers by a historical/ STEAM approach starting from the visit to an historical Science Museum, *Substantia*, 2023, **27**, 23-34.
- [19] Sito web del Museo di Storia Naturale di Rosignano (MuSNa): <https://musrosi.org/>
- [20] Sito web del Museo Galileo di Firenze: <https://museogalileo.it/it/>
- [21] Sito dei progetti speciali di didattica dell'Ateneo di Pisa: <https://www.unipi.it/index.php/docenti2/itemlist/category/1795-progetti-speciali-per-la-didattica>.
- [22] Sito web della collezione di strumenti storici scientifici del Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale dell'Università di Pisa: <https://ricerca.dcci.unipi.it/instrument-museum.html>
- [23] V. Domenici, Strumenti storici scientifici e insegnamento della chimica: i risultati di una attività svolta dagli studenti universitari del corso di laurea in Chimica dell'Università di Pisa, *Rendiconti dell'Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL*, 2023, Vol. **IV** (1), 165-172.
- [24] Sito con l'annuncio della giornata conclusiva del progetto: <https://www.dcci.unipi.it/giornata-collezione-strumenti-2024.html>
- [25] V. Domenici, L'utilità di un approccio integrato nella didattica della chimica, *La chimica nella Scuola (CnS)*, 2024, **1**, 71-80.
- [26] N. Fitriyana, A. Wiyarsi, H. Pratomo, M. Marfuatun, The importance of integrated STEM learning in chemistry lesson: perspectives from high school and covational school chemistry teachers, *J. Tech. Sci. Educ.*, 2024, **14**, 418-437.
- [27] Sito web del Museo degli Strumenti di Fisica dell'Università di Pisa: <https://www.msf.sma.unipi.it/collezioni/>
- [28] Sito web della Ludoteca Scientifica dell'Università di Pisa: <https://www.msf.sma.unipi.it/storia-lus/>
- [29] Sito della Fondazione Galilei a Pisa con il catalogo degli strumenti di Antonio Pacinotti: http://www.fondazionegalileogalilei.it/fondo_pacinotti/strumenti_pacinotti/strumenti_p.html
- [30] Pagina web con la descrizione della cassetta di aggressive chimici: <https://ricerca.dcci.unipi.it/cassetta-aggressivi-chimici.html>
- [31] Pagina web con la descrizione del prisma di KBr: <https://ricerca.dcci.unipi.it/prisma-di-kbr.html>
- [32] I. Morisetti, E. Servida, L. Ronzon, Da gabinetti scientifici a musei scolastici: il patrimonio dei licei scientifici per co-costruire nuove competenze e relazioni, *Scientia*, 2024, **1**, 151-184.
- [33] V. Domenici, Andiamo al museo! Un progetto interdisciplinare a Scienze della Formazione Primaria, *La chimica nella scuola (CnS)*, 2023, **5**, 75-79.
- [34] D. Gamito-Marques, In praise of a historical storytelling approach in science education, *Isis*, 2020, **111**(3), 582-587.
- [35] A. Franza, G. Pratesi, Learning sciences from the past: Recovery, study, and cataloging of a Historical Natural History School Museum, *Educ. Sci.*, 2024, **14**(1), 80.
- [36] H. L. Ballard, L. D. Robinson, A. N. Young, G. B. Pauly, L. M. Higgins, R. F. Johnson, J. C. Tweddle, Contributions to conservation outcomes by natural history museum-led citizen science: Examining evidence and next steps, *Biological Conservation*, 2017, **208**, 87-97.
- [37] L. F. Bernarduzzi, E. M. Bernardi, School, Museum, University: A community for science education, *Nuovo Cimento C – Colloquia and Communications in Physics*, 2023, **46**, 6.

Le nuove frontiere della catalisi ecosostenibile: un viaggio, dai catalizzatori omogenei alla fotocatalisi, ripercorrendo le tappe storiche più rilevanti per il suo sviluppo

Marcello Crucianelli e Nicola Di Nicola

Dipartimento di Scienze Fisiche e Chimiche dell'Università dell'Aquila

e-mail: marcello.crucianelli@univaq.it

Abstract. Catalytic processes are behind many chemical reactions, both industrial and non-industrial. Since the 1990s, with the rise of Green Chemistry concept and its 12 principles for making chemistry more sustainable and environmentally friendly, scientists around the world have been increasingly interested in understanding the central role of catalysis. Understanding how catalysts work is very important since they help chemical reactions to take place faster and more efficiently, using less energy and producing less waste. This short review covers the scientific advancements during the past 30 years which allowed the development of catalytic processes in a more eco-friendly way. All this, starting from homogeneous catalysis, moving through hybrid multifunctional catalysts, and ending with photocatalysis, by tracing a brief history of catalysis, its advancement and the most relevant Nobel Prizes specifically awarded to it.

Keywords: catalisi omogenea; catalisi eterogenea; supporti ibridi; nanoparticelle; metallo-enzimi; sistemi supramolecolari

1. Introduzione

Il termine “catalisi” (parola di origine greca che significa sciogliere, rompere) venne introdotto per la prima volta, nel 1835, da Berzelius [1].

La catalisi è un fenomeno chimico naturale che, ponendo in correlazione gli aspetti termodinamici (legati alle energie in gioco) e cinetici (legati alle velocità) di una reazione chimica, consente a quest'ultima di avvenire in modo più agevole e in tempi più rapidi. Infatti, affinché una reazione chimica avvenga è necessario che i suoi reagenti, ovvero le sostanze che si mettono a reagire, abbiano un contenuto minimo e sufficiente di energia, definita come energia di attivazione.

In natura esistono reazioni chimiche che, pur essendo termodinamicamente favorite, sono cineticamente molto lente e, quindi, in pratica, non avvengono: un esempio è la trasformazione fra i due allotropi (cioè forme diverse dello stesso elemento chimico cui corrispondono proprietà differenti) più conosciuti del carbonio da diamante (meno stabile) a grafite (più stabile). Questa trasformazione, pur essendo favorita termodinamicamente è cineticamente sfavorita in condizioni di pressione e temperatura ambiente per cui, di fatto, non avviene.

Tuttavia, in linea di principio, molte di queste reazioni potrebbero avvenire, in tempi più rapidi, in presenza di un catalizzatore.

Un catalizzatore, quindi, è una sostanza che, pur aumentando la velocità di una reazione chimica (riducendo l'energia di attivazione per le molecole dei reagenti) (Figura 1), non la modifica da un punto di vista termodinamico e, sebbene interagisca con i reagenti, viene rigenerato alla fine della reazione stessa restando, in sostanza, inalterato. In altri termini, tutto il catalizzatore presente all'inizio della reazione si ritrova, chimicamente inalterato, al termine di essa.

Possiamo definire due tipi di catalizzatori: i catalizzatori positivi, che accelerano la reazione (Figura 2) e i catalizzatori negativi, più noti come inibitori, che la rallentano.

La catalisi gioca un ruolo fondamentale praticamente in tutti i processi chimici e, in effetti, la stragrande maggioranza delle reazioni chimiche (e biologiche) avviene in presenza di catalizzatori (o enzimi). Attualmente, più del 90% dei processi chimici di interesse tecnologico o industriale, vengono eseguiti in condizioni catalitiche.

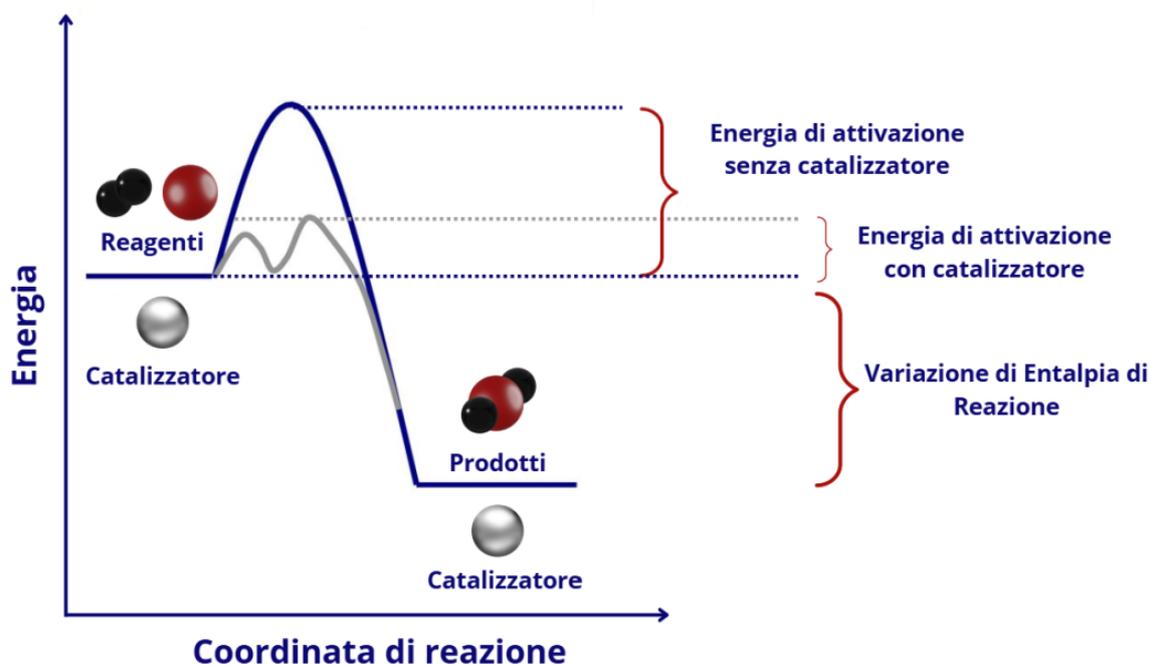


Figura 1. Riduzione della barriera di attivazione di una reazione chimica in presenza di un catalizzatore

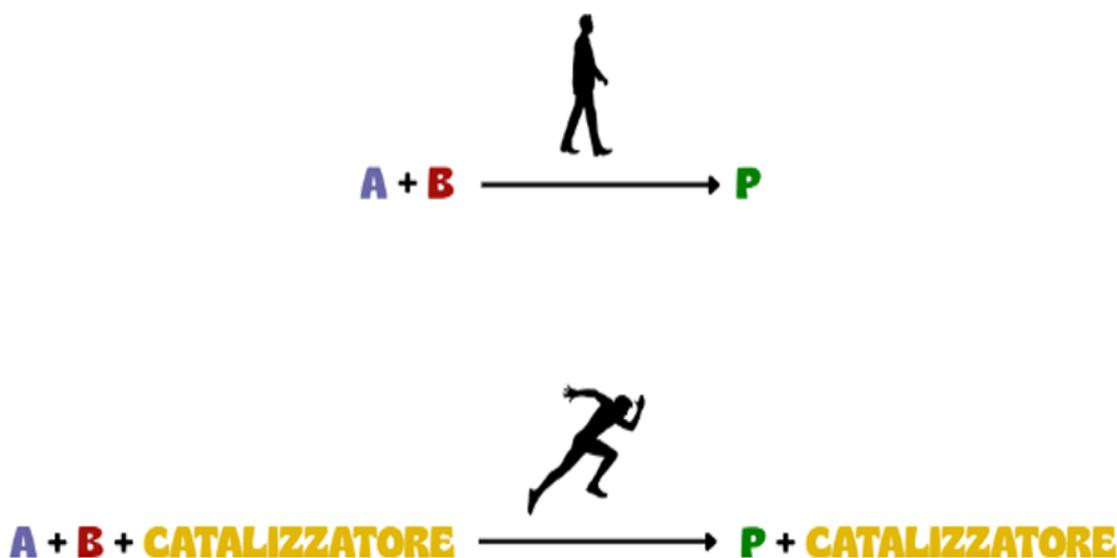


Figura 2. Confronto fra la stessa reazione in assenza e in presenza di catalizzatore

2. Breve cronistoria della catalisi e dei premi Nobel ad essa dedicati

Da quanto brevemente esposto, risulta evidente come la catalisi rappresenti uno degli aspetti chiave nella riconversione sostenibile delle vecchie tecnologie chimiche e nello sviluppo di nuove, come chiaramente indicato anche nei 12 principi alla base della *Green Chemistry*, vale a dire quel cambiamento di paradigma che, all'inizio degli anni '90 del secolo scorso, decretò un cambio di marcia sostanziale nello sviluppo di nuovi processi chimici e/o tecnologici, con l'obiettivo di massimizzare l'efficienza e la sostenibilità al fine di ridurre al massimo il loro impatto nei riguardi della salute umana e dell'ambiente [2]. A tale scopo, vediamo quali sono state le tappe essenziali nello sviluppo del concetto di catalisi, in un contesto storico.

- Si ritiene che la prima applicazione catalitica sia stata la produzione di etanolo per fermentazione, la cui scoperta si perde nell'antichità; già nella Bibbia, infatti, si parla di fermenti per la produzione del pane, del latte e del vino.
- Nel medioevo e rinascimento gli alchimisti vanno alla ricerca della pietra filosofale, cioè di quel composto in grado di trasformare i metalli vili in oro. Infatti, essi credono che l'oro si formi con il passare del tempo a partire dai metalli vili; per accelerare questo processo, vanno alla ricerca della *pietra filosofale*, in grado di svolgere una sorta di ruolo "catalitico".
- Nel 1552 si fa riferimento al primo impiego di un catalizzatore inorganico (acido solforico) da parte di Valerius Cordus, nel suo studio di conversione dell'alcol etilico ad etere etilico [1].
- Nel 1781, A. A. Parmentier osservò che la fecola di patate, mescolata con acqua e *cremor tartaro* (agente lievitante naturale a base di tartrato acido di potassio) acquisiva un sapore dolciastro dopo diverse settimane: il processo veniva accelerato in presenza di acido acetico. Tale processo fu più approfonditamente studiato da W. Döbereiner, nel 1816, quando trovò che l'amido, sciolto in acqua, veniva trasformato ad alcol etilico, previa conversione in uno zucchero. Lo stesso Döbereiner fu in grado di notare che l'azione catalitica del diossido di manganese era in grado di promuovere la decomposizione termica del perclorato di potassio, nel corrispondente cloruro, con conseguente sviluppo di ossigeno [1].
- Nel 1835, come già accennato, J. Jacob Berzelius introdusse il concetto di catalisi, valido ancora oggi: *il catalizzatore è una sostanza in grado di aumentare la velocità di una reazione chimica, senza venir consumata in modo apprezzabile*. Questa definizione è tratta dal suo rapporto intitolato "*Årsberättelse om framstegen i fysik och kemi*" (Rapporto annuale sui progressi in fisica e chimica), pubblicato dall'Accademia Reale Svedese delle Scienze, avvalendosi di molte evidenze sperimentali acquisite, nel frattempo, da diversi altri suoi colleghi e scienziati a cavallo fra XVIII e XIX secolo.
- Nel corso del XIX secolo, la ben nota disputa tra Louis Pasteur e Marcellin Berthelot, sulla natura della fermentazione, rappresenta un momento cruciale nella storia della catalisi. Mentre Pasteur sosteneva che la fermentazione fosse un processo biologico mediato da organismi viventi, Berthelot la considerava una reazione puramente chimica, catalizzata da sostanze non viventi. Questo confronto tra visione vitalista e approccio meccanicista ha stimolato ricerche fondamentali che portarono, anni dopo, alla scoperta degli enzimi come catalizzatori biologici (vedi più avanti il premio Nobel a Eduard Buchner, nel 1907). La disputa contribuì così a chiarire il concetto di catalisi, ponendo le basi per la biochimica moderna e ampliando la comprensione dei processi catalitici oltre il mondo inorganico.
- Nel 1894 Emil Fischer propose il modello "chiave-serratura" per descrivere l'azione degli enzimi, introducendo per la prima volta un'interpretazione strutturale della loro specificità. Secondo questo modello, il substrato si lega all'enzima in modo preciso, come una chiave che entra perfettamente in una serratura. Tale concetto fu fondamentale per la storia della catalisi, perché chiarì che gli enzimi non solo accelerano le reazioni, ma lo fanno in modo altamente selettivo, riconoscendo solo specifiche molecole bersaglio.
- Successivamente, nel 1925, Sir Hugh Stott Taylor introdusse il concetto di "*sito catalitico*", dimostrando l'esistenza di particolari zone sulla superficie del catalizzatore attivamente implicate nel meccanismo di reazione.

Il grande sforzo di molti studiosi e ricercatori che si sono impegnati, nel corso del XX secolo, nello sviluppo di processi chimici catalitici e nello studio dei meccanismi alla loro base, è stato premiato dall'Accademia Reale Svedese delle Scienze di Stoccolma, con l'assegnazione del premio Nobel, istituito nel 1909 [3].

Anche questo prestigioso riconoscimento ha infatti voluto sottolineare la centralità della catalisi, premiando in ben tredici occasioni studiosi che hanno scoperto nuovi sistemi catalitici o disvelato complessi meccanismi alla base del loro funzionamento (studio delle interazioni tra struttura delle superfici di un solido e attività catalitica).

Vediamo ora una rapida rassegna dei premi Nobel dedicati specificamente alla catalisi e/o alla biocatalisi.

- 1907, *Eduard Buchner* per i suoi studi sulle fermentazioni “cell-free”, dimostrando il ruolo essenziale svolto dagli enzimi nel promuovere i processi biochimici.
- 1909, *Wilhelm Ostwald* in riconoscimento dei suoi studi condotti sulla catalisi, in generale, e sui principi fondamentali che governano gli equilibri chimici e le velocità di reazione.
- 1912, *Paul Sabatier* per gli studi sulle reazioni di idrogenazione di composti organici in presenza di metalli finemente suddivisi.
- 1918, *Fritz Haber* per lo sviluppo della reazione catalizzata per la sintesi dell'ammoniaca (primo esempio di processo chimico sviluppato su scala industriale).
- 1932, *Irving Langmuir* per le sue scoperte e ricerche nello studio della “chimica delle superfici”, da cui trarrà origine, a partire dagli anni '30 del 1900, la nascita della “surface science” che decreterà lo sviluppo della catalisi eterogenea.
- 1956, *Cyril Hinshelwood* e *Nikolay Semenov* per le loro ricerche volte a chiarire i meccanismi delle reazioni chimiche (es. reazioni a catena), mediante un approccio teorico e matematico.
- 1963, il nostro *Giulio Natta*, insieme al tedesco *Karl Ziegler*, per lo studio e lo sviluppo di sistemi catalitici in grado di orientare selettivamente la stereochimica delle reazioni di polimerizzazione di olefine, per l'ottenimento di polimeri a elevate prestazioni tecnologiche.
- 1973, *Geoffrey Wilkinson* e *Ernst Otto Fischer* per i loro studi pionieristici sulla chimica dei complessi organometallici, da cui prese il via lo sviluppo della catalisi omogenea.
- 2001, *William S. Knowles*, *Ryōji Noyori* e *K. Barry Sharpless* per lo sviluppo di sistemi catalitici chirali per le reazioni di idrogenazione (i primi due) o le ossidazioni (il terzo), in condizioni stereoselettive, di molecole organiche.
- 2005, *Robert H. Grubbs*, *Richard R. Schrock* e *Yves Chauvin* per i loro studi sulle reazioni di metatesi in presenza di opportuni catalizzatori; molto schematicamente, le reazioni di metatesi sono del tipo: $AB + CD \rightarrow AC + BD$, dove i componenti B e C, nei prodotti, si sono scambiati fra loro.
- 2007, *Gerhard Ertl* per i suoi studi sulla chimica dei processi che avvengono sulle superfici di solidi e, in generale, per lo sviluppo della scienza delle superfici molecolari.
- 2010, *Richard F. Heck*, *Ei-ichi Negishi* e *Akira Suzuki* per lo studio e lo sviluppo delle reazioni di “cross-coupling” catalizzate dal palladio, per la sintesi di molecole organiche.
- 2021, *Benjamin List* e *David W. C. MacMillan* per lo studio e lo sviluppo di opportune molecole organiche utilizzate nelle reazioni di organocatalisi asimmetrica.

Brevemente, uscendo un attimo dal contesto specifico della catalisi, al fine di chiarire alcuni termini usati spesso come chiralità, stereochimica o reazioni stereoselettive (dalla parola greca “stèreo-” che significa solido, rigido, spaziale, tridimensionale), diciamo che, in generale, le molecole hanno una loro struttura specifica, derivante da una successione di atomi legati fra loro mediante legami chimici distribuiti nelle tre dimensioni spaziali e, di conseguenza, tutte le molecole sono caratterizzate dall'aver una propria simmetria. Come conseguenza, la forma e la simmetria di ciascuna molecola possono avere un impatto significativo sul comportamento e sulle interazioni che essa può avere, a livello microscopico, con altre molecole e, a livello macroscopico, caratterizzarne le

sue proprietà e le sue caratteristiche [4]. La stereochemica, quindi, è una branca della chimica che si occupa di analizzare e studiare la disposizione spaziale degli atomi all'interno di molecole o di aggregati molecolari e di come ciò possa influenzare e determinarne le loro proprietà chimiche e fisiche.

3. Tipologie di catalizzatori

Tornando alla catalisi, chiariamo subito che i catalizzatori possono essere suddivisi in due principali categorie: omogenei ed eterogenei.

Nel primo caso, il catalizzatore si trova in una fase omogenea con i reagenti, favorendo l'incremento dell'attività catalitica e delle rese di reazione; nel secondo caso, la specie catalitica si trova in una fase diversa rispetto ai reagenti cioè, di norma, risulta essere insolubile nel solvente di reazione. In quest'ultimo caso, l'attività catalitica è generalmente minore rispetto alla catalisi omogenea ma, a volte, la selettività può risultare anche migliore e, in ogni caso, c'è il grande vantaggio che il catalizzatore può essere separato dalla miscela di reazione e recuperato per un altro ciclo catalitico.

Risulta evidente che la catalisi eterogenea, se opportunamente ottimizzata, risulta essere molto vantaggiosa anche in termini di sostenibilità del processo chimico, non solo per il recupero della specie catalitica, ma anche perché si evita che eventuali sue tracce possano inquinare i prodotti della reazione, essendo complicato il loro recupero dalla miscela di reazione.

In alternativa, si possono progettare e sviluppare sistemi catalitici che prevedano l'eterogenizzazione di catalizzatori omogenei, mediante il loro "ancoraggio" su supporti ibridi organici/inorganici, eventualmente anche provvisti di un "core" magnetico, in modo tale da consentirne un loro rapido e semplice riciclo. I supporti ideali per l'ancoraggio di sistemi catalitici devono avere specifiche proprietà come, ad es., inerzia chimica, elevata area superficiale, micro/meso porosità, eventuale presenza di gruppi funzionali, opportunamente introdotti, per ancorare la specie catalitica. Fra le principali tipologie di supporti più impiegate ci sono: silicati, silico-alluminati (zeoliti), carboni attivi, nanotubi di carbonio, polimeri organici (polistirene, polivinilpiridina, ecc.), biopolimeri (chitosano, lignina, ecc.).

I sistemi catalitici appena descritti traggono vantaggio, in termini di attività catalitica e selettività chimica, dagli effetti di confinamento legati all'introduzione del catalizzatore all'interno della matrice del supporto, in uno spazio ben definito e "confinato", che può contribuire sinergicamente all'attività del catalizzatore come, ad esempio, aumentando la stereoselettività delle reazioni chimiche [5].

A questo punto ci si può chiedere: ma la catalisi è importante per la nostra quotidianità? Il modo migliore per rispondere è quello di focalizzare la nostra attenzione sull'azione biocatalitica del *Saccharomyces Cerevisiae* vale a dire, probabilmente, il lievito più importante nell'ambito dell'alimentazione umana, il cui utilizzo è noto fin dall'antichità per la panificazione e la produzione di birra e vino. Si pensa che sia stato isolato, per la prima volta, dalla superficie di acini d'uva, dove è infatti presente nella *pruina*, il rivestimento ceroso che è visibile sulla buccia degli acini d'uva.

Se invece, vogliamo fare riferimento a una vera e propria catalisi chimica eterogenea, l'esempio più importante è quello della marmitta catalitica (un vero e proprio piccolo reattore chimico) che ha rappresentato un successo eclatante, in termini di applicazione pratica e di diffusione su larga scala, dello studio dei meccanismi alla base del ruolo catalitico svolto da metalli di transizione depositati su matrici eterogenee (Figura 3).

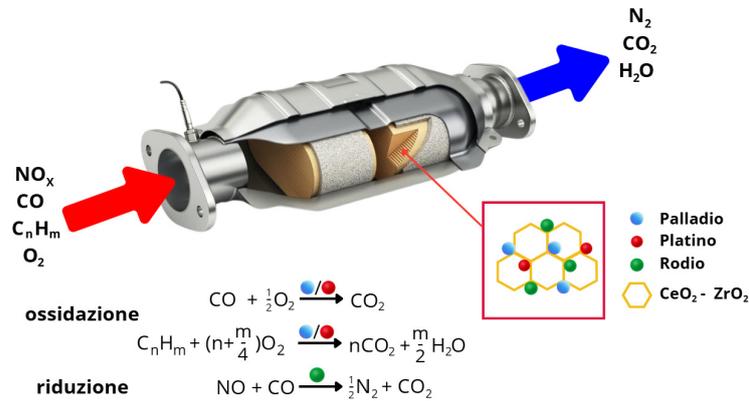


Figura 3. Schematizzazione delle principali reazioni e del funzionamento di una marmitta catalitica

Come è noto, nella marmitta catalitica (detta anche *a tre vie* perché in grado di agire contemporaneamente sui tre inquinanti principali CO, NO e idrocarburi incombusti, C_nH_m), metalli di transizione a base di platino, palladio e rodio, supportati su matrici ceramiche composite contenenti ossidi misti di cerio, zirconio e alluminio, drogati con lantanio, svolgono un ruolo determinante nel catalizzare reazioni di ossidazione o riduzione con lo scopo di rendere “innocui”, da un punto di vista di tossicità, i gas di scarico ottenuti come prodotti finali dei motori a combustione interna [6].

4. Nuove tendenze nello sviluppo di moderni sistemi catalitici

Con l’obiettivo di combinare i vantaggi sia della catalisi omogenea sia di quella eterogenea, negli ultimi venti anni, l’innovazione nel campo della catalisi si è indirizzata verso la progettazione e lo sviluppo, su scala nanometrica, di singole particelle (o piccoli aggregati) cataliticamente attive (metalli o loro ossidi) ancorate su matrici ibride organiche o inorganiche inerti, facilmente accessibili ed economiche (“*single-site*” or *single atomic site catalysis SASC*) [7]; tutto ciò è divenuto possibile grazie anche alla disponibilità di tecniche di analisi strumentale sempre più efficienti e performanti che consentono di “vedere” la grandezza degli agglomerati di particelle metalliche depositate sulla superficie, o all’interno di cavità delle matrici, più o meno porose, impiegate come supporti (Figura 4).

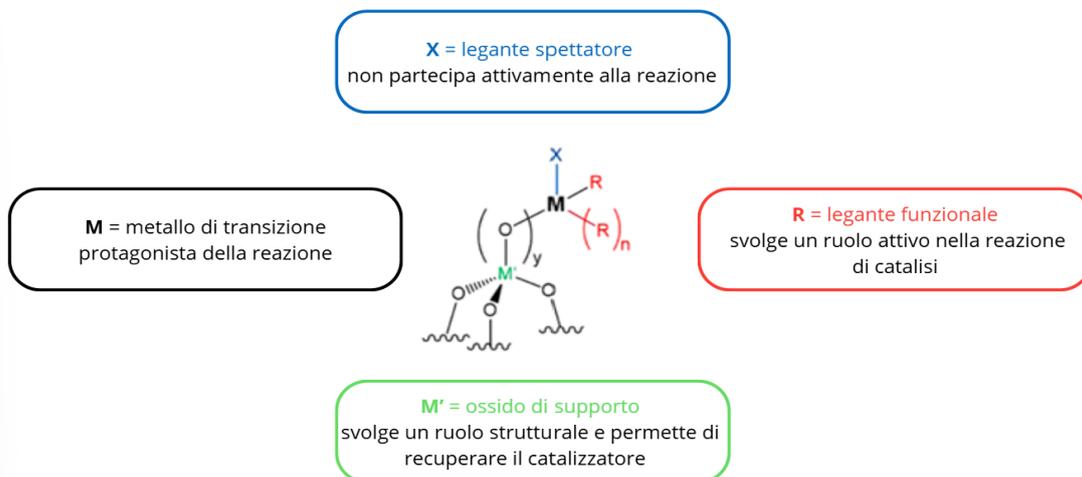


Figura 4. Schematizzazione di un sistema catalitico metallico del tipo “single-site”

Oppure, prendendo spunto dalla natura, con lo scopo di mimare il perfetto funzionamento catalitico dei biocatalizzatori o enzimi, è stata sviluppata la tecnica di progettazione e sviluppo di metallo-enzimi artificiali, avvalendosi di tecniche computazionali sempre più potenti, per la “ricostruzione” sintetica dei siti attivi delle metallo-proteine (Figura 5) [8].

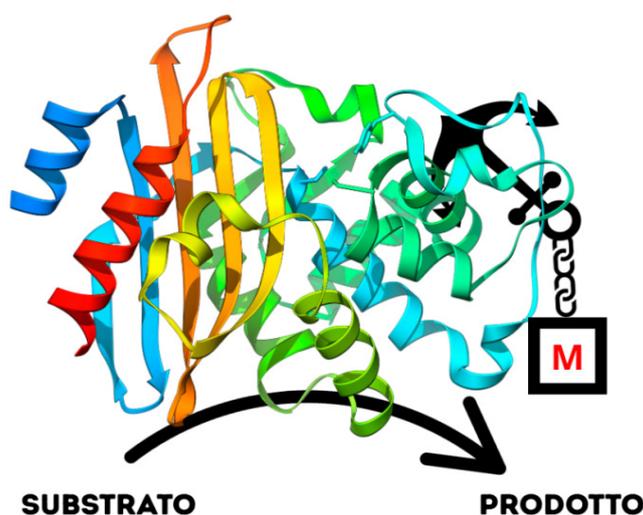


Figura 5. Schematizzazione della struttura di un metallo-enzima artificiale

In alternativa, complessi organometallici, cioè composti chimici formati da uno ione metallico coordinato a molecole organiche, più o meno complesse, in grado di stabilizzare lo ione stesso, fungendo da leganti, sono stati confinati all'interno di strutture micellari (“*cat-surf*” catalysis), o in aggregati chelanti complessi quali calixareni, ciclodestrine, ecc. (nanoreattori supramolecolari) per l'impiego di questi articolati sistemi catalitici, anche in solventi acquosi (Figura 6) [9].

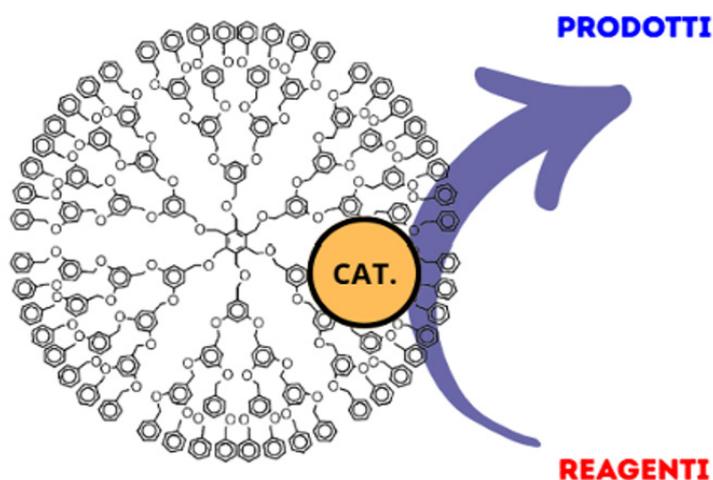


Figura 6. Schematizzazione di sistemi catalitici supramolecolari complessi

Negli ultimi periodi, si è largamente diffusa la tendenza di creare, all'interno delle matrici usate come supporti, un "core" magnetico, a base di magnetite o altri ossidi magnetici, con lo scopo di agevolare nettamente il recupero dei catalizzatori, al termine del processo chimico, dotandosi di una semplice calamita (Figure 7 e 8), con grandi vantaggi in termini di tempo e resa nel recupero del catalizzatore [10].



Figura 7. Catalizzatori eterogenei su core magnetici: una sinergia perfetta fra attività catalitica ed efficienza del loro riciclo

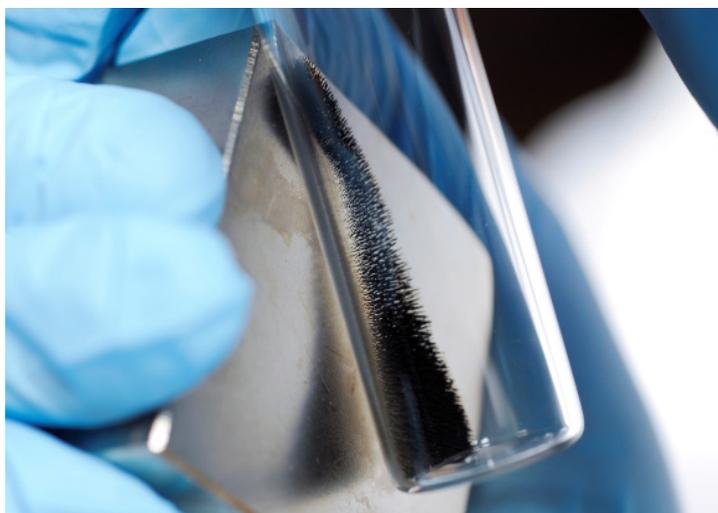


Figura 8. Recupero di catalizzatori supportati su "core" magnetici, mediante calamita

Infine, i materiali ibridi organico-inorganici con diversi livelli di funzionalizzazione e struttura porosa contenenti più tipologie di siti attivi (fra cui biocatalizzatori), possono catalizzare processi chimici multistep in un sistema reattivo "one-pot", seguendo una cascata di eventi di reazione successivi. I diversi siti attivi possono agire in modo sinergico o sequenziale, secondo un modello di funzionalità simile a quello dei catalizzatori biologici multisito (Figura 9).

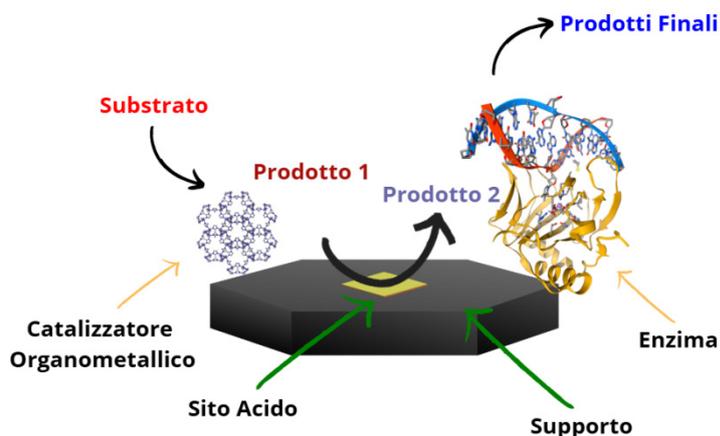


Figura 9. Schematizzazione di un sistema catalitico ibrido multifunzionale per reazioni catalitiche sequenziali

Quest'ultima rappresenta l'evoluzione più recente all'interno del fervido settore di ricerca della catalisi in senso generale, il cui successo consentirà di ottenere risultati molto interessanti, nell'immediato futuro, in termini di attività e (stereo)selettività dei processi catalitici, soddisfacendo in pieno la sostenibilità anche in chiave di applicazioni su vasta scala [11].

5. Presente e futuro: fotocatalisi

Negli ultimi anni la fotocatalisi, un particolare processo chimico che sfrutta la luce per attivare un (foto)catalizzatore, ha assunto un ruolo centrale nella green chemistry, grazie alla sua capacità di operare in condizioni ambientali, spesso senza bisogno di solventi tossici o alte temperature. I fotocatalizzatori più comuni, come il diossido di titanio (TiO_2) e alcuni materiali a base di metalli di transizione, assorbono la radiazione luminosa e generano coppie di elettroni (e^-) e lacune elettroniche (h^+), che possono innescare reazioni di ossidazione e riduzione (Figura 10).

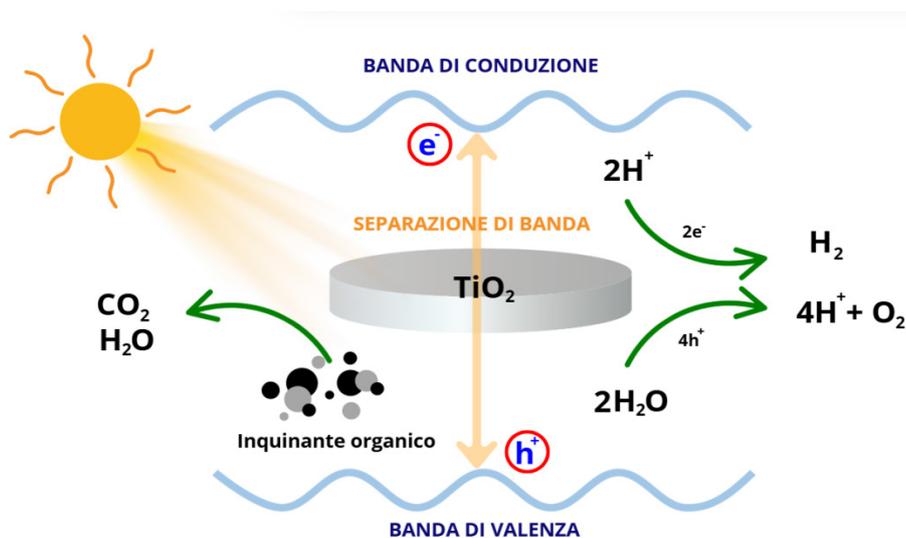


Figura 10. Rappresentazione schematica delle reazioni redox che avvengono mediante un fotocatalizzatore opportunamente eccitato

Questo meccanismo trova applicazione in numerosi campi, tra cui la degradazione di inquinanti organici, la scissione dell'acqua per la produzione di idrogeno (sempre più importante come vettore energetico) e la sintesi di composti chimici con un impatto ambientale ridotto [12]. L'impiego della fotocatalisi nella depurazione delle acque e dell'aria, nella riduzione delle emissioni di CO₂ e nella produzione di combustibili rinnovabili sta contribuendo in modo significativo alla transizione verso un'economia circolare e a basse emissioni di carbonio [13]. L'ottimizzazione di nuovi fotocatalizzatori, capaci di assorbire una porzione maggiore dello spettro solare e migliorare l'efficienza delle reazioni, rappresenta una delle sfide più promettenti per il futuro della chimica sostenibile.

È infatti ormai noto a tutti che il progresso nella scienza e nella tecnologia, nel presente e nel futuro immediato, non possa più prescindere dall'essere anche totalmente sostenibile per l'uomo e l'ambiente.

Riferimenti bibliografici

- [1] J. Wisniak, *The History of Catalysis. From the Beginning to Nobel Prizes*: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0187893X18300740>
- [2] P. T. Anastas, J. C. Warner, *Green Chemistry Theory and Practice*, Oxford University Press, New York, 1998.
- [3] <https://www.nobelprize.org>
- [4] (a) E. L. Eliel, S. H. Wilen, *Stereochemistry of Organic Compounds*, Wiley, Hoboken, 2008; (b) *Topics in Inorganic and Organometallic Stereochemistry*, Volume 12 (Ed. G. L. Geoffroy), Wiley, Hoboken, 2007.
- [5] (a) E. G. Derouane, *J. Catal.*, 1986, **100**, 541-544; (b) C. Yu, J. He, *Chem. Commun.*, 2012, **48**, 4933-4940.
- [6] https://online.scuola.zanichelli.it/chimicadappertutto-files/approfondimenti/Zanichelli_Bagatti_ChimicaDappertutto_Cap10_Marmitte.pdf
- [7] (a) J. D. A. Pelletier, J.-M. Basset, *Acc. Chem. Res.*, 2016, **49**, 664-67; (b) J. Liu, *ACS Catal.*, 2017, **7**, 34-59.
- [8] P. J. Deuss, R. den Heeten, W. Laan, P. C. J. Kamer, *Chem. Eur. J.*, 2011, **17**, 4680-4698.
- [9] C. Deraedt, D. Astruc, *Coord. Chem. Rev.*, 2016, **324**, 106-122.
- [10] (a) L. M. Rossi, N. J. S. Costa, F. P. Silva, R. Wojcieszak, *Green Chem.*, 2014, **16**, 2906-2933; (b) R. Colaiezzi, A. Lazzarini, F. Ferella, V. Paolucci, A. Di Giuseppe, M. Crucianelli, *Inorg. Chim. Acta*, 2022, **531**, 120711.
- [11] U. Díaz, D. Brunel, A. Corma, *Chem. Soc. Rev.*, 2013, **42**, 4083-4097.
- [12] J. Schneider, M. Matsuoka, M. Takeuchi, J. Zhang, Y. Horiuchi, M. Anpo, D. W. Bahnemann, *Chemical Reviews*, 2014, **114**, 9919-9986.
- [13] <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20151201STO05603/economia-circolare-definizione-importanza-e-vantaggi>

L'enciclica *Laudato si'* di papa Francesco

Un documento che farà epoca¹

Vincenzo Balzani

Professore emerito dell'Università di Bologna

e-mail: vincenzo.balzani@unibo.it

Abstract. The many problems of our time are addressed and discussed in a simple and clear way in the encyclical *Laudato si'* by Pope Francesco. It is a small but very important book that describes the situation of the human society in our common home, the Earth. To underline the great importance of this encyclical and its profound theological, political and social meaning, the main themes it deals with will be examined.

Keywords: crisi ambientale; problema energetico; risorse naturali; i limiti planetari; eneguità e disuguaglianze

1. Introduzione

Si stima che in cielo ci siano 10^{23} stelle: per contarle tutte, una al secondo, ci vorrebbero tre milioni di miliardi di anni! Nell'immensità del Creato c'è un puntino; è la Terra, una specie di astronave, grande se vista da molto vicino, che viaggia nell'infinità dell'Universo con un carico particolare, forse unico: gli esseri umani. È un'astronave del tutto speciale, che non potrà mai atterrare da nessuna parte, non potrà mai attraccare a nessun porto per far rifornimento. È la nostra casa comune. Dobbiamo viverci tutti assieme, bianchi, neri, gialli, uomini, donne, buoni e cattivi. E se qualcosa non funziona, dobbiamo ripararla da soli, senza neppure scendere.

La Terra appariva infinitamente grande ai pochi uomini che l'hanno abitata per migliaia e migliaia di anni come passeggeri passivi, dominati e impauriti dalle forze della Natura. Con il passare del tempo, il numero di uomini è molto aumentato (oggi, siamo più di otto miliardi) ed è aumentata fortemente anche la loro attività. Nell'ultimo secolo, in particolare negli ultimi cinquant'anni, l'uomo, con l'energia fornita dai combustibili fossili e con lo sviluppo della scienza e della tecnologia, ha modificato profondamente la Terra e continua a trasformarla sempre più velocemente [1]. Nel

passato, era la Natura che scandiva le epoche, ma oggi, sotto vari aspetti, è l'uomo che vuole dominare la Natura, per cui gli scienziati hanno proposto di chiamare *Antropocene* l'epoca geologica presente [2].

I molti problemi della nostra epoca sono affrontati e discussi in modo semplice e chiaro nell'enciclica *Laudato si'* di Papa Francesco [3], un piccolo, ma importantissimo libro che descrive la situazione in cui si trova la società umana nella nostra casa comune, la Terra. Per cogliere la



¹ Pubblicato originariamente sul blog *la Chimica e la Società* (<http://ilblogdellaSCI.wordpress.com>)

grande importanza di questa enciclica e il suo profondo significato teologico, politico e sociale verranno presi in esame i principali temi di cui si occupa.

L'enciclica è articolata in 246 paragrafi. In questo commento vengono utilizzati *numeri fra parentesi tonda* per indicare i paragrafi in cui sono trattati gli argomenti discussi.

2. La crisi ambientale

Papa Francesco nell'enciclica ha denunciato, in modo fermo e deciso, tutti i danni causati dall'uso irresponsabile e dall'abuso dei beni comuni (2). Bisogna fermare il cambiamento climatico, non inquinare le acque, il suolo e l'aria, preservare la diversità biologica, custodire l'integrità della terra, salvaguardare le foreste e i mari. Per quanto riguarda, in particolare, il problema climatico, l'enciclica riporta in più punti le conclusioni degli scienziati [4]: il riscaldamento globale degli ultimi decenni è dovuto sostanzialmente ai gas serra (principalmente, CO₂) generati dall'uso dei combustibili fossili (23); le previsioni catastrofiche non si possono guardare con disprezzo e ironia (161); gli stili di vita che contribuiscono al cambiamento climatico sono peccati (8); i Paesi che hanno tratto beneficio da un alto livello di industrializzazione, con un'enorme emissione di gas serra, hanno maggiore responsabilità e, quindi, devono contribuire alla soluzione dei problemi che hanno causato (170); molti di coloro che detengono più risorse e potere economico o politico cercano di mascherare i problemi o nascondere i sintomi (26). Non ci sono parole più appropriate di queste per commentare il comportamento di alcune lobby industriali e di responsabili politici che hanno continuato per anni a negare o tentato di minimizzare i danni climatici causati dall'uso dei combustibili fossili, danni che poi sono emersi chiaramente negli anni successivi, come documentato dagli studi di molti scienziati [5].

3. Il problema energetico

Papa Francesco è in sintonia con quanto concordano gli scienziati [4, 5] su come risolvere il problema energetico: il consumo di combustibili fossili deve diminuire senza indugio, ma la politica e l'industria rispondono con lentezza, lontane dall'essere all'altezza della sfida (165); la transizione dall'uso dei combustibili fossili alle fonti energetiche rinnovabili non va ostacolata, ma accelerata (26); la penetrazione delle energie rinnovabili nei Paesi in via di sviluppo deve essere sostenuta con trasferimento di tecnologie, assistenza tecnica e aiuti finanziari (172). Nell'enciclica il Papa ricorda spesso San Francesco d'Assisi, in particolare nei paragrafi (10), (11) e (12). Nel meraviglioso *Cantico delle Creature* [6] San Francesco loda il Signore per *frate Sole, frate Vento, sor'Acqua e sora nostra madre Terra*. Oggi sappiamo che l'energia del Sole (fotovoltaica), quella del vento (eolica) e quella dell'acqua (idroelettrica) sono le energie rinnovabili [5], sulle quali l'umanità può fare affidamento; la Terra è il luogo dove possiamo trovare, oltre ai diversi *fructi con coloriti fiori et herba* [6], anche gli elementi chimici con i quali costruire i congegni e le apparecchiature (pannelli fotovoltaici, pale eoliche, dighe, ecc.) che ci permettono di convertire le energie rinnovabili naturali nelle energie di uso finale: calore, elettricità, combustibili.

4. I limiti delle risorse e i confini planetari

In un quadro di incrollabile speranza (244), papa Francesco sottolinea una forte preoccupazione: attraverso uno sfruttamento sconsiderato della Natura, l'uomo rischia di distruggerla e di essere a sua volta vittima di siffatta degradazione (4). Francesco sottolinea anche che, nonostante il ritmo di consumo, di spreco e di alterazione dell'ambiente abbia superato le possibilità del pianeta (161), ai centri di potere finanziari, economici e politici interessa solo estrarre dalla terra tutto quanto è possibile (106). Un esempio di questo comportamento l'abbiamo, purtroppo, anche qui in Italia. Il Governo, infatti, con il decreto *Sblocca Italia* e altri recenti provvedimenti [7], ha stabilito di facilitare e addirittura incoraggiare le attività di estrazione delle residue, marginali riserve di petrolio e gas del nostro Paese, mentre pone ostacoli allo sviluppo delle energie rinnovabili e non agisce per creare una cultura della sostenibilità ecologica e dell'economia circolare [8].

Purtroppo, anche alcuni scienziati sembrano pensare che sulla Terra ci sia una quantità illimitata di

risorse e che, in ogni caso, gli effetti negativi delle manipolazioni della Natura possano essere facilmente arginati. Di qui si passa all'idea di una crescita infinita, che tanto entusiasmo gli economisti (106) [9]. L'enciclica sottolinea che la logica "usa e getta" produce enormi quantità di rifiuti solo per il desiderio disordinato di consumare più di quello di cui realmente si ha bisogno (123), così che il ritmo di consumo e di spreco ha superato le capacità del pianeta (161). Papa Francesco ci ricorda anche che la spiritualità cristiana propone una crescita nella sobrietà, senza attaccarci a ciò che abbiamo, né rattristarci per ciò che non possediamo (222).

5. Inequità e disuguaglianze

Oltre a discutere il problema del troppo rapido consumo delle risorse e dei molti danni causati al pianeta, l'enciclica si occupa in modo molto chiaro dell'altra, addirittura più importante emergenza planetaria: quella delle inequità e delle sempre crescenti disuguaglianze. È un atto di gravissima inequità quando si pretende di ottenere importanti benefici facendo pagare al resto dell'umanità, presente e futura, gli altissimi costi del degrado ambientale (36). Non ci accorgiamo più che alcuni si trascinano in una miseria degradante, mentre altri non fanno nemmeno che farsene di ciò che possiedono (90). Queste e altre parole dell'enciclica ben si addicono a situazioni segnalate anche dai giornali, ma rapidamente dimenticate da tutti. Ad esempio, negli USA 42 milioni di persone ricevono contributi per vivere [10], mentre Tim Cook, CEO di *Apple*, ha goduto di uno stipendio di 74,6 milioni di dollari nel 2025 [11] e, in Italia, i 10 più ricchi guadagnano quanto 500.000 operai [12]. Dovremmo indignarci, dice Francesco, per le enormi disuguaglianze che esistono nei nostri Paesi (90).

L'inequità, poi, non colpisce solo gli individui all'interno della stessa nazione, ma è anche un problema internazionale: si è accumulato, infatti, un "debito ecologico" tra il Nord e il Sud del mondo, connesso all'uso sproporzionato delle risorse naturali da parte dei Paesi più industrializzati (51). L'enciclica dedica un'intera sezione all'inequità planetaria, sottolineando che il deterioramento dell'ambiente e quello della società colpiscono in modo particolare i più deboli del pianeta, miliardi di persone che sono ormai considerate un "danno collaterale" dai tanti professionisti, opinionisti, mezzi di comunicazione e centri di potere che non hanno contatto diretto con i problemi dei poveri (49): è la "cultura dello scarto" (22, 43).

Ne deriva che non ci sono due crisi separate, una ambientale e un'altra sociale, bensì una sola e complessa crisi socio-ambientale (139). Per risolverla, è necessario un approccio integrale: combattere la povertà, restituire la dignità agli esclusi e nello stesso tempo prendersi cura della Natura.

6. La scienza e la tecnica

L'enciclica [3] sottolinea i benefici portati dalla scienza e dalla tecnica, prodotti meravigliosi della creatività umana, che è un dono di Dio. Però, denuncia anche i rischi ai quali siamo esposti (102). La libertà che ci siamo presi per sviluppare la scienza e la tecnica ci ha portato in qualche modo a una situazione di schiavitù, tanto che la domanda non è più "cosa possiamo fare noi con la scienza e la tecnica", ma "che cosa la scienza e la tecnica possono fare di noi" [13]. I prodotti della tecnica, infatti, non sono neutri, perché creano una trama che finisce per condizionare gli stili di vita e orientano le possibilità sociali nella direzione degli interessi di determinati gruppi di potere (107). Il mercato, ad esempio, tende a creare un meccanismo consumistico compulsivo per piazzare i suoi prodotti, così che le persone finiscono con l'essere travolte da un vortice di acquisti e spese superflue (203).

A questo proposito si può citare la continua crescita delle aziende del lusso e, come caso particolare, la produzione della *Lamborghini Urus*, definita "un'auto per la famiglia" [14] ed esaltata da alcuni come un atto straordinario di politica industriale e un esempio di innovazione e creatività. Con la sua mostruosa potenza di 600 CV e un costo (nel 2025) di circa 250.000 euro, *Urus* è, in realtà, un emblema del consumismo e un'icona di quelle disuguaglianze che molti politici dicono di voler ridurre. C'è una distanza abissale dal comportamento di Papa Francesco che non portava le tradizionali scarpette rosse dei papi e la croce d'oro, che andava da solo dall'ottico per farsi riparare gli occhiali, che girava per Roma con una Ford Focus e che, per gli spostamenti nel viaggio negli Stati Uniti, ha usato una

Fiat 500 elettrica, invisibile in mezzo alle lussuose automobili del seguito. È vero che la produzione di auto di lusso crea posti di lavoro, ma è anche vero che si dovrebbe aumentare l'occupazione con innovazioni capaci di produrre cose più utili, nell'ambito di uno sviluppo responsabile e sostenibile. I progressi scientifici più straordinari, ricorda papa Francesco nell'enciclica, le prodezze tecniche più strabilianti e la crescita economica più prodigiosa, se non sono congiunte a un autentico progresso sociale e morale, si rivolgono, in definitiva, contro l'uomo (4).

Papa Francesco ha delineato anche una sua prospettiva antropologica, raccogliendo la sfida della complessità e rilanciando la necessità di abbracciare un pensiero complesso come condizione per la conversione ecologica: tutto è connesso, tutto è in relazione, per cui smarrire questa consapevolezza espone a gravi rischi (117). Agire in base a semplificazioni può portare, infatti, a errori colossali, come scatenare la follia di una guerra, anziché continuare laboriose trattative che consolidino la pace. La complessità ci sfida a pensare e agire per tessere, legare, unire; spesso, però, l'iper-specializzazione ci impedisce capire la complessità e il modo giusto di intervenire.

7. Una rivoluzione culturale

Secondo papa Francesco, è nostro dovere affrontare e risolvere la duplice crisi ambientale e sociale che stiamo attraversando. Come spesso accade in epoche che richiedono decisioni coraggiose, i più abbienti sono portati a pensare che le cose, poi, non stanno andando male e che, quindi, il pianeta potrà continuare a svolgere il suo ruolo per molto tempo. Questo significa, però, ignorare il problema delle disuguaglianze, che può essere risolto solo con profonde modifiche nell'organizzazione sociale, oltre che nel rapporto fra uomo e Natura (59, 209).

Un cambiamento nei nostri stili di vita potrebbe esercitare una sana pressione su coloro che detengono il potere politico ed economico (206). Ciò che sta accadendo ci pone, quindi, di fronte all'urgenza di mettere in atto una coraggiosa rivoluzione culturale. È indispensabile rallentare la marcia per guardare la realtà in modo più profondo e recuperare i valori e i grandi fini distrutti da una sfrenatezza megalomane (114); è necessario, anche, che ciascuno recuperi i diversi livelli dell'equilibrio ecologico: quello interiore con sé stesso, quello solidale con gli altri, quello naturale con tutti gli esseri viventi, quello spirituale con Dio (210).

8. La speranza

L'enciclica *Laudato si'* [3] termina con un invito: *Camminiamo cantando! Che le nostre lotte e le nostre preoccupazioni per questo pianeta non ci tolgano la gioia della speranza* (244). Grazie a papa Francesco ci sono, in realtà, segnali che ci inducono a ben sperare:

- la Natura ci sta inviando messaggi sempre più pressanti sull'esistenza di problemi che dobbiamo risolvere (prima di tutto, il cambiamento climatico) e l'umanità comincia a capire la gravità della situazione in cui si trova il mondo;
- energia, risorse e ambiente sono argomenti entrati nei programmi scolastici oltre che in quelli di alcuni partiti politici;
- molti scienziati hanno assunto posizioni chiare e decise per arginare i danni inferti al pianeta dal cambiamento climatico e dal degrado ambientale e importanti istituzioni politiche internazionali (*Unione Europea, ONU, IPCC, Union of Concerned Scientists*) hanno cominciato a prendere decisioni appropriate per risolvere i problemi emersi;
- numerose associazioni scientifiche (*Earth Charter Initiative, WWF, Greenpeace, Friends of the Earth, Global Footprint Network, Legambiente, Energia per l'Italia, ecc.*) hanno intrapreso importanti campagne di sensibilizzazione;
- la ricerca scientifica si sta impegnando per utilizzare al meglio l'energia solare e le altre energie rinnovabili, tanto che cominciano a comparire buone notizie; nel 2025, ad esempio, l'energia rinnovabile generata dal Sole, dal vento e dalle cadute d'acqua ha già superato la produzione di energia ottenuta dai combustibili fossili.

Papa Francesco [3] non ha perso occasione per ricordare che, se vogliamo custodire la casa comune e ridurre le disuguaglianze, è necessario utilizzare con cura e condividere le risorse e sviluppare con sapienza le conoscenze scientifiche e le innovazioni tecnologiche. Per far questo, bisogna sfruttare anche le preziose fonti di energia spirituale, proprie dell'uomo, che gli permettono di esercitare responsabilità, sobrietà, collaborazione, solidarietà, amicizia e saggezza. Speriamo che sorgano presto altri leader capaci, come ha fatto papa Francesco, di guardare lontano nello spazio, cioè all'interesse di tutti gli abitanti del pianeta, e nel tempo, cioè anche alle prossime generazioni.

9. L'enciclica *Fratelli tutti*



Nella più recente enciclica *Fratelli tutti* [15], papa Francesco spiega che la rivoluzione culturale, necessaria per giungere alla sostenibilità ecologica e sociale, non può compiersi con qualche parziale modifica del rapporto uomo-pianeta o delle relazioni fra le nazioni. Si tratta, invece, di cambiare radicalmente la base su cui poggiano le nostre culture: bisogna accettare e valutare positivamente le diversità, ammettere i propri limiti e riconoscere che siamo tutti figli di Dio, fratelli che nascono, vivono e muoiono nella stessa casa comune, il pianeta Terra. In altre parole, la necessaria rivoluzione culturale richiede che gli uomini e anche le nazioni passino dalla situazione di *abitanti* dello stesso pianeta, spesso in competizione commerciale o addirittura in guerra fra loro, a quella di *fratelli* che si amano, si stimano e si aiutano. Solo così si potrà giungere alla sostenibilità ecologica perché, solo così, il pianeta verrà custodito e non degradato e le sue risorse verranno condivise nella sobrietà. Si dovrà anche attuare una saggia politica per ridurre le disuguaglianze mediante lo sviluppo dei servizi comuni (scuola, sanità, trasporti,

ecc.) e un sistema economico basato su tasse e sussidi mirati ad aiutare i più deboli, perché ogni persona vale e non va dimenticata. La consapevolezza che in un mondo globalizzato nessuno è autosufficiente deve spingerci a intraprendere collaborazioni proficue fra le nazioni e a sostenere con forza la pace.

10. Papa Leone XIV

Il nuovo pontefice Leone XIV, appena eletto, ha fatto capire che procederà nella strada aperta dal suo predecessore, dedicandosi con particolare impegno al problema della pace. Infatti, quando si è affacciato alla Loggia centrale della Basilica di San Pietro, per impartire la benedizione *urbi et orbi*, ha iniziato con l'invocazione pasquale della pace: *La pace del Cristo risorto, una pace disarmata e disarmante, umile e perseverante*. Ha poi aggiunto: *Vogliamo essere una Chiesa sinodale, una Chiesa che cammina, una Chiesa che cerca sempre la pace, che cerca sempre la carità, che cerca sempre di essere vicino specialmente a coloro che soffrono*. Il giorno seguente, Leone XIV ha presieduto, da pontefice, la sua prima celebrazione eucaristica con il collegio cardinalizio e, nell'omelia, ha ricordato l'urgenza per la Chiesa di agire, *perché la mancanza di fede porta spesso con sé drammi quali la perdita del senso della vita, l'oblio della misericordia, la violazione della dignità della persona nelle sue forme più drammatiche, la crisi della famiglia e tante altre ferite di cui la nostra società soffre*.

Recentemente, in preparazione della Cop30, papa Leone XIV ha inviato un videomessaggio [16] ai Rettori delle 200 università di Nord, Sud, Centro America e Penisola Iberica. In sintonia con la *Laudato si'*, li ha incoraggiati a essere costruttori di ponti, lavorando per la giustizia ecologica, sociale e ambientale.

Riferimenti bibliografici

- [1] W. Steffen, P. J. Crutzen, J. R. McNeil, Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature?, *Ambio*, **2007**, **36**, 614.
- [2] P. J. Crutzen, Geology of mankind-The Anthropocene, *Nature*, **2002**, **23**, 415.
- [3] Papa Francesco, *Laudato si' – Lettera enciclica sulla cura della casa comune*, Paoline editoriale Libri, Milano, **2015**.
- [4] (a) N. Armaroli, V. Balzani, *Energia oggi e domani. Prospettive, sfide, speranze*, Bononia University Press, Bologna, **2004**; (b) J. Rockstrom, et al., A safe operating space for humanity, *Nature*, **2009**, **461**, 472; (c) N. Armaroli, V. Balzani, *Energy for a Sustainable World – From the Oil Age to a Sun-Powered Future*, Wiley-VCH, Weinheim, **2011**; (d) N. Armaroli, V. Balzani, N. Serpone, *Powering Planet Earth – Energy solutions for the future*, Wiley-VCH, Weinheim, **2013**; (e) V. Balzani, M. Venturi, *Energia, Risorse, Ambiente*, Zanichelli, Bologna, **2014**; (f) L. Lombroso, *Ciao fossili – Cambiamenti climatici*, edizioni Artestampa, Modena, **2015**.
- [5] (a) V. Balzani, *Salvare il Pianeta per salvare noi stessi: energie rinnovabili, economia circolare, sobrietà*, Lu::CE edizioni, Massa, **2020**; (b) M. Z. Jacobson, *100% Clean, Renewable Energy and Storage for Everything*, Cambridge University Press, Cambridge, **2021**; (c) F. M. Butera, *Affrontare la complessità per governare la transizione ecologica*, Edizioni Ambiente, Milano, **2021**; (d) N. Armaroli, *Un mondo in crisi*, Dedalo, Bari, **2022**; (e) L. Becchetti, C. Becchetti, F. Naso, *Rinnovabili subito*, Donzelli editore, Roma, **2022**; (f) A. Tilche, *Sette lezioni sulla transizione climatica*, Dedalo, Bari, **2022**; (g) F. M. Butera, *Sole Vento Acqua*, Manifesto Libri, Roma, **2023**; (h) M. Z. Jacobson, *No Miracles Needed – how today's technology can save our climate and clean our air*, Cambridge University Press, Cambridge, **2023**; (i) M. Giusti, *L'urgenza di agire*, Lu::Ce edizioni, Massa, **2024**; (l) N. Armaroli, V. Balzani, *Energia per l'Astronave Terra*, IV edizione, Zanichelli, Bologna, **2024**; (m) V. Balzani, E. Castellucci, *La buona alleanza – Scienza e fede a difesa della casa comune*, Libreria Editrice Vaticana, Città del Vaticano, **2024**.
- [6] https://it.wikipedia.org/wiki/Cantico_delle_creature
- [7] <https://www.altalex.com/documents/news/2014/11/14/sblocca-italia-il-testo-coordinato-del-decreto-legge-in-gazzetta>
- [8] U. Bardi, *Extracted: How the Quest for Mineral Wealth Is Plundering the Planet*, Chelsea Green Publishing, Chelsea, **2014**.
- [9] <http://www.scienzainrete.it/contenuto/articolo/La-fuga-dalla-realta-e-il-mito-della-crescita-infinita>.
- [10] https://it.wikipedia.org/wiki/Supplemental_Nutrition_Assistance_Program.
- [11] https://hollywoodreporter.it/business/business_news/tim-cook-ceo-di-apple-il-suo-stipendio-vola-a-746-milioni-di-dollari/132704/.
- [12] <https://www.rai.it/dl/tg3/articoli/ContentItem-4ba9bb36-7be2-4b21-baa2-0f56a89232f8.html>
- [13] U. Galimberti, *I miti del nostro tempo*, Feltrinelli, Milano, **2022**.
- [14] <https://www.drivek.it/lamborghini/urus/#>
- [15] Papa Francesco, *Fratelli tutti – Lettera enciclica sulla fraternità e l'amicizia sociale*, Libreria Editrice Vaticana, Città del Vaticano, **2020**.
- [16] <https://www.avvenire.it/papa/pagine/papa-leone-videomessaggio-laudato-si>

I protagonisti del mondo materiale

Prima parte: sabbia, sale, carbone, ferro e rame

Fabio Olmi

e-mail: fabio.olmi@gmail.com

Abstract. The article reviews the most important material substances that have characterized our world. The most important characteristics and uses of five materials are examined, namely sand, salt, coal, iron and copper. It is discussed not only the positive aspects that they have had or have on the development of the world examined, but also the big problems that they have caused with their extraction, manufacture and use. Furthermore, it is examined the negative influence that some of them have had and still have on the planet's climate and on our survival.

Keywords: sabbia; sale; carbone; ferro; rame; aspetti positivi per il nostro sviluppo; aspetti negativi connessi al loro utilizzo

1. Introduzione

L'articolo intende passare in rassegna quelle sostanze materiali il cui utilizzo ha determinato passi essenziali dello sviluppo del mondo, che riguardano settori di vario tipo e interessano periodi di tempo vecchi, recenti ed attuali.

Si tratta di dieci sostanze materiali: sabbia, sale, ferro, rame, carbone, petrolio, cemento, litio, terre rare e idrogeno. Mi è stato molto utile, nella stesura del presente contributo, la lettura di un testo che si occupa però solo di sei di queste sostanze.¹

È bene precisare subito che non è possibile guardare allo sviluppo che c'è stato nel mondo solo con occhio positivo, come molti continuano a fare, perché questo è stato accompagnato da una dilapidazione sistematica delle risorse naturali, come se fossero infinite, e con poco o nessun rispetto dell'ambiente, "regalandoci" un riscaldamento del pianeta così rapido ed elevato, che ora è necessario lottare con rapidità e determinazione per rimediare all'incuria con una decisa e generalizzata decarbonizzazione.

Il rischio è l'estinzione non del pianeta, ma della nostra stessa specie: un dato a testimonianza di quanto detto è rappresentato dalla crescita del valore della concentrazione del CO₂ dall'età dello sviluppo industriale a oggi. Da quando si è iniziato a fare una misurazione continua della concentrazione del CO₂ si è passati da 318 a 422 ppm (2024).

La *Curva di Keeling*² (Figura 1), mostra l'aumento della concentrazione di diossido di carbonio nell'atmosfera del nostro pianeta. È il simbolo tangibile e inequivocabile dell'impatto che le attività umane hanno avuto ed hanno sulla Terra. Si può ben dire che la Curva di Keeling è uno dei prodotti scientifici più importanti e simbolici della nostra epoca.

In altre parole, lo sviluppo deve continuare, ma su "binari" diversi dal passato: deve essere uno sviluppo sostenibile, capace cioè di essere trasferito senza problemi ai nostri futuri discendenti.

Fermo restando quanto si è detto sopra, è importante esaminare alcune filiere che, partendo dai ma-

¹ E. Conway, *La materia del mondo*, Marsilio editori, Venezia, 2023.

² C. D. Keeling è stato un chimico statunitense che ha impiantato l'osservatorio di Mauna Loa nelle Hawaii, dando l'avvio alla misurazione continua della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera.

teriali presi in esame, ci forniscono le procedure che hanno condotto a molti oggetti di uso quotidiano e che ci rivelano il contributo degli sforzi intellettuali di tante persone che hanno consentito di farlo. Questo costituisce una serie di conoscenze che ci consentono di valutare con occhi diversi e apprezzare più in profondità l'oggetto che abbiamo dinanzi.

Dobbiamo d'altra parte tener presente che per poter affrontare la transizione ecologica e soprattutto energetica, abbiamo bisogno di molti materiali per costruire le apparecchiature che ci permettono di compiere questa transizione. E se cercheremo di limitare drasticamente il ricorso alle risorse minerali naturali finite, dovremo ricorrere sempre più massicciamente al recupero e riciclo di quegli oggetti e di quei materiali già impiegati e dismessi.

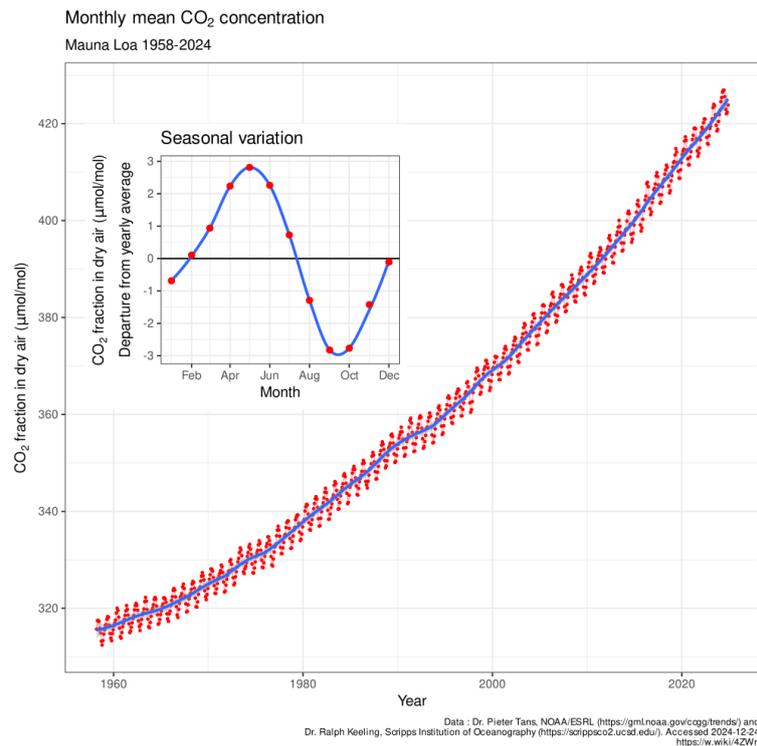


Figura 1. La curva di Keeling con l'andamento crescente e continuo della CO₂ nell'atmosfera

Data la corposità dell'argomento il contributo è stato diviso in due; in questa prima parte si affronteranno solo cinque dei materiali di interesse, e cioè, sabbia, sale, carbone, ferro e rame.

2. Sabbia

È più opportuno parlare di sabbie anziché di sabbia, perché ci sono tanti tipi di sabbia per cui, in base alla provenienza, si parla di sabbia di mare, sabbia di fiume e sabbia del deserto.

La sabbia del deserto, che costituisce senz'altro la riserva più ingente di sabbia, è composta di granuli piccoli assai uniformi, con un diametro tra 0,1 e 1 millimetro, è ricca di polvere (viene mossa dal vento) e non è utilizzabile negli impieghi comuni in cui sarebbe necessaria la sabbia.

La sabbia di mare, quella che comunemente chiamiamo rena, ha granuli meno uniformi della sabbia desertica, con un diametro che varia tra 0,1 e 2 millimetri, ed è costituita da una miscela di diversi composti di difficile utilizzazione.

La sabbia di fiume, grazie alla grande presenza di silice, ha molti granuli con sfaccettature vitree che le permettono, dunque, di essere molto più facilmente individuata rispetto alle altre sabbie. Si usa soprattutto per formare la malta unita al cemento e, se si tratta di una granulometria più grossa, si

impiega nel calcestruzzo. Sabbie con forte quantità di silice vengono impiegate poi per la produzione del vetro e dei microprocessori a base di silicio.

A seconda della granulosità media, le sabbie si distinguono in sabbie fini, medie e grossolane. In particolare, in base alla granulometria dei grani si hanno le tipologie riportate in Tabella 1.

In base alla composizione chimica si possono distinguere i seguenti tipi di sabbie: sabbia silicea (è usata per la formazione delle malte, per la formazione di vetri e per microprocessori a base di silicio); sabbia quarzifera (viene utilizzata principalmente nella produzione di abrasivi e quella che contiene zeoliti è usata come filtri per l'acqua); sabbia ferrosa; sabbia calcarea; sabbia micacea.

La sabbia può formarsi attraverso i seguenti meccanismi: (a) per erosione di rocce preesistenti di qualunque natura, (b) per precipitazione chimica da acque soprassature di sali e (c) per accumulo di scheletri e gusci di organismi come le conchiglie.

Tabella 1. Tipologia del materiale in base alla dimensione dei grani

Tipologia	Dimensione dei grani (mm)
Ciottoli	256 - 64
Ghiaia	64 - 4
Ghiaia fine	4 - 2
Sabbia molto grossolana	2 - 1
Sabbia grossolana	1 - 1/2
Sabbia media	1/2 - 1/4
Sabbia fine	1/4 - 1/8
Limo	1/16 - 1/256
Argilla	< 1/256

Vediamo ora i più importanti impieghi a seconda dei tipi di sabbia.

2.1 Formazione di malte

La formazione di malte è essenziale come collante di pietre e mattoni per le costruzioni. Una malta contiene generalmente 3-4 parti di sabbia, 1 parte di cemento (portland) e una parte di acqua. La sabbia impiegata è quella di fiume.

Ripareremo della malta quando esamineremo le caratteristiche del cemento, altra sostanza base del nostro mondo.

2.2 Fabbricazione del vetro e vari tipi di vetro

Il vetro comune si ottiene a partire da sabbia silicea, ma ad essa si aggiungono altri composti che hanno funzioni diverse: i fondenti (come ossido di sodio o di potassio) che hanno la funzione di abbassare la temperatura di fusione della massa e gli stabilizzanti (ossidi calcio o magnesio) che hanno la funzione di rendere il vetro più resistente agli attacchi atmosferici. Si preparano poi vetri speciali con l'aggiunta di altri composti, come mostrato in Tabella 2.

Quando la massa preparata viene portata a fusione (tra i 1300 e i 1500 °C) le strutture cristalline dei componenti la miscela collassano formando una miscela di atomi disordinata che, per *raffreddamento rapido*, dà un solido trasparente amorfo (liquido sopra raffreddato) che presenta la tipica struttura del vetro; se non sono state fatte aggiunte, ha l'aspetto limpido e incolore.

Il vetro non ha una temperatura di fusione definita, ma un intervallo di rammollimento in quanto prodotto amorfo. I vetri variano il loro grado di viscosità diventando prima pastosi e successivamente fluidi.

Tabella 2. Principali tipi di vetri speciali

Tipo di vetro	Composizione
Vetro di Boemia	Silicati di potassio; silicati di calcio
Cristallo	Silice pura (oltre il 50%); silicati di potassio; silicati di piombo
Vetri armati	Silicato di sodio; silicato di calcio; sottile rete metallica
Vetro Pyrex	Silice (80%); triossido di diboro (13%); piccole quantità di silicati di sodio e alluminio
Vetri colorati	Silicati di sodio e di calcio con aggiunta di ossidi metallici di vario tipo
Vetro specchio	Silicati di sodio, potassio calcio; su una faccia viene depositato un sottile strato di nitrato d'argento protetto da apposite vernici

2.2.1 Vetri colorati

Questi vetri li ammiriamo nelle finestre di tante chiese e sono il risultato dell'aggiunta alla massa da fondere di vari composti in parte allo stato ionico, in parte come coloranti colloidali.

La Tabella 3 fornisce un elenco di queste sostanze coloranti.

Tabella 3. Elenco dei coloranti usati nei vetri e dei colori ottenuti

Tipo di colorante	Colorazione ottenuta	
	Condizioni ossidanti	Condizioni riducenti
Coloranti ionici		
Cobalto ossido	Blu	Blu
Rame ossido	Acquamarina	Verde
Manganese	Viola	
Cobalto-Manganese	Ametista, nero	Ametista, nero
Ferro	Giallo	Verde-blu
Zolfo-ferro		Giallo-ambra
Coloranti colloidali		
Zolfo-Cadmio		Giallo
Zolfo-Cadmio-Selenio		Rosso
Rame		Rosso-rubino
Oro		Rosso-rubino
Argento		Giallo

2.2.2 Vetri speciali

Si tratta di vetri che assumono proprietà inaspettate del tutto particolari come, ad esempio, i vetri antiproiettile, capaci cioè di non infrangersi all'impatto con una pallottola sparata da una pistola o da un fucile. Qual è il segreto che attribuisce al vetro queste caratteristiche? Il segreto sta nel conferire al vetro rigido una certa flessibilità e questo si ottiene predisponendo un vetro

multistrato contenente al suo interno uno o più lamine di materiale plastico trasparente (elastomeri). Se il vetro viene colpito da un proiettile, gli elastomeri mantengono la lastra coesa, impedendone il cedimento a causa dell'urto. La figura 2 mostra lo schema della struttura di un vetro simile.

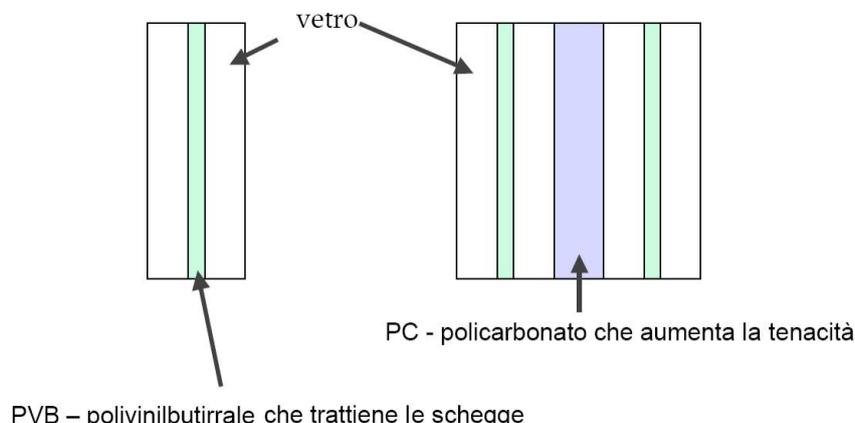


Figura 2. Schema della struttura di un vetro antiproiettile

Un altro tipo di vetro è quello dei parabrezza. Qui il problema da risolvere è stato quello di evitare che, a seguito di un urto con un oggetto, i vetri si potessero frantumare generando pericolose schegge per il guidatore. La prima variante è stata quella di usare per i parabrezza vetro temperato.³ Il vetro indurito in tal modo si spacca in tantissimi frammenti piccoli e per lo più innocui. Successivamente, nei parabrezza questo tipo di vetro fu sostituito con vetro laminato.

Un caso particolare è quello dei parabrezza per aerei che, operando ad alte quote (basse temperature) e a forti velocità, sono dotati di parabrezza riscaldati al loro interno dalla corrente elettrica che attraversa un sottile strato di diossido di stagno, accorgimento che permette al vetro di non appannarsi all'interno e di non gelare all'esterno.⁴

2.2.3 Vetro per l'edilizia

Il vetro non è più solo sinonimo di finestre ma è diventato sinonimo anche di pareti. I piani dei giganteschi grattacieli, sempre più numerosi in ogni parte del mondo, sono infatti fasciati di pareti di vetro; ne è un esempio famoso il palazzo delle Nazioni Unite a New York, costruito ormai tanti anni fa e chiamato non a caso "Palazzo di vetro".

La costruzione di un grattacielo si fonda sulla struttura portante fatta di cemento armato e acciaio e "l'abito esterno" sarebbe impensabile senza l'uso del vetro. Una struttura di questo genere porta però due importanti conseguenze: da un lato ci sono le tensioni dovute al caldo/freddo e dall'altro le vibrazioni/oscillazioni a cui viene sottoposta la struttura per effetto del vento, sempre più ampie quanto maggiore è la sua altezza. Inoltre, c'è da tenere presente anche l'esigenza di mantenere all'interno una temperatura gradevole e questo comporta spese elevate per la climatizzazione interna.

Si tratta dunque di vetri fatti e lavorati in modo particolare. Sono i cosiddetti vetri basso-emissivi (Love-E) che, mentre riflettono la radiazione esterna e minimizzano anche la trasmissione interna, permettono un ottimo equilibrio energetico combinando un maggior isolamento termico e un appor-

³ Il vetro temperato è un vetro di sicurezza ottenuto dal vetro "normale" per trattamento termico portandolo a circa 700°C e poi raffreddandolo velocemente.

⁴ Alle quote di crociera di un aereo la temperatura dell'aria può arrivare a -50°C.

to ottimale di luce dall'esterno.⁵ La sfida tecnologicamente più impegnativa si è avuta a Dubai nella costruzione della torre dell'emiro Khalifa alta 829 metri (Figura 3), che è in grado di resistere a venti con velocità di 250 Km/h e a oscillazioni fino a 2,5 metri di raggio.



Figura 3. La torre dell'emiro Khalifa a Dubai

2.3 Silicio cristallino per i chips

Il silicio elementare si prepara da SiO_2 , è un semiconduttore e si impiega per la costruzione di circuiti integrati, transistor e chips elettronici. Si preparano i cosiddetti wafer di silicio,⁶ sottilissimi dischetti di silicio purissimo che costituiscono il supporto dei circuiti integrati.

Un circuito integrato (*integrated circuit*, in sigla IC) è un circuito elettronico miniaturizzato dove i vari transistor sono stati formati tutti nello stesso istante grazie a un unico processo fisico-chimico.

Un *chip* (letteralmente “pezzetto”) è il componente elettronico composto da una minuscola piastrina del wafer di silicio (Figura 4, sinistra), a partire dalla quale viene costruito il circuito integrato; in pratica, il *chip* è il supporto che contiene gli elementi (attivi o passivi) che costituiscono il circuito. A volte si utilizza il termine *chip* per indicare complessivamente l'integrato. Viene realizzato a partire dal wafer di un semiconduttore (generalmente silicio), attraverso diverse scale di integrazione, e rappresenta il *core*, o nucleo o dispositivo di elaborazione del processore.

L'ideazione del circuito integrato si deve a Jack St. Clair Kilby (Figura 4, destra), che nel 1958 ne costruì il primo esemplare composto da circa dieci componenti elementari, cosa che gli valse il Premio Nobel per la Fisica nel 2000.

⁵ <https://www.sorgedil.it/blog/?vetro-basso-emissivo-caratteristiche>

⁶ [https://en.wikipedia.org/wiki/Wafer_\(electronics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Wafer_(electronics))

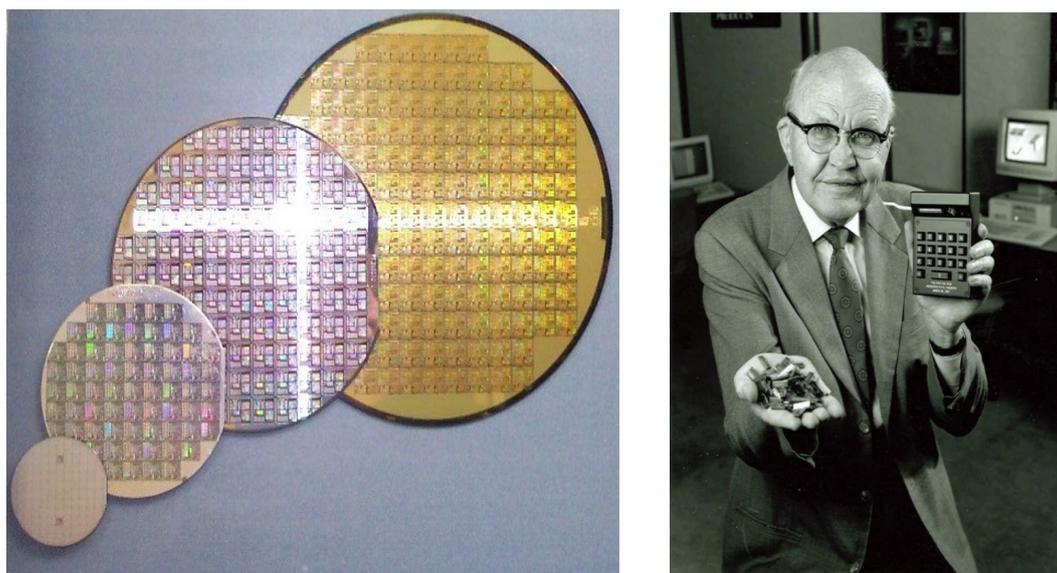


Figura 4. Wafer di silicio (sinistra) e Jack St. Clair Kilby, ideatore del circuito integrato (destra)

Un circuito integrato (IC, o, come già detto, CHIP), è un dispositivo elettronico nel quale, gli elementi attivi (transistor, diodi, ecc.) e gli elementi passivi (resistori, condensatori, ecc.), sono contenuti all'interno di una singola piastrina di materiale semiconduttore.⁷ Esso è il prodotto della tecnologia avanzata dell'industria dei semiconduttori, cioè della capacità che hanno oggi le industrie di costruire milioni di transistori in un solo chip di semiconduttore.

2.4 La fibra ottica, rivoluzione nelle comunicazioni via cavo

Le fibre ottiche sono dei sottilissimi speciali "fili di vetro" che sono state inventate nel 1955 dal ricercatore inglese Nardiner S. Kanapy. Si tratta di filamenti di vetro capaci di guidare al proprio interno la luce, basati sulla proprietà della luce di propagarsi da un capo all'altro del filamento percorrendolo rimbalzando sulle pareti interne senza disperdersi all'esterno. La Figura 5 mostra lo schema dell'interno di una fibra ottica.

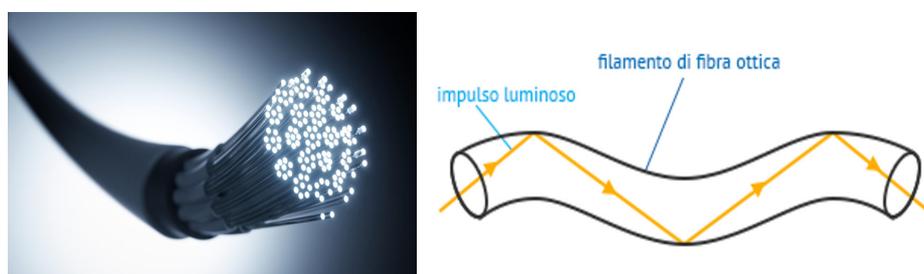


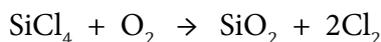
Figura 5. Insieme di fibre ottiche e schema interno di una fibra ottica

La scoperta ha trovato vastissime applicazioni nelle comunicazioni telefoniche, televisive e nella trasmissione di dati. Si tratta di trasformare un impulso elettrico in impulso luminoso e immetterlo nella fibra ottica; all'altro capo del "filo" l'impulso luminoso viene nuovamente trasformato in impulso elettrico. I vantaggi di questo metodo di trasmissione rispetto all'uso di fili di rame sono enormi: una

⁷ <https://aws.amazon.com/it/what-is/computer-chip/#:~:text=chip%20per%20computer?-,Cos'è%20un%20chip%20per%20computer?,che%20trasmettono%20segnali%20di%20dati.>

fibra ottica non subisce interferenze elettriche e il segnale trasportato non risulta disturbato. Inoltre, il segnale si può trasmettere a grande distanza senza bisogno di amplificazione, cosa invece necessaria per un messaggio elettrico.

La silice purissima per la fibra ottica si prepara a partire dal SiCl_4 secondo la reazione:



Le fibre ottiche sono costituite da una parte interna (nucleo) a indice di rifrazione più alto della parte circostante (mantello): si tratta di silice con droganti. Per ottenere questo indice di rifrazione più elevato si utilizza il GeO_2 . La fibra si presenta dunque come un cilindro di silice del diametro di un centinaio di micron con una parte interna composta da silice debolmente drogata con germanio.⁸

3. Sale

I sali sono molti ma quando si dice sale si intende comunemente il “re dei sali”, il sale da cucina, il cloruro di sodio.⁹ Il sale ha rappresentato nella storia una sostanza molto importante e anche oggi rappresenta l’origine di molti importanti composti.

“Il sale entra di diritto nel novero dei protagonisti del Mondo materiale, non solo per le sue straordinarie proprietà, ma per ciò che ci ha permesso di fare ... Nella nostra storia e nel nostro presente il sale è ovunque”. Così si pronuncia a proposito del sale Ed Conway nel suo recente libro “La materia del mondo”, già citato.¹ Il nostro corpo ha bisogno di sale per permettere a nervi, muscoli e tendini di funzionare correttamente (passaggio degli impulsi elettrici). A parte la salatura dei cibi, fino all’invenzione dei frigoriferi, il sale era il principale mezzo di conservazione dei cibi (ad esempio carni e pesci).

A Ibiza e Maiorca il sale viene lavorato sin dall’epoca dei fenici: attraverso un sistema di canali e di chiuse, l’acqua del mare viene convogliata in una serie di laghi dove, riscaldata dal Sole, evapora lentamente trasformandosi in salamoia sempre più concentrata da cui alla fine è possibile estrarre i cristalli di sale (fior di sale). In Italia la strada statale SS4 che collega Roma con Porto d’Ascoli, è una via del sale che segue il percorso della via Salaria di epoca romana: l’Adriatico è stato per migliaia di anni uno snodo di produzione del sale. Almeno fin dall’epoca medievale il sale di Venezia raggiungeva Modena e Parma e altre località delle rive del Po, dove veniva usato per la produzione di prosciutto e formaggio. “Il sapore caratteristico del parmigiano-reggiano è dovuto al fatto che le forme, prima della stagionatura, vengono lasciate per 20 giorni in salamoia”.¹⁰

Per gran parte dell’antichità il sale era indice di ricchezza e in Africa i mercanti lo scambiavano con l’oro e veniva usato come moneta per pagare le merci. I romani furono i primi a fornire una razione di sale ai propri soldati come diaria (da cui la parola salario). Uno dei primi provvedimenti in vista di una guerra era fare scorte di sale. I governi hanno sempre cercato di esercitare il proprio potere anche attraverso il sale controllandolo e tassandolo. In Cina, nel corso della lunghissima storia delle istituzioni cinesi, si riconosce una costante: il monopolio del sale e questo è sopravvissuto fino al XXI secolo.

Famosa è la *gabelle* francese che tassava il sale e che in certe zone della Francia raggiungeva livelli esorbitanti. A tempi di Luigi XIV (1638-1715) la *gabelle* era la chiave portante delle finanze pubbliche francesi. Non meraviglia che al cuore della Rivoluzione Francese ci fosse proprio la gabella sul sale: era il simbolo di tutto ciò che non andava *nell’ancien regime*.

In Italia si è pagata l’imposta sul sale dall’unificazione del Regno fino al 1974. Era un tributo antico e veniva corrisposto anche ai tempi in cui il Paese era suddiviso in piccoli Stati. Si prevedeva l’istituzione, per la fabbricazione e la vendita o per la vendita soltanto, di un monopolio a favore dello Stato per calmarne il prezzo, vietandone ai privati la fabbricazione e la vendita, oppure la sola vendita. Nel 1974 la legge che l’istituiva fu abrogata e così l’imposta sul sale.

⁸ G. Ferri, G. Galasso, Analisi delle caratteristiche delle fibre ottiche: <https://web.tiscali.it/~chemengworld>

⁹ Il cosiddetto sale da cucina è in realtà una miscela di diversi sali, principalmente NaCl, ma ci sono anche, in piccola quantità, sali di calcio, magnesio e potassio.

¹⁰ Riferimento 2 a pag. 123 del libro di Ed Conway citato nella nota 1.

Esistono tre modi per ottenere il sale: si può ricavare per evaporazione dell'acqua di mare, operazione già nota ai tempi del Neolitico, oppure si può estrarre da miniere (salgemma) allo stato solido, e ancora si può estrarre dalla terra sottoforma di salamoia, una soluzione salina che contiene oltre il 30% di sale. È questo il procedimento più usato in quelle parti del mondo in cui il calore solare non è sufficiente a evaporare l'acqua di mare.

L'utilizzo del sale come tale è ben noto: si impiega nell'insaporimento dei cibi, per la conservazione di carni e pesci e come prodotto di partenza per molte sostanze di uso quotidiano. A rendere così importante il cloruro di sodio all'interno del Mondo materiale è il fatto che oggi è alla base di gran parte dell'industria chimica e di quella farmaceutica.

3.1 Il sale e alcuni suoi derivati nell'industria chimica

Uno dei processi industriali più importanti è il processo cloro-soda. Serve a produrre cloro e soda caustica e può essere realizzato con una cella a membrana, la cui struttura è mostrata in figura 6.¹¹

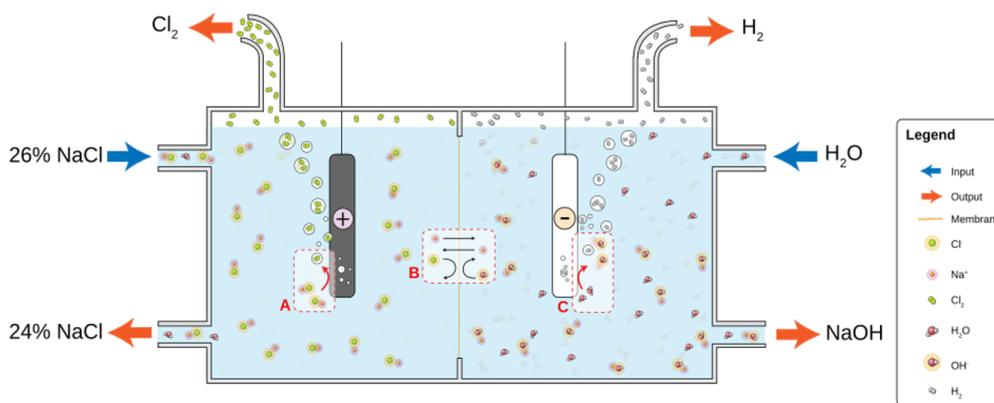


Figura 6. Schema di funzionamento di una cella a membrana per la produzione di cloro-soda

Si tratta di una elettrolisi di cloruro di sodio/potassio in soluzione acquosa all'interno di una cella a due compartimenti separati da una membrana semipermeabile a scambio ionico, costituita da una resina perfluorurata, permeabile a Na⁺ e H₂O, ma non a OH⁻ e Cl⁻. La salamoia concentrata di cloruro di sodio viene introdotta nel primo compartimento (cella anodica) dove gli ioni Cl⁻ si ossidano all'anodo formando cloro (Cl₂). Nel compartimento catodico gli ioni Na⁺ in soluzione con gli ioni OH⁻ producono NaOH, mentre all'elettrodo si sviluppa H₂.

La reazione completa dell'elettrolisi del cloruro di sodio è:



Come si utilizzano i prodotti ottenuti da questo processo (messo a punto nel lontano 1892) e cosa si produce da questi prodotti?

3.1.1 Utilizzo di NaOH

La soda caustica viene impiegata nella sintesi di coloranti, di detergenti e saponi, nella fabbricazione della carta e nella produzione di ipoclorito di sodio.

Ad esempio, come si prepara un sapone? Il sapone è un sale alcalino che si forma unendo un grasso (vegetale o animale) e una base forte (come la soda caustica). Più precisamente, è di solito un sale di

¹¹ Il più antico metodo di produzione del processo era quello della cella a catodo di mercurio, ma è stato da tempo sostituito da quello a membrana evitando le contaminazioni da mercurio.

sodio o di potassio di un acido carbossilico alifatico a lunga catena (Figura 7), che ha la caratteristica di sciogliere le sostanze grasse.

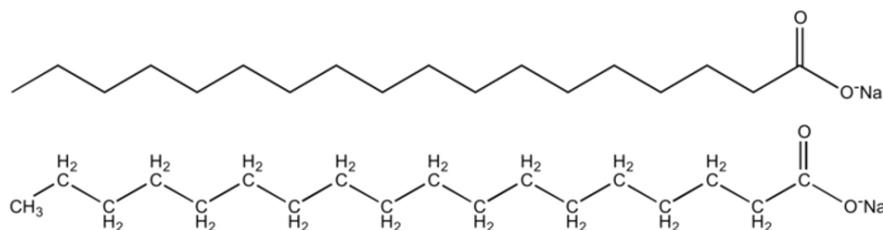


Figura 7. Strutture chimiche di un sapone

Si prepara per mezzo di un processo denominato saponificazione, ovvero per idrolisi alcalina, di acidi grassi di origine animale o vegetale. Il processo porta alla formazione del sale carbossilico (il sapone) e un alcol (comunemente, glicerina).

3.1.2 Utilizzo del cloro e di alcuni suoi derivati

Il cloro è un importante agente chimico utilizzato nella depurazione dell'acqua, nei disinfettanti e come sbiancante; è stato fra le prime armi chimiche impiegate su vasta scala, in forma gassosa essendo un forte vescicante.¹²

Si usa inoltre nella fabbricazione di molti oggetti di uso quotidiano, come carta, antisettici, tinture, alimenti, insetticidi, vernici, prodotti petroliferi, plastica, medicinali, tessuti, solventi.

Da Cl_2 in ambiente basico si ottiene lo ione ipoclorito, ClO^- , in base alla seguente reazione:



L'ipoclorito di sodio si impiega nei sistemi di depurazione dell'acqua e nel detergente candeggina. Il processo di disinfezione dell'acqua garantisce l'inattivazione microbica anche per i patogeni più resistenti eventualmente presenti. L'efficacia del trattamento è funzione della concentrazione del disinfettante introdotto nell'acqua e del tempo di contatto ed è strettamente legato alle caratteristiche specifiche dell'acqua da trattare.¹³

Un derivato particolarmente importante del cloro è il PVC, uno dei prodotti industriali più studiati dal punto di vista tecnico-industriale e regolatorio di compatibilità con la salute e l'ambiente. L'industria del PVC è un'industria "matura" che nasce nel 1936 e i suoi processi di fabbricazione si sono adeguati agli standard più severi per la protezione dei lavoratori, consumatori e ambiente.

Il PVC è la sigla del policloruro di vinile $-(\text{CH}_2-\text{CHCl})_n-$ e rappresenta una delle materie plastiche più utilizzate al mondo, essendo difficilmente infiammabile: nel 2019 la produzione mondiale è stata di oltre 47 milioni di tonnellate. Il polimero si ottiene dalla polimerizzazione del cloruro di vinile monomero ed è costituito dal 57% di cloro proveniente dal sale da cucina e dal 43% da carbonio e idrogeno derivanti da un prodotto petrolifero.¹⁴

Dal 1845 il cloruro di vinile si ottenne facendo reagire l'1,2 dicloroetano con una soluzione di idrossido di potassio in etanolo. Più tardi si ottenne da acetilene e acido cloridrico in presenza di cloruro di mercurio(II) come catalizzatore.¹⁵

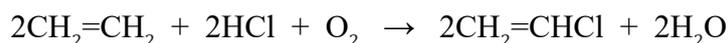
¹² Tristemente famoso è un suo derivato micidiale, l'iprite: diclorometil solfuro $\text{S}(\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{Cl})_2$.

¹³ <https://www.technoacque.com/blog/appunti-sulla-disinfezione-dellacqua-potabile/>

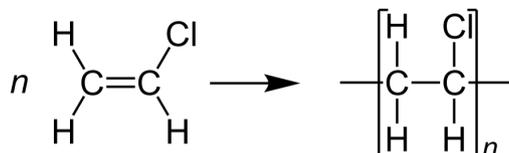
¹⁴ <https://idealsistem.it/cosa-pvc-caratteristiche-utilizzi/>

¹⁵ <https://chimicamo.org/chimica-generale/cloruro-di-vinile/>

Partendo da etene la reazione è:



La reazione di polimerizzazione del cloruro di vinile porta alla formazione di lunghe catene lineari e viene innescata dall'aggiunta di un iniziatore, un composto capace di generare radicali:



Gli utilizzi del PVC sono molto numerosi: può essere modellato per stampaggio a caldo nelle forme desiderate, estruso, calandrato¹⁶ o ridotto a liquido per la spalmatura di tessuti, serbatoi, vasche e fibre tessili artificiali.

Le applicazioni più rilevanti sono la produzione di tubi per l'edilizia (ad esempio, grondaie e tubi per acqua potabile), la protezione di cavi elettrici, profili per finestre, pavimenti vinilici, pellicola rigida e plastificata per imballi e cartotecnica.

In termini applicativi, il PVC è la materia plastica più versatile conosciuta. È il "vinile" per antonomasia usato per la produzione dei dischi.

Di PVC per uso tessile ne esistono più tipi. Il primo tipo, commercialmente chiamato Movil, fu prodotto in Francia già nel 1949 a partire da PVC essenzialmente amorfo. Un secondo tipo, commercialmente chiamato Leavil, è costituito da PVC cristallino ed è di qualità migliore.

Nel complesso la produzione di fibre cloroviniliche è stata, però, quasi abbandonata.

3.1.3 Utilizzo del sodio

Sta prendendo sempre più importanza l'utilizzo del sodio per produrre batterie agli ioni di sodio, Na⁺, assai più economiche di quelle al Li⁺ e più facilmente accessibile come materiale. Il processo di produzione delle batterie agli ioni sodio è analogo a quello delle batterie agli ioni litio e più semplice (per le caratteristiche meno reattive del sodio).

Le batterie agli ioni sodio sono però meno potenti di quelle al litio,¹⁷ ma possono rendere l'Europa indipendente nell'approvvigionamento della materia prima e anche qui si può applicare la circolarità dei materiali impiegati nella costruzione.

Dovrebbero arrivare sul mercato tra un paio d'anni le prime batterie per auto elettriche a base di sodio e le produrrà per prima la Cina.¹⁸ Le batterie saranno installate su una city car prodotta dalla cinese BYD (Build Your Dreams) e si calcola che verrà messa sul mercato a circa 10.000 dollari.

Le batterie al sodio presentano, però, alcuni problemi come concorrenti di quelle al litio: forniscono una densità di carica inferiore di quelle al litio, il che si traduce in un'autonomia ridotta per le auto elettriche; hanno una velocità di ricarica assai più ridotta di quelle al litio; inoltre, essendo una tecnologia relativamente giovane, richiedono ulteriori sviluppi per ottimizzare le prestazioni e garantire l'affidabilità a lungo termine.

4. Carbone

Il carbone, come è noto, è un combustibile solido composto prevalentemente da carbonio che si è formato in natura per decomposizione anaerobica di sostanze organiche vegetali. La sua genesi e le sue caratteristiche sono illustrate nella Scheda 1, riportata di seguito.

¹⁶ La calandratura è un processo di produzione industriale di tipo deformazione plastica che consente di produrre (calandratura della gomma e della plastica) o trasformare (calandratura della lamiera metallica) fogli di materiale o profilati metallici.

¹⁷ <https://www.qualenergia.it/articoli/batterie-sodio-loro-futuro-ancora-incerto/>

¹⁸ <https://www.economyup.it/automotive/batterie-al-sodio-cosa-sono-e-perche-potrebbero-essere-il-futuro-del-lauto-elettrica/>

Recenti ritrovamenti indicano che il carbone veniva utilizzato come combustibile già nel 1600 a.C.: tracce di carbone sono state trovate nelle rovine di Jiren Taigoukounello e Xinjiang in Cina, anche se si suppone che la scoperta sia stata casuale. Per quanto riguarda tempi “relativamente più recenti”, nel 1000 a.C. circa, si hanno tracce dell’uso di una vera miniera di carbone scoperta sempre in Cina e anche della commercializzazione del carbone estratto.

In occidente gli antichi greci e poi i romani lo estraevano e lo utilizzavano sia per scaldarsi che per produrre opere di artigianato. Nel tardo Medioevo il carbone è stato utilizzato nei Paesi Bassi nella provincia di Limburgo e anche in Inghilterra nella città di Newcastle.

È, però, solo con la Rivoluzione Industriale (1760-1840) in Inghilterra che il carbone diventa il protagonista fondamentale della produzione energetica mondiale.¹⁹ Per avere un’idea dell’entità della quantità di carbone che è stata utilizzata a partire da questo periodo basta ricordare che la produzione mondiale passò da circa 10 milioni di tonnellate nel 1700 a circa 70 milioni nel 1850 e si sono toccati gli 800 milioni di tonnellate nel 1900.

Se nella Rivoluzione Industriale il carbone è stato la fonte energetica fondamentale, sono state le macchine a vapore (a carbone) a determinare il grande incremento dell’industrializzazione. Fu lo scozzese James Watt (1765) a inventare la prima macchina a vapore alimentata a carbone che diventò il simbolo della rivoluzione industriale: ne furono costruite varie versioni per poterla utilizzare in varie situazioni (Figura 8). Fu questa macchina che determinò la nascita della moderna fabbrica industriale. L’applicazione della macchina a vapore alla tessitura con l’invenzione della prima macchina automatica per tessere (Edmund Cartwright, 1785) determinò una vera e propria rivoluzione economico-sociale e i processi lavorativi meccanizzati rimpiazzarono progressivamente il lavoro manuale a domicilio dando origine, da un lato, al nascere della classe operaia e, dall’altro, a quella del capitalismo industriale.

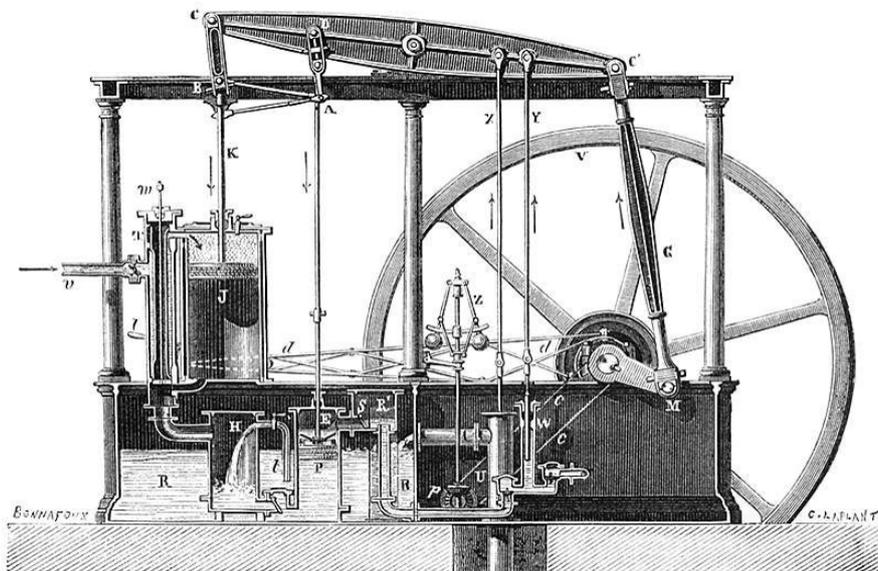


Fig. 59. — Machine à balancier de Watt.

e. Tuyau de prise de vapeur; T. tiroir; J, cylindre; H, condenseur; PE pompe d'épuisement; WY pompe alimentaire de la chaudière; UX pompe d'alimentation de la bûche R; p Z régulateur; dt excentrique; ABCD parallélogramme; GM bielle et manivelle; V volant.

Figura 8. Schema della macchina a vapore di J. Watt

Nel 1814 iniziò la rivoluzione del trasporto terrestre con l’invenzione della prima locomotiva a vapore di George Stephenson (Figura 9): nel 1830 fu inaugurata la prima linea ferroviaria Liverpool-Manchester e il 3 ottobre 1839 veniva inaugurata la prima linea ferroviaria italiana la Napoli-Portici.

¹⁹ F. Olmi, *La chimica nelle cose*, PM edizioni, Varazze, 2017, pag. 122-125.



Figura 9. Locomotiva a vapore di Stephenson

Un forte incremento dei trasporti marittimi si ebbe poi con il passaggio dalle navi a vela a quelle a vapore. Fu nel 1807 che una nave a vapore salpò dal porto di New York navigando per trentadue ore. In Europa furono la Francia e la Gran Bretagna a costruire i primi “vapori”; in Italia fu il governo di Napoli che varò il vapore “Ferdinando I” che da Napoli navigò fino a Marsiglia.

Nonostante che il carbone sia stato progressivamente spodestato dal petrolio molto più agevole da spostare e utilizzare, oggi la produzione è di circa 8 miliardi di tonnellate²⁰ e, benché costituisca il peggior produttore di CO₂ nell’atmosfera, causa principale del riscaldamento del pianeta, la sua produzione e il suo consumo, dopo una leggera inflessione dal 2017 al 2020, continua a crescere sia pure debolmente (Figura 10, sinistra): nel 2013-2014 ne sono state prodotte 7976 milioni di tonnellate (Mton) e, nel 2018-2019, 7940 Mton, con Cina e India fra i maggiori produttori.²¹ La situazione europea è leggermente migliore (Figura 10, destra); ad oggi in Europa rimangono solo due grandi produttori: Polonia e Cecoslovacchia.

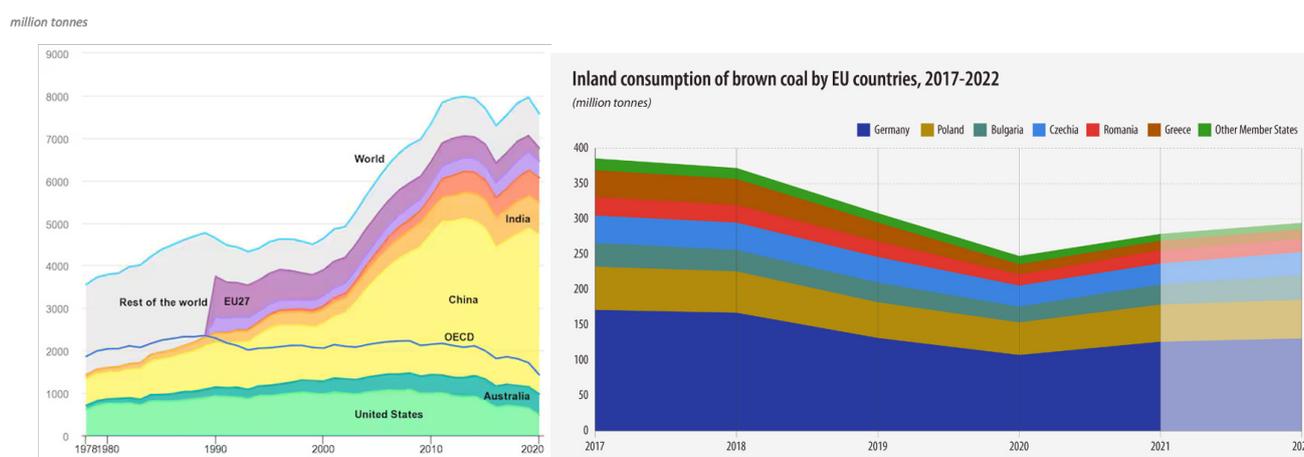


Figura 10. Consumo di carbone a livello mondiale nel periodo 1978-2020 (sinistra) e in Europa nel periodo 2017-2022 (destra)

²⁰ <https://assocarboni.it/assocarboni/il-sole-24-ore-marzo-2015/>

²¹ La Cina e l’India sono di gran lunga i Paesi che impiegano il carbone, soprattutto nelle centrali termoelettriche.

Scheda 1

Genesi e caratteristiche del carbone

Le biomasse prodotte milioni di anni fa, sommerse durante il periodo Carbonifero dell’Era primaria, furono ricoperte da sedimenti e, sotto l’effetto della pressione e della temperatura, misero in atto una serie di processi chimico-fisici e biologici (carbonificazione) fuori del contatto dell’aria e concentrarono il carbonio presente nel legno generando il carbone. Tuttavia, i prodotti ottenuti da questo processo, a seconda della durata temporale, sono diversi per quanto riguarda le percentuali di carbonio: torba (circa 60% di C), lignite circa 70% di C), litantrace (circa 80% di C) e infine l’antracite (circa 95% di C). Se il processo giunge a produrre il 100% di C si forma la grafite che, pur essendo un ottimo conduttore di elettricità e calore, non è però combustibile.

Le impurezze contenute nel carbone generano una combustione molto “sporca” di fumi e polveri che richiede interventi impegnativi, sia tecnologicamente che economicamente, per evitare gravi danni all’ambiente e alla salute umana.

I metodi con cui viene utilizzato il carbone sono essenzialmente tre: combustione diretta, combustione come coke negli altiforni per la preparazione del ferro e gassificazione.

Il coke è il risultato della distillazione (pirolisi) del carbone ed è un solido resistente al carico del minerale negli altiforni.²² Il processo di gassificazione del carbone produce il cosiddetto gas di sintesi che veniva impiegato a scopi energetici: era il cosiddetto “gas di città”, ora è in disuso. Per gassificazione si può ottenere gas d’aria, gas d’acqua e gas misto: nel primo caso si tratta di far passare aria in difetto sul carbone rovente ottenendo una miscela di CO, H₂ e CH₄; nel secondo caso si fa passare vapor d’acqua su carbone a 1000°C ottenendo una miscela contenente 40% di CO e 50% di H₂ (tre volte più calorifica di quella del gas d’aria).

5. Ferro, il “re dei metalli”

Il ferro rappresenta senza dubbio il “re dei metalli” per la sua abbondanza e la sua grande versatilità di impiego. Il ferro, però, combinandosi facilmente con l’ossigeno, non si trova allo stato nativo, ma sottoforma di suoi composti essenzialmente ossigenati. I più importanti di questi, dove il ferro si trova in percentuali economicamente vantaggiose, sono l’ematite, la magnetite e la limonite, meno ricchi sono la siderite e la pirite.²³

La storia dell’umanità è stata scandita prima dall’uso e dalla lavorazione della pietra e successivamente dalla metallurgia per ottenere e lavorare metalli. Questa attività è stata caratterizzata, all’inizio, dall’età del rame e del bronzo (lega di rame e stagno) e, solo più tardi, da quella del ferro; la ragione è di natura chimico-fisica: il rame e il bronzo si ottengono molto più facilmente del ferro dai loro minerali perché hanno punti di fusione più bassi.²⁴

Per ottenere rame e bronzo è sufficiente trattare il minerale con riscaldamento in forno a legna, per ottenere il ferro sono necessari due salti tecnici: l’uso del carbone come combustibile (che permette di ottenere temperature più elevate) e l’impiego di un mantice per insufflare aria in modo da aumentare la temperatura della combustione; questo naturalmente fu acquisito più tardi della fusione dei minerali di rame. La figura 11 mostra lo schema di due tipi di antichi forni.

²² L’alimentazione continua di un altoforno consiste nell’immissione dalla bocca di strati alternati di coke e di minerale di ferro.

²³ La magnetite, Fe₃O₄, è il minerale più ricco di ferro, seguono l’ematite, Fe₂O₃, e la limonite, 2Fe₂O₃·3H₂O; meno ricchi in ferro sono la pirite, FeS₂, e la siderite, FeCO₃.

²⁴ Il ferro ha p.f. di 1530°C, il rame di 1083°C e le leghe come CuSn sotto i 1000°C.

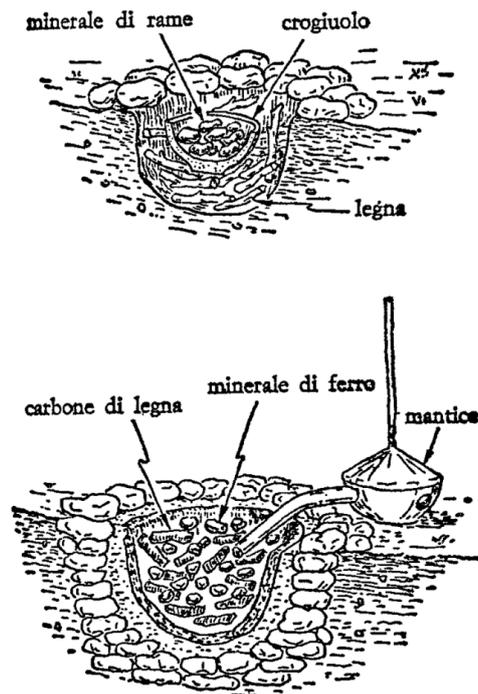


Figura 11. Schema di due tipi di forni antichi

La storia ci dice che già nel 3000 a.C. la tecnologia del bronzo era diffusa a partire dal Vicino Oriente e impiegata per fabbricare armi e armature; sembra che l'evento più famoso dell'età del bronzo sia stata la guerra di Troia. In Europa l'età del bronzo si sviluppò più tardi, a partire da circa l'anno 1800 a.C. L'età del ferro ebbe inizio tra il 1000 e il 700 a.C. e sembra che il segreto per la fusione del ferro sia stato scoperto nell'Asia Minore, dove gli Ittiti crearono un grande impero fabbricando con il ferro armi e corazze.

Per comprendere l'enorme importanza che il ferro ha nel mondo riprendiamo alcune affermazioni tratte dal libro di Ed Conway.¹

“L'acciaio è uno di quei materiali su cui i leader politici tendono a sviluppare una fissazione poiché alimenta praticamente ogni altro processo produttivo. Il ferro è ciò che ci permette di fare: costruire, viaggiare fabbricare e anche ucciderci a vicenda. Rappresenta il 95% circa dei metalli che usiamo. È talmente essenziale da essere un ottimo indicatore degli standard di vita di un Paese al pari del suo PIL. In quasi tutti i Paesi ricchi una persona, nell'arco della sua esistenza, ha a disposizione quasi 15 tonnellate di acciaio (nelle case, nelle automobili, negli ospedali, nelle scuole, negli armamenti, ...). In Cina si scende a circa 7 tonnellate pro capite e in Africa, nei paesi sub sahariani, si arriva a malapena a 1 tonnellata a testa. Spesso non lo ricordiamo, ma il ferro scorre nel nostro corpo all'interno dei vasi sanguigni legato all'emoglobina dei nostri globuli rossi. È il secondo metallo più abbondante della crosta terrestre (il primo è l'alluminio).”

La storia della lavorazione del ferro appare come una sequela di prove empiriche; abbiamo scoperto come produrre acciaio a livello industriale a metà del XIX secolo, quando Sir Henry Bessemer progettò il convertitore della ghisa in acciaio.

È stato Donald Trump che ha affermato “Se non hai l'acciaio, non hai un Paese”.

Come si ottiene oggi il ferro dai suoi minerali? Con la siderurgia degli altiforni, le caratteristiche e il funzionamento dei quali sono riportati nella Scheda 2. Attualmente, però, per abbattere l'inquinamento si cerca di sostituire l'alimentazione a carbone con l'idrogeno. In Svezia c'è un impianto già attivo alimentato a idrogeno. Si sta tentando di battere questa strada anche in Italia e precisamente

nell'impianto di Taranto, l'ex ILVA, ma la prospettiva appare assai incerta per le vicende economiche che affliggono tale impianto (attualmente è in attività solo un forno e la produzione è molto scarsa, dell'ordine di due milioni di tonnellate all'anno).

Ricordiamo che la maggior parte dell'acciaio italiano è ottenuto dal riciclo dei rottami con la loro rifusione in forni elettrici: si tratta all'incirca dell'80% della nostra produzione. Tuttavia, non è possibile rinunciare anche alla sua preparazione attraverso l'impiego del minerale per la sua grande utilizzazione.

Scheda 2 La tecnologia dell'altoforno²⁵

L'altoforno classico non è una struttura isolata, ma è connesso a un serie di apparecchiature che ne permettono il funzionamento: sili per immagazzinare il minerale, apparecchi di preparazione del minerale e del coke, magazzini del coke e dei fondenti, apparecchi di preparazione delle "cariche" dosate da immettere nell'altoforno, elevatore per il trasporto delle cariche alla bocca dell'altoforno, impianti di presa per la depurazione del gas prodotto, apparecchi che insufflano aria alla base della struttura (Figura 12).

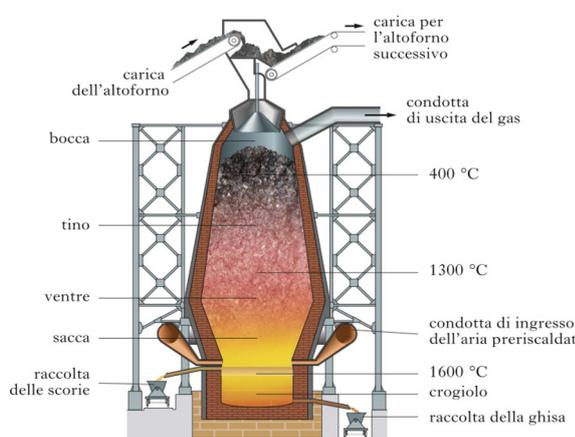
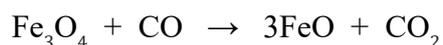
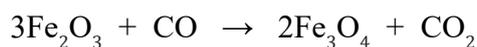


Figura 12. Schema di un altoforno

I processi chimici che portano alla separazione del ferro dai suoi minerali sono piuttosto complessi, si può dire semplicemente che si tratta di una serie di reazioni che coinvolgono prima l'ossido di carbonio (CO) e successivamente il carbonio nel sottrarre al minerale l'ossigeno liberando così il metallo. Essenzialmente si hanno le seguenti reazioni:



È l'aria calda alla base del forno che alimenta la combustione del coke e si forma una corrente ascendente costituita da aria e dai prodotti della combustione (CO, CO₂). Il forno viene caricato dall'alto alternativamente con strati di minerale mescolato a fondente e strati di carbon coke: questo ha una duplice funzione, brucia mantenendo elevata la temperatura del forno e reagisce con l'ossido di ferro liberando il ferro metallico. La temperatura dell'altoforno varia da circa 1600 °C all'altezza del crogiolo-

²⁵ Tratto da F. Olmi, *La chimica nelle cose*, PM edizioni, Varazze, 2017, pp. 199-200.

lo a circa 200-220 °C della parte alta del forno. In genere gli stabilimenti siderurgici vengono costruiti vicino al mare sia per agevolare il trasporto del minerale, del carbone e del fondente che per favorire la spedizione dei prodotti in ghisa e acciaio.

La siderurgia dell'altoforno classico a carbone ha l'esigenza di eliminare i composti inquinanti: polveri e gas. Sono ben note le tecnologie di disinquinamento, il fatto, però, è che non vengono sempre impiegate.

L'altoforno produce ghisa e non acciaio: la ghisa, infatti, contiene una forte percentuale di carbonio e per ottenere l'acciaio è necessario ridurne la sua percentuale. A seconda della percentuale residua di carbonio si hanno diversi tipi di acciai, come mostra la Tabella 4.

Tabella 4. Diverse percentuali di carbonio caratterizzano diversi tipi di acciai

	Carbonio (%)	Caratteristiche	Usi
Ghisa	3 - 6	Non fucinabile, subisce la tempra	Produzione dell'acciaio e di pezzi fusi
Ferro dolce	0,05 - 0,25	Facilmente saldabile, non subisce la tempra	Lamiere da caldaia, tubi, apparati elettrici
Acciaio dolce	0,25 - 0,40	Si salda poco facilmente, si tempra difficilmente	Alberi, assi, viti, etc.
Acciaio semiduro	0,40 - 0,60	Non si salda, si tempra bene	Perni, utensili ordinari
Acciaio duro	0,60 - 1,0	Si tempra bene	Rotaie, fili, getti, utensili come lime, scalpelli, seghe
Acciaio da utensili	1,0 - 1,5	Energeticamente temprabile	Utensili da taglio, pezzi destinati ad attriti

Per ridurre la percentuale di carbonio nella ghisa si impiega il convertitore Bessemer (Figura 13).

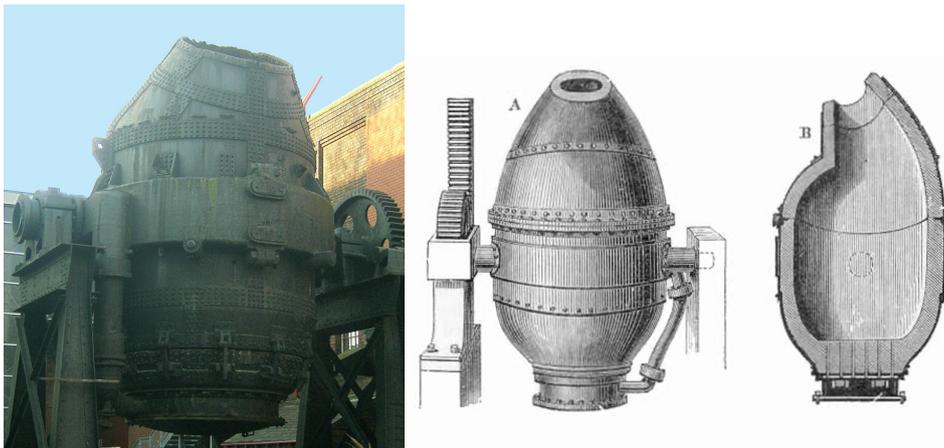


Figura 13. Convertitore Bessemer e un suo schema

Si tratta di un grosso recipiente a forma di pera rivestito internamente di materiale refrattario e capace di ruotare intorno a un asse per le operazioni di carico della ghisa e scarico dell'acciaio. Alla base del convertitore viene insufflata nella ghisa aria calda: l'ossigeno reagisce con il carbonio residuo producendo essenzialmente CO. In pochi minuti il carbonio viene eliminato completamente e, per ottenere un acciaio con una determinata percentuale di C, si interrompe il

flusso dell'aria e si aggiunge alla massa una determinata quantità di ghisa in modo che l'acciaio ottenuto abbia la voluta percentuale di carbonio. Oggi si impiegano convertitori tecnologicamente più avanzati (soprattutto di tipo Linz-Donawitz), più grossi del convertitore Bessemer, in cui viene insufflato dall'alto ossigeno, anziché aria, consentendo di ridurre drasticamente il tempo necessario per effettuare la conversione.

6. Rame

Non c'è dubbio che il rame occupi un posto importante tra i protagonisti del mondo materiale: da esso dipende la produzione di energia elettrica e la possibilità di avere luce nelle nostre case. Vediamo bene.

Dice Ed Conway:²⁶ "A rendere l'elettricità la cosa migliore sulla Terra fu la capacità di incidere rapidamente su ogni aspetto della vita quotidiana" e continua "Il rame è il substrato invisibile che sostiene il mondo moderno così come lo conosciamo. Se non ci fosse resteremmo letteralmente al buio. Se l'acciaio è lo scheletro del nostro mondo e il cemento ne è la carne, il rame è il sistema nervoso della civiltà, il sistema di cavi e collegamenti invisibili senza i quali nulla potrebbe funzionare ... I generatori e i trasformatori dei nostri sistemi elettrici dovrebbero essere considerati tra le invenzioni più importanti della storia". Più avanti aggiunge "l'elettricità, a differenza di altre fonti di energia, è silenziosa e sostanzialmente invisibile, senza il rame non potremmo né produrla, né distribuirla."²⁷

6.1 Caratteristiche, minerali e miniere più importanti

Il rame ha colore rossastro, lucentezza metallica e caratteristiche di duttilità, malleabilità e buona conducibilità sia termica che elettrica (è secondo solo all'argento). È dunque l'elemento più utilizzato come conduttore elettrico e trova applicazione in innumerevoli oggetti di uso comune.²⁸ I principali minerali di rame sono quelli solforati: calcopirite (CuFeS_2) e bornite (Cu_5FeS_4) che costituiscono circa l'80% dei depositi di rame presenti nella crosta terrestre. I minerali carbonati (azzurrite e malachite) e gli ossidi (cuprite) hanno un impiego molto limitato, perché contengono un basso contenuto di rame. Il rame può esistere anche allo stato di metallo, ma non è comune.

I Paesi maggiori produttori di rame nel 2024 sono il Cile (con 5,3 milioni di tonn/anno) e il Perù (con 2,7 milioni tonn/anno), seguono la Repubblica Democratica del Congo (2,5 milioni tonn/anno), la Cina (1,7 tonn/anno) e gli Stati Uniti (1,1 milioni tonn/anno). La più grande miniera di rame al mondo è la cilena Escondida con una produzione di un milione di tonn/anno.

La metallurgia del rame è assai lunga e complessa e, se vogliamo rame purissimo adatto al trasporto della corrente elettrica (cavi e fili elettrici), si deve fare al termine la raffinazione elettrolitica.²⁹

Il rame meno puro di quello usato per la conduzione elettrica viene impiegato in lastre e tubi soprattutto nell'edilizia.

6.2 Riciclo

Anche per il rame si pone il problema del riciclo per garantire la continuità della sua disponibilità, tuttavia questo è inferiore al riciclo di altri metalli soprattutto perché è "bloccato" molto a lungo nei dispositivi in cui viene impiegato (il riciclo è intorno al 40%). Deve essere pertanto particolarmente regolato il suo impiego.

²⁶ Vedi pp. 234-235 del libro di Ed Conway riportato nella nota 1.

²⁷ Oggi per la corrente di alta tensione vengono impiegati anche cavi di alluminio per la loro leggerezza e buona conduttività elettrica (anche se inferiore a quella del rame).

²⁸ Per esempio, in un'automobile è presente in media 1 chilometro di cavi; questi portano l'elettricità a luci, finestrini, portiere, etc.

²⁹ Le fasi della metallurgia del rame sono: frammentazione del minerale, flottazione per arricchire la percentuale del rame, concentrazione, arrostimento e fusione, conversione di CuS e Cu_2S in rame metallico; si ottiene così rame per tubazioni, grondaie, laminati. Se occorre rame per conduzione elettrica si effettua l'elettrolisi.

Scheda 3

Produzione e trasporto della corrente elettrica

Si produce corrente elettrica attraverso un alternatore generalmente sincrono. Il funzionamento di un alternatore sincrono³⁰ è fondato sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica in base al quale si ha che, in una spira conduttrice concatenata con un flusso magnetico variabile, si genera una forza elettromotrice indotta (f.e.m.). Un generatore o alternatore sincrono (Figura 14, sinistra) è costituito da una parte rotante o rotore detta induttore, che produce il campo magnetico per mezzo di masse magnetiche (elettromagnetiche) dette poli, eccitate da corrente continua, e da una parte fissa o statore, detta indotto, che contiene gli avvolgimenti conduttori nei quali si genera la f.e.m. indotta. Vengono prodotti anche piccoli generatori portatili per produrre corrente in posti mobili (ad esempio, per i gli ambulanti che si spostano magari giornalmente). Gli avvolgimenti (spire) di fili di rame sono anche essenziali in un'altra apparecchiatura di grande diffusione, il trasformatore (Figura 14, destra). Si tratta di un'apparecchiatura elettrostatica che funziona in corrente alternata basata sul principio dell'induzione elettromagnetica: due avvolgimenti (spire) di filo di rame di diversa lunghezza trasformano, ad esempio, la tensione domestica (220 volt) in tensione di diverso voltaggio (ad esempio, 12 volt). Sono impiegati negli apparecchi radio e per i televisori; nei televisori a schermo piatto il trasformatore è solidale al cavo di alimentazione.

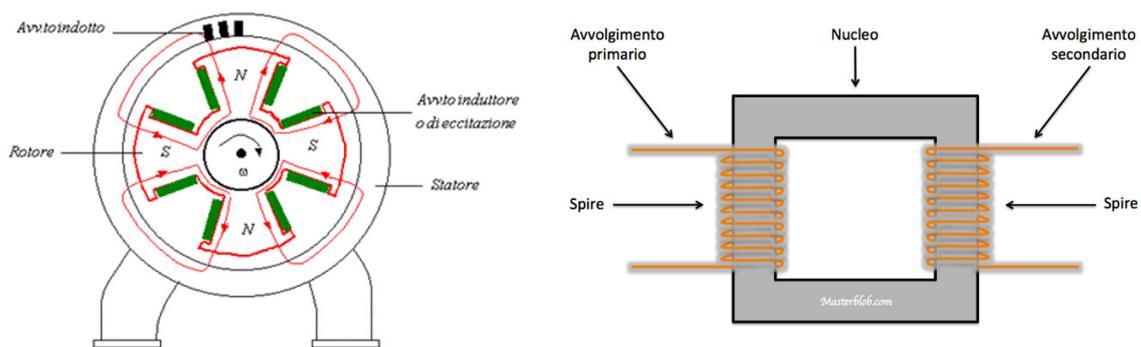


Figura 14. Schema di un alternatore (sinistra) e di un trasformatore (destra)

La corrente elettrica prodotta dalle centrali viene trasportata con grossi tralicci anche a grandi distanze e viene raccolta da una centrale di smistamento dove grossi trasformatori industriali (Figura 15) la convertono a 220 volt per connetterla ai vari utilizzatori finali (abitazioni, centri commerciali e piccole industrie).



Figura 15. I trasformatori industriali

³⁰ Sincrono: alternatore in cui la frequenza della tensione generata è legata alla velocità della rotazione.

Il trasporto di energia elettrica prodotta dal fornitore (ad esempio, Enel o Hera) avviene utilizzando la corrente alternata con frequenza di 50Hz. Questa rete è composta da linee che vengono classificate (in campo elettrotecnico) a seconda della tensione di esercizio in:

- Altissima tensione (AAT), superiore ai 150 kV
- Alta tensione (AT), compresa fra i 30 kV e i 150 kV
- Media tensione (MT), compresa fra 1 kV e 29 kV
- Bassa tensione (BT), inferiore a 1 kV (voltaggio 50-1000 Volt)

Per quanto riguarda la trasmissione di energia elettrica la natura dei cavi dipende dalle caratteristiche del voltaggio operativo. In particolare, per l'AAT e l'AT i cavi elettrici impiegati sono ormai di alluminio (cavi nudi) rinforzati al centro da un'anima di filo d'acciaio (per garantire la resistenza alla trazione); ciò è dovuto al fatto che, nonostante l'alluminio abbia una conducibilità più bassa del rame,³¹ quando si tratta di impiegare altissima o alta tensione (e bassa corrente), la dispersione di calore per effetto Joule è bassa e prevale la convenienza economica. Per i cavi di media tensione (cavi di distribuzione) si impiega sia l'alluminio che il rame. Solo per l'ultimo chilometro, fino al raggiungimento delle utenze finali, si impiegano cavi di rame isolati con PVC o gomma sintetica (EPR). Infine, i cavi elettrici degli impianti interni sono in fili di rame isolati.

³¹ La conducibilità di alcuni metalli (espressa in Siemens/metro, S/m) è la seguente: argento, 61×10^6 S/m; rame, 58×10^6 S/m; oro, 45×10^6 S/m; alluminio, 37×10^6 S/m; ferro, 10×10^6 S/m

La teoria molecolare di Ampère: una visione di primo Ottocento carica di stimoli di riflessione

Vincenzo Villani

*Dipartimento di Scienze di Base e Applicate dell'Università della Basilicata,
Campus Macchia Romana, Potenza*
e-mail: vincenzo.villani@unibas.it

Abstract. André-Marie Ampère (1775-1836) was a universal genius, ranging from mathematics, to physics, to chemistry. Encouraged by the chemist Berthollet, in 1814 he published an elaborate theory of molecular structure that took into account Gay-Lussac's law of combination volumes "To provide the means of predicting a priori the fixed ratios according to which bodies combine, bringing their different combinations back to principles that would be the expression of a law of nature". In this work he enunciated, independently of Avogadro (1811), the law of direct proportionality between the volume of a gas and the number of particles contained therein, independent of their nature.

Based on the atomistic vision inaugurated by Newton (1704) and the theory of short-range molecular forces developed by Laplace (1806), Ampère developed a complex geometric-molecular theory that, starting from only two fundamental forms, the tetrahedron and the octahedron, constructed stable molecular structures in accordance with the law of combination volumes of reagents and products.

Ampère's theory was not welcomed by the chemists of the time, however it spread and introduced for the first time the stereochemical vision of molecules and reactions that was finally affirmed in the hypothesis of tetrahedral carbon by van't Hoff and Le Bel (1874).

These anticipations, eclipsed by the nineteenth-century positivism that rejected the existence of atoms and molecules, later returned in various forms and still retain an educational and epistemological value today.

Keywords: André-Marie Ampère; storia della chimica; didattica della chimica; epistemologia della scienza; teoria della struttura molecolare

1. Introduzione

Il Premio Nobel della Chimica 2024 è stato assegnato a Baker, Hassabis e Jumper per l'importante contributo dato alla risoluzione teorica del *Protein folding*. Questo problema è relativo alla previsione della struttura biologicamente attiva delle proteine a partire dalla conoscenza della sola sequenza di amminoacidi: si tratta della determinazione della struttura molecolare più stabile dal punto di vista termodinamico (Figura 1). In generale, la previsione di qualsiasi struttura molecolare all'equilibrio (anche della semplice molecola d'acqua) rappresenta un problema di ottimizzazione di geometria in cui è resa minima l'energia d'interazione del sistema.

La teoria di Ampère del 1814 considera le molecole proprio sotto questo punto di vista: nella sua visione, la struttura molecolare è il risultato dell'equilibrio di forze di attrazione e repulsione tra gli atomi costituenti: all'equilibrio si annullano e il problema è risolto mediante una complessa costruzione geometrica.

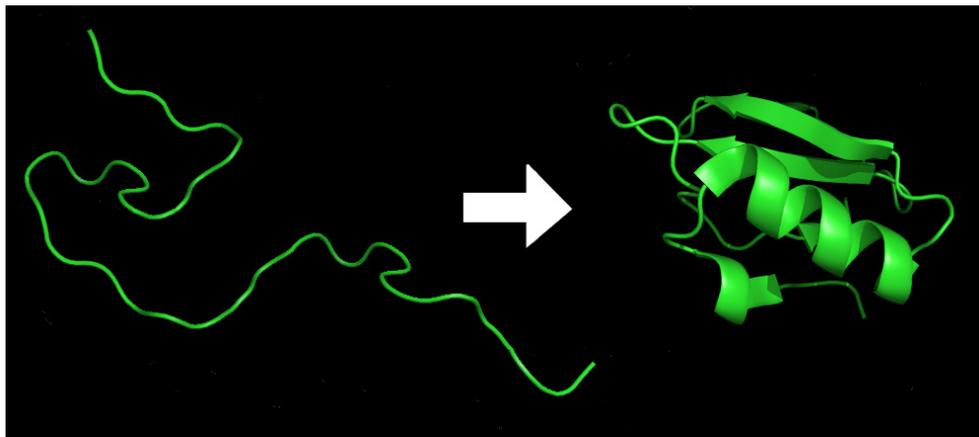


Figura 1. Rappresentazione del *protein folding* dell'inibitore della chimotripsina

2. Biografia di Ampère

André-Marie Ampère nasce nei pressi di Lione, in un'agiata e colta famiglia borghese: il padre, ricco mercante di seta, è uomo di vedute illuministe e si dedica all'educazione del figlio secondo le idee pedagogiche di Rousseau: osservazione della natura, libera sperimentazione, libere letture, educazione religiosa e morale, sono alla base della formazione del giovane.

La sua preparazione informale, lo rende sempre ben disposto a nuove ipotesi, anche le più azzardate. Questa tendenza a muoversi fuori dalla scienza accademica è alla base della *fantasia scientifica*: la grande immaginazione costituisce il tratto peculiare del suo carattere che lo spinge a formulare teorie innovative anche in chimica.

Nel 1802 pubblica *Considérations sur la théorie mathématique du jeu*, in cui l'analisi delle probabilità dimostra che il giocatore d'azzardo è destinato alla rovina. Il saggio lo rende celebre presso cattedratici e accademici. Nel 1804 fonda il cenacolo culturale la *Société chrétienne* e studia il *Traité élémentaire de chimie* (1789) di Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794). Nel 1807 diviene professore di Analisi all'Ecole Polytechnique e nel 1809 è professore di Meccanica. Nel 1814 diventa membro dell'*Académie des Sciences* nella sezione di Geometria: la sua teoria molecolare sarà giusto un complesso lavoro di geometria.

Nella lettera a Jacques Roux-Bordier (11 marzo 1814), Ampère illustra la genesi e le speranze riposte nella nuova teoria:

Le mie conversazioni con il sig. Davy¹ avevano suscitato in me un grandissimo interesse per la chimica. Per circa due mesi mi sono occupato di un lavoro il cui risultato mi sembrava dover aprire in questa scienza un nuovo corso e dare il mezzo di prevedere a priori i rapporti fissi secondo i quali i corpi si combinano, riportando le loro diverse combinazioni a principi che sarebbero l'espressione di una legge della natura, in realtà, la teoria delle combinazioni chimiche è chiara e incontestabile e diventerà tanto comune nelle scienze fisiche quanto le altre teorie generalmente ammesse.

La stesura della *Théorie* è sollecitata dal chimico Claude Louis Berthollet (1748-1822) e pubblicata nel 1814 negli *Annales de Chimie: Lettre de M. Ampère à M. le comte Berthollet, sur la détermination des proportions dans lesquelles les corps se combinent d'après le nombre et la disposition respective des molécules dont leurs particules intégrantes sont composées*.

Il conte Berthollet è fortemente interessato a questioni di teoria della chimica: è del 1803 il suo *Essai de statique chimique*, il cui obiettivo è quello di stabilire le leggi generali delle reazioni chimiche.

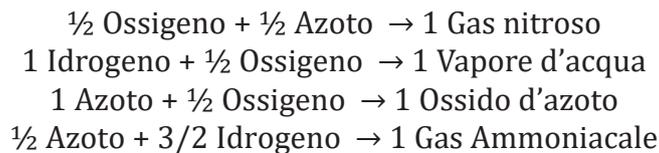
¹ Sir Humphrey Davy (1778-1829), illustre chimico e fisico inglese.

3. La théorie mathématique de la combinaison chimique

La teoria di Ampère parte dalla *Legge dei volumi di combinazione* (1808) di Gay-Lussac (1778-1850):

Signor conte, voi sapete che da tempo l'importante scoperta di Gay-Lussac sulle proporzioni semplici, che si osservano tra i volumi di un gas prodotto e quelli dei gas reagenti, mi ha fatto sorgere l'idea di una teoria che spiegasse non soltanto i fatti scoperti da quell'insigne chimico e i fatti analoghi osservati in seguito, ma che potesse anche applicarsi alla determinazione delle proporzioni di un gran numero di altri prodotti che, nelle condizioni ordinarie, non sono allo stato gassoso.

Quindi, esemplifica la legge con alcune importanti reazioni allo stato gassoso, che scriviamo in termini di volumi:



Sulla base della teoria della capillarità di Laplace (1806) e della teoria della rifrazione della luce nei corpi trasparenti di Biot (1814), Ampère assume che le *molécules* (ovvero, gli *atomi*, in senso moderno) possono essere considerate puntiformi e sorgenti di forze attrattive gravitazionali e forze repulsive dovute alla pressione del calorico:

Alcune conseguenze dedotte dalla teoria dell'attrazione universale, considerata come la causa della coesione, e la facilità con la quale la luce attraversa i corpi trasparenti hanno condotto i fisici a supporre che le ultime molecole dei corpi siano tenute, dalle forze attrattive e repulsive che sono loro proprie, a distanze da considerarsi infinitamente grandi rispetto alle dimensioni delle molecole stesse.

Essendo gli atomi privi di struttura, la spiegazione dei fenomeni chimici è da ricercare nella struttura delle particelle, ovvero nella configurazione geometrica stabile che gli atomi assumono nella molecola:

Le loro forme, che del resto nessuna osservazione diretta è in grado di farci conoscere, non hanno più alcuna influenza sui fenomeni che presentano i corpi che ne sono composti e bisogna cercare la spiegazione di questi fenomeni nel modo in cui le molecole si dispongono le une rispetto alle altre per formare ciò che io chiamo una "particella".

Ampère chiama *particules intégrantés* quelle che noi chiamiamo *molecole*, e *molécules* gli *atomi*, che definisce come: *les dernières portions de matières*. Quindi, postula che una molecola sia un sistema tridimensionale costituito da almeno quattro atomi:

Si deve considerare una particella come la riunione di un numero determinato di molecole in una posizione determinata, comprendente tra loro [separate da] uno spazio incomparabilmente maggiore del volume delle molecole. Affinché questo spazio abbia tre dimensioni tra loro paragonabili, è necessario che una particella riunisca almeno quattro molecole.

In questo modo, abbiamo: O_4 , N_4 e H_4 . Riducendo gli atomi a punti materiali e considerando i piani che li contengono, definisce la *forme représentative de la particule*, come il corrispondente poliedro regolare con gli atomi costituenti ai vertici:

Per esprimere la posizione rispettiva delle molecole in una particella, bisogna immaginare nei centri di gravità delle molecole, centri ai quali esse si possono supporre ridotte, piani situati in modo da lasciare da una stessa parte tutte le molecole che si trovano fuori da ciascun piano. Supponendo che nessuna molecola sia contenuta nello spazio compreso tra questi piani, tale spazio sarà un poliedro, di cui ogni molecola occuperà un vertice e basterà indicare questo poliedro per esprimere la posizione rispettiva delle molecole che compongono una particella. A questo poliedro darò il nome di "Forma rappresentativa della particella".

Ampère considera un gas a pressione e temperatura costante: per esso valgono le leggi di Boyle-Mariotte (1662) ($P \propto 1/V$ per $T = T_0$) e Charles-Gay-Lussac (1802) ($V \propto T$ per $P = P_0$). Assumendo che le particelle del gas siano a una distanza tale che le forze di interazione siano trascurabili, il volume risulta indipendente dalla natura delle particelle e proporzionale solo al loro numero: $V \propto N$ per $T = T_0$ e $P = P_0$ (legge di Ampère-Avogadro).

A tale scopo sono partito dalla supposizione che, nel caso in cui i corpi passino allo stato gassoso, le loro particelle siano separate e tenute lontane le une dalle altre dalla forza di espansione del calore a distanze molto maggiori di quelle a cui le forze di affinità e coesione hanno un valore apprezzabile, in tal modo queste distanze dipendono soltanto dalla temperatura e dalla pressione del gas e, a parità di pressione e temperatura, le particelle di tutti i gas, semplici o composte, saranno situate alla stessa distanza le une dalle altre. Allora, il numero delle particelle è proporzionale al volume del gas.

Si tratta della *legge dei volumi molari*, che Avogadro aveva già enunciata nel 1811.

A questo punto Ampère esplicita il Principio epistemologico alla base della sua Ricerca: dai dati sperimentali si ricava una legge empirica (1), dai principi primi un'ipotesi interpretativa matematica (2); l'ipotesi, se avvalorata (in senso probabilistico) dal successo esplicativo e predittivo di fatti sperimentali, diventa una teoria dimostrata (3).

Quali che siano le ragioni teoriche che mi sembrano appoggiare questa spiegazione, non la si può considerare altro che un'ipotesi; ma paragoniamo i risultati che ne sono una conseguenza necessaria con i fenomeni o le proprietà che osserviamo: se essa si accorda con tutti i risultati noti dall'esperienza e se ne deducono conseguenze confermate da successive esperienze, essa acquisterà un grado di probabilità che si avvicinerà a quanto in fisica si chiama 'certezza'. Ammettendola, basterà conoscere i volumi allo stato gassoso di un corpo composto e dei suoi componenti per sapere quante particelle o porzioni di particelle dei due componenti sono contenute in una particella del corpo composto.

In virtù della legge dei volumi molari, i rapporti volumetrici di reazione coincidono con i coefficienti stechiometrici e Ampère applica la legge alle reazioni gassose più semplici:

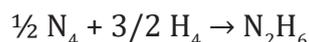
Il gas nitroso² contiene la metà del suo volume d'ossigeno e la metà d'azoto; si deduce che una particella di gas nitroso è formata dalla riunione della metà di una particella di ossigeno e dalla metà di una particella di azoto.

Abbiamo



Essendo un volume di gas ammoniacale³ composto da 1/2 volume d'azoto e da 3/2 volumi di idrogeno, una particella di questo gas conterrà 1/2 particella d'azoto e 3/2 particelle d'idrogeno.

Abbiamo



Il vapore d'acqua contiene, come dimostrato da Gay-Lussac, un volume uguale d'idrogeno e la metà del suo volume d'ossigeno, ogni sua molecola sarà composta da una particella intera di idrogeno e metà particella d'ossigeno.

Quindi, abbiamo anche



² Ossido nitrico, NO.

³ Ammoniaca, NH₃.



Ampère commette un errore sistematico che finisce per inficiare l'intera teoria: il postulato della "Molecola minima tetratomica". In questo modo, il numero degli atomi nelle molecole d'idrogeno, ossigeno e azoto risulta raddoppiato e l'errore si propaga nei composti derivati.

Il postulato della molecola minima tetratomica è una conseguenza necessaria dell'assunzione degli atomi newtoniani: punti materiali privi di estensione. Inoltre, le molecole sono per Ampère entità geometriche statiche, prive di vibrazioni e moti rigidi: solo successivamente nel lavoro del 1835, introduce il concetto di vibrazioni e rotazioni molecolari. Quindi, affinché una molecola statica, costituita da atomi puntiformi sia tridimensionale, è necessario che sia almeno tetratomica. Pertanto, l'ipotesi è errata, ma coerente con la visione molecolare del tempo.

4. La determinazione delle strutture molecolari

La Legge dei volumi molari applicata alla Legge dei volumi dei gas di Gay-Lussac diventa un metodo efficiente per determinare le formule molecolari. Quindi, a partire dalle formule molecolari, Ampère sviluppa la Teoria delle strutture molecolari.

Se consideriamo le forme primitive dei cristalli stabilite dai mineralogisti come le forme rappresentative delle particelle più semplici, ammettendo nelle particelle tante molecole quanti vertici hanno le forme corrispondenti, troveremo che esse sono in numero di 5: tetraedro, ottaedro, parallelepipedo, prisma esagonale, dodecaedro romboidale. Le particelle corrispondenti alle forme rappresentative sono composte da 4, 6, 8, 12 e 14 molecole.

Ampère assume i cinque poliedri delle *molécules intégrantés* di Renè Just Haüy⁴ come le più semplici *formes représentatives* di strutture molecolari (Figura 2).

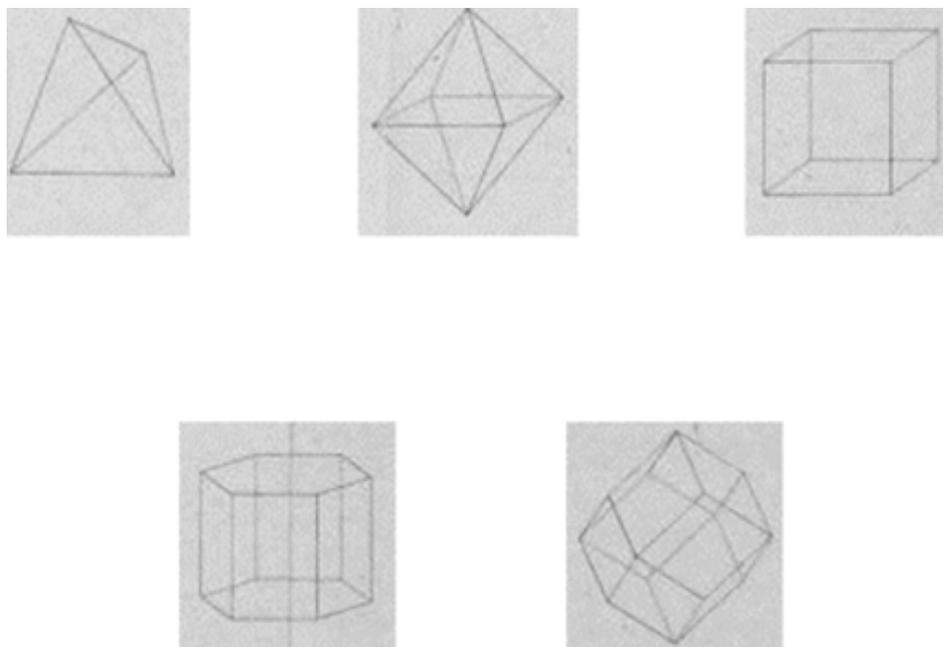


Figura 2. Le più semplici *formes représentatives des particules*, così come sono rappresentate nella *Lettre*

Allora, le molecole più semplici sono composte da 4, 6, 8, 12 e 14 atomi: i primi tre casi corrispondono ai gas nitroso (N_2O_2), acqua (H_4O_2) e ammoniaca (N_2H_6). Tuttavia, i poliedri fondamentali sono ridotti a due: il tetraedro e l'ottaedro (Figure 3 e 4).

⁴ Abate e mineralogista francese (1743-1822).

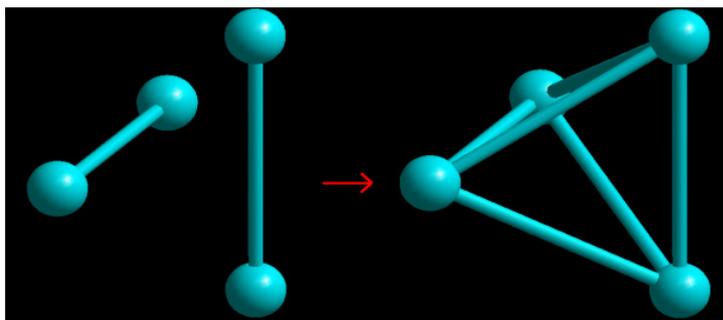


Figura 3. La combinazione di due gruppi bi-atomici danno luogo alla molecola minima tetraedrica

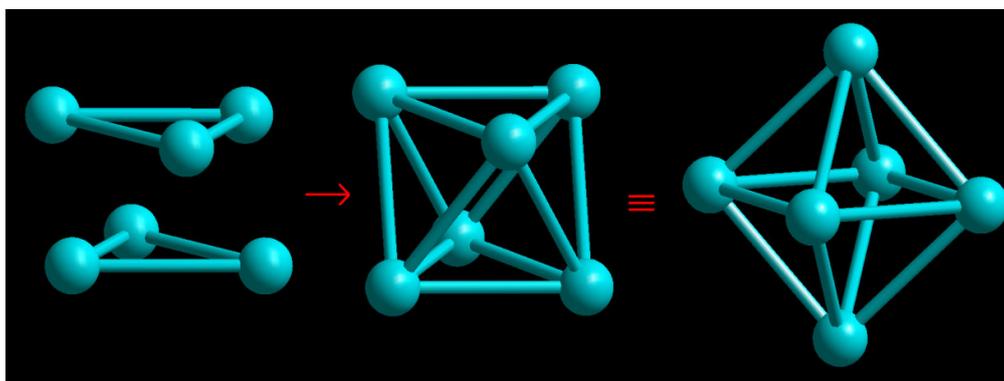


Figura 4. La combinazione di due gruppi tri-atomici danno luogo alla molecola ottaedrica esa-atomica

A partire da questi, mediante combinazioni successive, costruisce le strutture molecolari dei composti noti, in accordo con le formule molecolari ricavate dai rapporti stechiometrici di Gay-Lussac:

Per farci un'idea più chiara della posizione rispettiva di due molecole, supponiamole unite da un segmento di retta; se vi si aggiungono altre due molecole unite allo stesso modo, dapprima nello stesso piano in maniera che i due segmenti si taglino in due parti uguali, poi allontanandoli tenendoli sempre in posizione parallela a quella che avevano in quel piano, si otterrà un tetraedro, che sarà regolare solamente nei casi in cui i due segmenti siano uguali e perpendicolari tra loro e siano stati allontanati l'uno dall'altro a una distanza che stia alla loro lunghezza come $1:\sqrt{2}$.

Immaginiamo ora tre molecole congiunte da segmenti formanti un triangolo qualsiasi: poniamo nello stesso piano un altro triangolo uguale al primo e in posizione tale che i due triangoli abbiano i loro centri di gravità nello stesso punto e i loro lati uguali rispettivamente paralleli: allontanando questi due triangoli in modo che i tre lati di ogni triangolo rimangano sempre paralleli alla loro posizione primitiva, si otterranno sei punti situati ai vertici di un ottaedro; questo sarà regolare solo nel caso di triangoli equilateri allontanati perpendicolarmente al loro piano di una quantità che stia ai lati come $\sqrt{2}:\sqrt{3}$

Consideriamo la combinazione di due tetraedri, come nella reazione tra azoto e idrogeno ad ammoniaca, $\frac{1}{2} N_4 + 3/2 H_4 \rightarrow N_2H_6$:

Se si suppone, nel caso del tetraedro, di condurre per i due segmenti di cui abbiamo parlato, due piani paralleli tra loro [...] è possibile costruire il tetraedro simmetrico al primo: gli otto vertici dei due tetraedri, uniti in questo modo, saranno i vertici di un parallelepipedo. Il parallelepipedo diventa un cubo quando i due tetraedri sono regolari. (Figura 5)

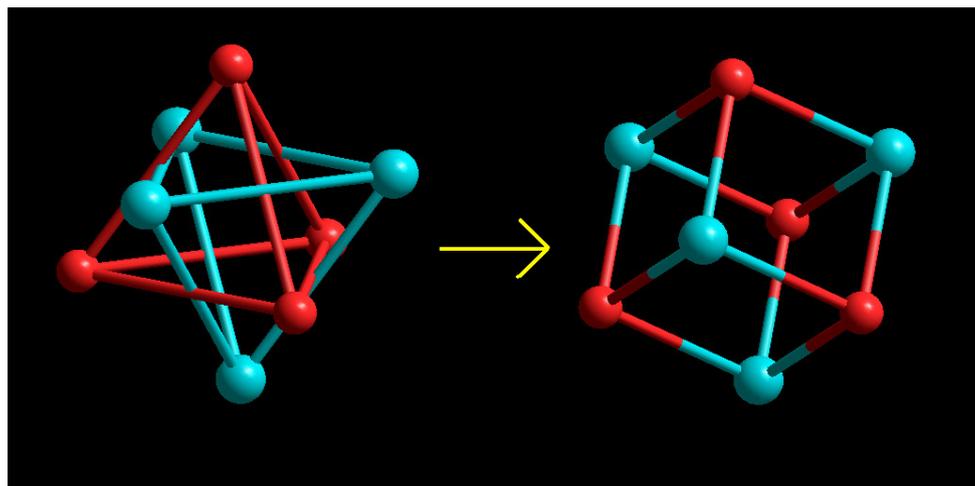


Figura 5. Due molecole tetraedriche si combinano per dare una molecola cubica

Nel caso della conversione di idrogeno e azoto in ammoniaca, la combinazione risulta più complessa: “mezzo tetraedro” d’azoto, ovvero N_2 lineare, si compone con “mezzo tetraedro” d’idrogeno, ovvero H_2 lineare, per dare il tetraedro N_2H_2 , il quale composto con un tetraedro di H_4 , darà il cubo di ammoniaca con due atomi di azoto che rispetta la stechiometria della reazione, secondo le leggi di Gay-Lussac e di Avogadro-Ampère.

Quindi, considera la combinazione tra un cubo (dato dall’involuppo di 2 tetraedri) e un ottaedro per ottenere un dodecaedro (Figura 6), come nella preparazione del muriato di ammoniaca (cloruro d’ammonio) da ammoniaca e acido muriatico (cloridrico):

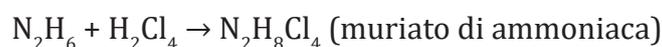


Figura 6. La molecola cubica di ammoniaca si combina con la molecola ottaedrica di acido muriatico per dare il dodecaedro rombico (con 14 vertici) della molecola di muriato d’ammoniacca (Strutture originali della *Lettre*)

Nella combinazione delle molecole, le forze attrattive gravitazionali competono con le forze repulsive del calorico. Allora, le molecole reagenti si compenetrano fino a far coincidere i centri di massa, mentre gli atomi ai vertici si sfalsano minimizzando l’energia d’interazione. A questo punto, gli spigoli dei poliedri iniziali si aprono e si formano gli spigoli del poliedro finale. In questo modo, Ampère anticipa la visione moderna della reazione chimica, come “meccanismo di reazione con rottura di legami chimici e formazione coordinata di nuovi legami” (Figura 7).

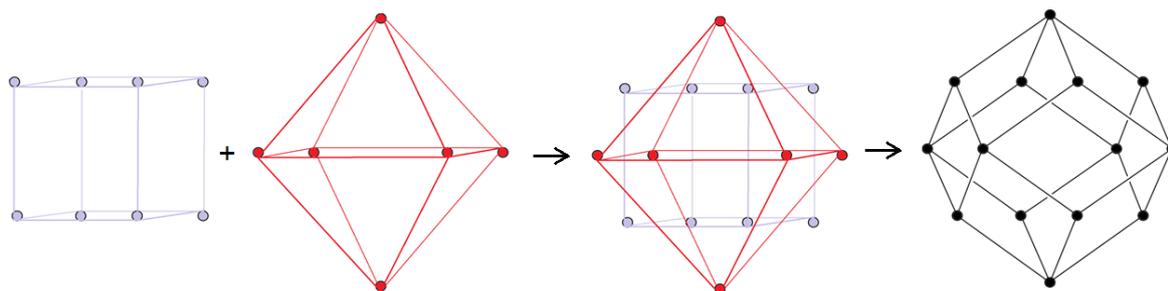


Figura 7. La conversione di ammoniaca (cubo) e acido cloridrico (ottaedro) in cloruro d'ammonio (dodecaedro) secondo la teoria della combinazione chimica di Ampère

Utilizzando il requisito della configurazione stabile, Ampère individua le possibili strutture molecolari combinando in modo sistematico le 2 forme fondamentali (tetraedro e ottaedro) in numero via via crescente. Considera la combinazione di 2 tetraedri, 3 tetraedri, ..., 8 tetraedri; 2 ottaedri, 3 ottaedri, ..., 8 ottaedri; quindi, le 64 combinazioni miste di $n = 1, \dots, 8$ tetraedri con $m = 1, \dots, 8$ ottaedri: un'impresa enorme che coinvolge l'analisi di 80 configurazioni possibili da cui seleziona le 23 *formes représentatives* simmetriche che minimizzano l'energia d'interazione.

Dal punto di vista geometrico, la combinazione delle forme rappresentative più semplici per ottenere le forme rappresentative più complesse, riguarda la costruzione dei "Poliedri composti", ovvero del poliedro formato da almeno due poliedri intersecanti, con i centri di massa coincidenti. Quindi, per ogni poliedro composto, mediante una procedura detta "Chiusura convessa" viene individuato il "Poliedro convesso minimo" di superficie minima. Si tratta, quindi, di un problema di ottimizzazione. La costruzione di Ampère soddisfa il requisito di Gay-Lussac dato che è razionale il rapporto tra il numero dei vertici dei poliedri di partenza e del poliedro composto risultante corrispondente alla struttura della molecola prodotto.

Dal punto di vista fisico, il Problema di Ampère è un problema di ricerca della "Configurazione di minima energia". Infatti, la forma rappresentativa della particella deve minimizzare la somma dell'energia gravitazionale attrattiva e repulsiva del calorico. In questo modo, la *Lettre* inaugura lo studio delle strutture molecolari mediante la ricerca di geometrie di minima energia, obiettivo tutt'oggi della massima importanza in chimica.

Il problema di Ampère si sviluppa in quello di Thomson del 1904 alla base del modello di atomo detto *Plum pudding*. In generale, il problema corrisponde alla ricerca della struttura atomica di minima energia con n elettroni che si respingono, sotto l'azione della forza di Coulomb, sulla superficie di una sfera di carica positiva (Figura 8).

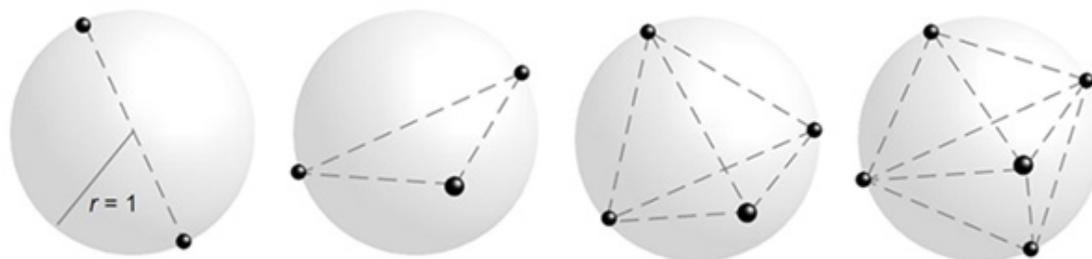


Figura 8. Le strutture risultanti nei casi più semplici del Problema di Thomson con 2, 3, 4 e 5 elettroni sulla superficie sferica di carica positiva di raggio unitario

Successivamente la teoria VSPER (*Valence Shell Electron Pair Repulsion*, (Gillespie and Nyholm, 1957) sarà un'applicazione del problema di Thompson: la struttura molecolare è ottenuta minimizzando l'interazione delle coppie elettroniche di valenza disponendole il più lontano possibile sulla superficie dell'atomo centrale. In generale, come già detto, la previsione della struttura molecolare è sempre un problema di 'Ottimizzazione della geometria mediante minimizzazione dell'energia'. Quindi, Ampère non solo ha avuto una visione stereochemica della struttura della molecola, ma è stato l'iniziatore dei metodi di ottimizzazione di geometria. Le 23 forme rappresentative delle particelle (Figure 9 e 10) riempiono d'ammirazione per la capacità di Ampère d'aver saputo elaborare con la sola forza del pensiero, una tale complessità di strutture geometriche molecolari.

A conclusione della *Lettre*, Ampère afferma con soddisfazione e orgoglio:

Con questi poliedri ho rappresentato le diverse sistemazioni di tutti i corpi.

Infine, la *Lettre* fa riferimento al tanto lavoro che ancora resta da fare in Chimica Inorganica e in Chimica Organica:

I risultati che ho indicato sono soltanto una minima parte di quelli che si possono dedurre dalla considerazione delle forme rappresentative delle particelle dei corpi, applicata alla determinazione delle proporzioni dei composti inorganici. Anche la chimica dei corpi organizzati offre numerose applicazioni di questa teoria; ma è soprattutto a tale riguardo che rimangono ancora da fare molti calcoli e molte analisi per completarla.

La geniale teoria delle combinazioni chimiche non ebbe l'accoglienza sperata: sebbene l'esistenza di atomi e molecole fosse ampiamente riconosciuta, la Chimica non era ancora pronta ad accogliere un'interpretazione molecolare fisico-matematica. Tuttavia, ebbe fondamentali conseguenze di lungo termine, contribuendo a quel processo storico che porterà alla Stereochemica prima e alla Chimica teorica poi.

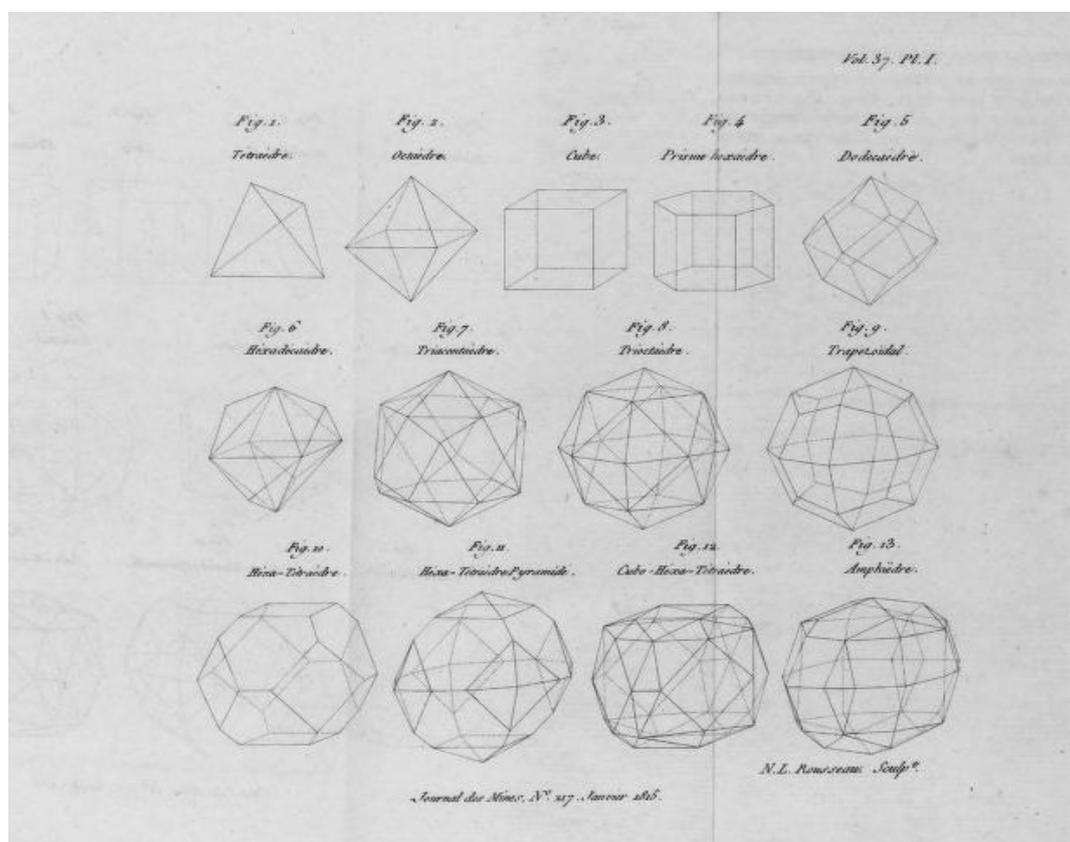


Figura 9. Alcune delle 23 forme rappresentative delle strutture molecolari proposte da Ampère

	NOMBRE des tétraèdres.	NOMBRE des octaèdres.	NOMBRE des sommets.	NOMBRE DES FACES				TOTAL des FACES.
				triangles.	Quadrila- tères.	hexagones.	octogones.	
Tétraèdre (1)	1	»	4	4	»	»	»	4
Octaèdre	»	1	6	8	»	»	»	8
Parallépipède	»	»	8	»	6	»	»	6
Prisme hexaèdre	»	2	12	»	6	2	»	8
Dodécaèdre	2	1	14	»	»	12	»	12
Hexaédraèdre	1	1	10	16	»	»	»	16
Triscontraèdre	»	2	20	24	6	»	»	30
Triocontaèdre	»	3	18	32	»	»	»	32
Trapezoidal	2	»	26	»	24	»	»	24
Tétra-tétraèdre	4	»	16	28	»	»	»	28
Penta-tétraèdre	5	»	20	12	12	»	»	24
Hexa-tétraèdre	6	»	24	»	6	8	»	14
Hexa-tétraèdre pyramidé	6	1	30	24	»	8	»	32
Cubo-hexa-tétraèdre	8	»	32	48	6	»	»	54
Amphièdre	8	1	38	24	24	»	»	48
Pentacontaèdre	6	2	36	36	12	2	»	50
Octocontaèdre	6	3	40	80	»	»	»	80
Octo-tétraèdre	8	»	32	»	6	12	»	18
Eptacontaèdre	8	»	44	64	2	4	»	70
Trioctaèdre pyramidé	8	3	50	48	24	»	»	72
Tétra-octaèdre	»	4	24	8	»	»	6	14
Penta-octaèdre	»	5	30	»	»	»	»	36
Epta-octaèdre	»	7	42	80	»	»	»	80

(1) Ces vingt-trois polyèdres sont gravés dans les planches jointes à cet extrait; je les ai aussi fait faire en relief par M. Belouf. Cet artiste, qui demeure au Muséum d'histoire naturelle, et qui exécute de cette manière à un prix très-moitié, les modèles de tous les cristaux décrits dans la minéralogie de M. Haüy, a rendu les formes de ces polyèdres avec une intelligence et une précision qui ne laissent rien à désirer.

Figura 10. La tabella, acclusa alla *Lettre*, delle 23 forme rappresentative delle particelle in cui sono specificati il numero di tetraedri e ottaedri combinati e il numero di vertici e di facce del poliedro composto

Ampère non scriverà mai il saggio esteso che ha promesso a Berthollet. Nel 1815 scrive la *Démonstration de la relation découverte par Mariotte entre les volumes des gaz et les pressions qu'ils supportent à une même température* (Ampère, 1815), in cui precorre la teoria cinetico-molecolare dei gas. Infine, nell'ultimo lavoro, *Note de M. Ampère sur la chaleur et sur la lumière, considérées comme résultant de mouvements vibratoires* (Ampère, 1835), introduce le vibrazioni molecolari tornando a citare la *Lettre* del 1814.

Quale è l'eco della *Lettre* nel 1800? Il grande chimico Jean-Baptiste Dumas (1800-1884) nelle *Leçons sur la philosophie chimique* (1836) scrive:

L'hypothèse d'Ampère, aussi ingénieuse soit-elle, est absolument inacceptable.

Sebbene sia una dura stroncatura, rappresenta la testimonianza che l'eco della *Lettre* fosse ancora vivo. Al contrario, lo studente di Dumas, Auguste Laurent (1807-1853), nella tesi di laurea del 1837 e nei successivi lavori fino al 1842, riprende la visione stereochimica di Ampère. Trattando la reattività delle molecole organiche in reazioni di addizione e sostituzione, egli rappresenta la struttura molecolare del naftalene come un prisma esagonale $C_{12}H_{12}$ (Figura 11); inoltre, nelle reazioni di sostituzione, gli atomi di cloro o bromo sostituiscono quelli d'idrogeno, $C_{12}Br_{12}$, $C_{12}Cl_{12}$, lasciando la struttura prismatica invariata, (Figura 11), e nell'addizione di acqua, acido solforico, acido cloridrico, le molecole si aggiungono sulle basi esagonali formando delle piramidi (Figura 11).

Oramai la rivoluzione scientifica è avviata e, sebbene in modo controverso, la visione stereochimica di Haüy, Ampère, Laurent si diffonde arrivando alle forme enantiomeriche dell'acido tartarico di Pasteur (1847), alla concezione dell'atomo tetraivalente di Kekulé (1859), del carbonio tetraedrico di Paternò (1871) e di van't Hoff e Le Bel (1874).

Quella di Ampère è una teoria poco nota, sbagliata nel dettaglio, ma corretta nello spirito, eclissata nell'Ottocento dalla visione positivista della realtà che rifiuta l'esistenza di atomi e molecole. Tuttavia, nonostante tutto, ebbe importanti conseguenze e tutt'oggi conserva un valore didattico, storico ed epistemologico, testimone di come il progresso scientifico avanzi in modo non lineare, non solo grazie ai successi, ma anche alla rilettura critica degli errori.

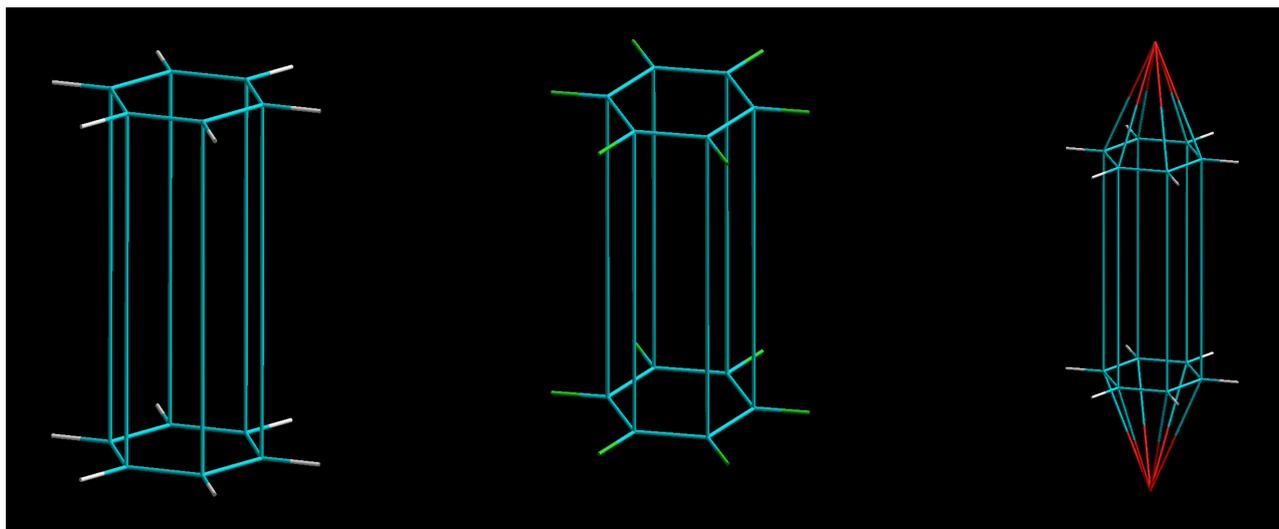


Figura 11. Le strutture stereochimiche del naftalene e suoi derivati di Auguste Laurent, rielaborate in *computer graphics* (la lunghezza dei legami chimici è arbitraria): il naftalene $C_{12}H_{12}$, $C_{12}Br_{12}$ o $C_{12}Cl_{12}$ e $C_{12}H_{12}$ + acqua, o acido solforico, o acido cloridrico, rispettivamente da sinistra a destra

Bibliografia di riferimento

- A.-M. Ampère, *Opere*, a cura di Mario Bertolini, *Classici della Scienza*, UTET, 1969.
- H. S. Coxeter, *Regular Polytopes*, Third ed., Dover Publications, 1973.
- R. J. Gillespie, R. S. Nyholm, Inorganic stereochemistry, *Quart. Rev. Chem. Soc.*, 1957, **11**, 339.
- P.-S. Laplace, *Opere*, a cura di Orietta Pesenti Cambursano, *Classici della Scienza*, UTET, 1967.
- M. Scheidecker-Chevallier, R. Locqueneux, La théorie mathématique de la combinaison chimique d'André-Marie Ampère, *Revue d'histoire des sciences*, 1994, **47**, 309-352.
- V. Villani, La geniale teoria delle combinazioni chimiche di André-Marie Ampère, *Rendiconti Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Memorie di Scienze Fisiche e Naturali*, 137°, 2019, serie V, vol. XLIII, parte II, tomo II, pp. 197-213.
- V. Villani, Molecole e interazioni molecolari nella teoria della capillarità di Laplace, *Rendiconti Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL, Memorie di Scienze Fisiche e Naturali*, 140°, 2022, Vol. III, Parte III, Tomo 1, pp. 113-119.
- J. Wisniak, André-Marie Ampère. The chemical side, *Educación Química*, 2004, **15**, 166-176.
- J. Wisniak, Auguste Laurent. Radical and Radicals, *Educación Química*, 2009, **20**, 166-176.

ChemEscape: studenti coinvolti nella chimica

Monja Schilling

Team Science & Education of the German Young Chemists Network, German Chemical Society
e-mail: m.schilling@jcf.io

Giulia Quaglia (traduzione a cura di)

Nano4Light Lab del Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie dell'Università di Perugia
e-mail: giulia.quaglia@unipg.it

Qualche volta pensi alle tue lezioni di chimica? Ti è stato permesso di fare esperimenti da solo? È stata una scienza meno applicativa di quello che desideravi? Molti membri del team *Science & Education* di JCF hanno condiviso questa esperienza e hanno deciso di sviluppare un'*escape room* per gli studenti, a partire dall'età di 15 anni, con lo scopo di interessarli alla scienza, tecnologia, ingegneria e matematica (STEM). L'*escape room* è diventata molto popolare negli ultimi anni e sono disponibili per diverse materie e argomenti. Ciononostante, un kit versatile per la chimica nella scuola superiore non è ancora disponibile. La nostra *ChemEscape* colma questa lacuna. Gli esperimenti dimostrano la diversità del mondo chimico. Gli insegnanti non hanno bisogno di materiale aggiuntivo e posso inserire il gioco in una lezione di novanta minuti. Tutte le istruzioni e il materiale sono disponibili sul nostro sito interattivo in diverse lingue, incluso l'italiano. Con l'aiuto di *ChemEscape*, noi vorremmo rendere più entusiasti gli studenti delle scuole superiori sullo studio della chimica e delle altre materie STEM, considerando che il numero degli studenti iscritti al primo anno in materie collegate con la chimica è diminuito durante gli ultimi anni (*Nachr. Chem.*, 2022, 70(7/8), 8). Quindi, il team di *Science & Education* di JCF ha avuto l'idea di sviluppare un *escape room* di chimica non solo per introdurre gli studenti in questo modo, ma anche per supportarli e ispirarli nella scelta del percorso di studio e di carriera all'interno delle scienze naturali in generale e della chimica in particolare. La possibilità di svolgere esperimenti in piccoli gruppi indipendenti e successivamente risolvere puzzles permette agli studenti delle scuole superiori di conoscere l'ambiente del laboratorio. In più, viene mostrata la rilevanza del corso di laboratorio durante il percorso di studio a indirizzo chimico, includendo anche le sfide che comporta.

Diversi membri del team di *Science & Education* di JCF hanno sviluppato gli esperimenti assicurandosi che possano essere attuati in ambienti scolastici. Allo stesso tempo, gli esperimenti hanno un collegamento con il proprio lavoro in laboratorio, riflettendo così le differenze nei vari ambiti della chimica. Tutti gli esperimenti sono stati inseriti in una storia per creare interesse e costruire fermento fin dall'inizio.

Il fatto di poter riutilizzare l'*escape room* in qualsiasi luogo, permette agli studenti delle scuole superiori di svolgere gli esperimenti da soli durante una regolare lezione. Allo stesso tempo, gli studenti possono applicarsi e approfondire le loro conoscenze in ambito chimico divertendosi, mentre sperimentano in modo indipendente. Se richiesto, l'insegnante può adattare il contenuto di *ChemEscape* alle necessità del gruppo classe, ad esempio permettendo agli studenti di ricercare e presentare argomenti scientifici affrontati tramite il gioco. Altrimenti, l'insegnante può usare solo parte del materiale e degli esperimenti.

Per minimizzare il tempo di preparazione per il docente, il kit con il materiale riutilizzabile e necessario per sei diversi esperimenti (Figura 1, sinistra), è inviato alla scuola per posta (Figura 1, destra). Solo i materiali chimici consumabili devono essere forniti dalla scuola, dal momento che il trasporto di reagenti chimici richiede diverse misure di sicurezza, che non possono essere soddisfatte dal team di volontari. Prima di iniziare il gioco, gli insegnanti devono preparare soluzioni diluite di acidi, basi e altri sali metallici, che sono comunemente disponibili nelle scuole. Anche le istruzioni per questo step sono incluse nel kit.



Figura 1. Il kit *ChemEscape* (sinistra) e i kit pronti per la spedizione (destra)

Le istruzioni degli esperimenti e i testi informativi per studenti e insegnanti sono liberamente accessibili nel nostro sito web. Inoltre, soluzioni e suggerimenti per gli esperimenti e informazioni aggiuntive riguardo i concetti scientifici sono disponibili sempre sul nostro sito web. Ciononostante, per evitare l'accesso a studenti curiosi, questi documenti sono protetti da password (inviare un'e-mail a chemescape@jcf.io per ricevere gratuitamente la password). Tutte le istruzioni e i testi possono anche essere scaricati e stampati per assicurarsi che ci si possa cimentare con il gioco anche in assenza di connessione internet. Tutti i puzzles possono essere risolti indipendentemente e richiedono lavoro pratico in laboratorio. Per completare il gioco *ChemEscape*, gli studenti devono risolvere sei puzzles che sono inseriti all'interno di una storia di fondo. Per ogni esperimento si determina una parte del codice soluzione che, alla fine, viene inserito nel sito web per aprire una serratura virtuale.

Agli insegnanti e agli studenti che hanno giocato con *ChemEscape* in Germania, è stato richiesto di rispondere a un sondaggio dopo la loro partecipazione al gioco. Al momento, il team di *Science & Education* di JCF sta lavorando a una pubblicazione dettagliata dei risultati del sondaggio. Qui, vogliamo condividere i maggiori spunti di riflessione. La maggior parte degli studenti è stata in grado di partecipare attivamente all'*escape room* (Figura 2) e ha riscontrato un miglioramento nelle proprie conoscenze preliminari.

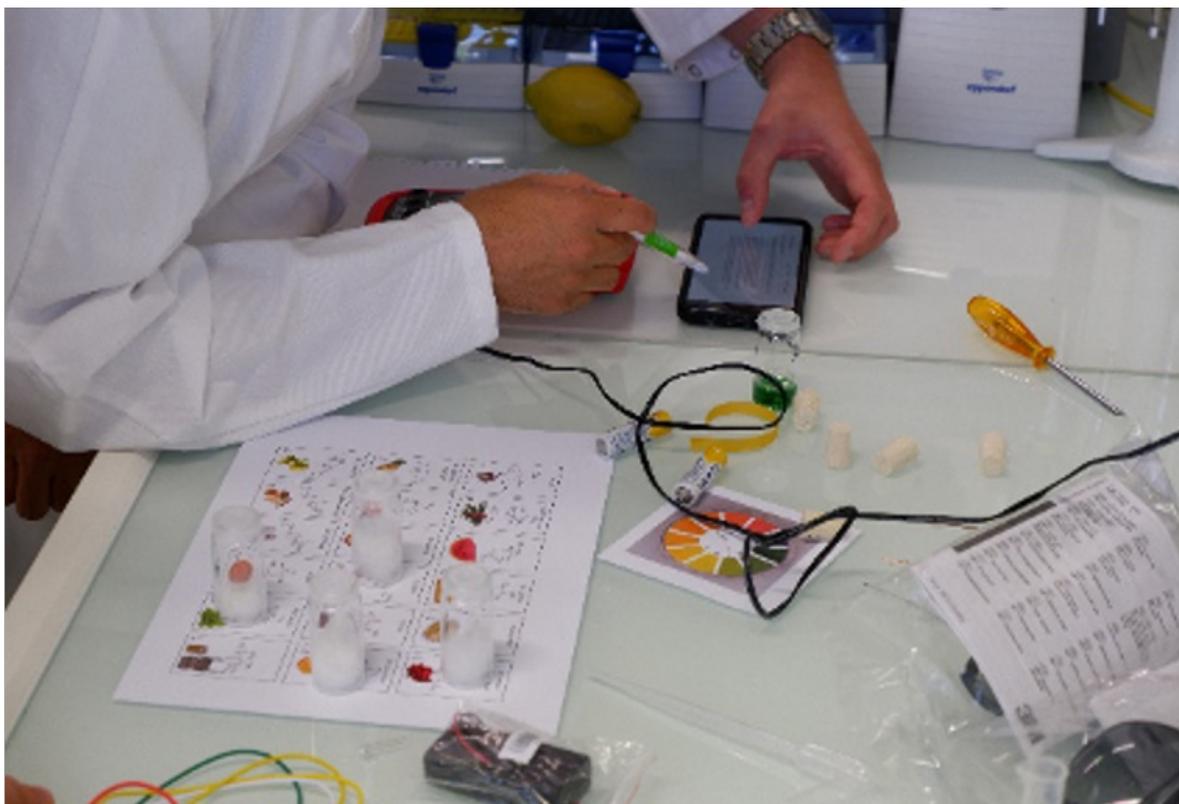


Figura 2. Studenti durante la risoluzione del puzzle “aroma memory”

I concetti e le istruzioni sono stati percepiti dall'85% come ben organizzati e comprensibili. La difficoltà degli esperimenti è stata valutata come appropriata da circa il 90% degli insegnanti. Oltre il 90% degli studenti vorrebbe prendere parte a un'altra *escape room*. Il sistema scolastico tedesco è molto diversificato, con diversi tipi di scuole e *ChemEscape* può essere adattato a diversi gradi. Tuttavia, tutti gli studenti si sono divertiti cimentandosi nella risoluzione di puzzles e risolvendo con successo l'*escape* con un lavoro di gruppo.

Abbiamo stuzzicato la tua curiosità? Sei interessato nel nostro *ChemEscape* per entusiasmare gli studenti su tematiche chimiche? Dai un'occhiata al nostro sito (jcf.io/chemescape), o scrivici per ricevere la password per accedere ai materiali protetti del sito. Insegnanti e personale educativo in Germania può ordinare senza costi un kit *ChemEscape* per scuola, compilando il modulo presente sul sito web, mentre i docenti di altri paesi riceveranno, sempre senza alcuna spesa, un manuale d'istruzione per assemblare il proprio kit personale.

Ti informiamo, infine, che *ChemEscape* è stato tradotto in italiano dai membri dell'*Italian Young Chemists Network*.

Un chimico senior racconta... incontri importanti nella sua vita accademica¹

Domenico Misiti

Professore Emerito, Sapienza, Università di Roma

e-mail: domenico.misiti@fondazione.uniroma1.it

Abstract. The present article is the first-person account of a series of encounters that have represented the path of a chemist in his professional life over the course of more than half a century.

Keywords: laurea in Chimica; Istituto Superiore di Sanità; Marotta e Bovet; chiralità; industria farmaceutica

Il fatto che dovessi fare il chimico fu deciso dal destino nel mio primo anno di Liceo nel settembre del 1948 quando, per punizione, il professore di italiano mi cambiò posto assegnandomene uno in prima fila con un compagno di banco che si chiamava Luciano Caglioti [1]. Direi che senza dubbio il mio incontro con Luciano è stato determinante in prospettiva nella mia vita professionale. Alla fine del Liceo al momento della scelta universitaria io e Luciano non abbiamo avuto dubbi. Era Chimica *of course!*

In quegli anni avevo avuto occasione di frequentare casa Caglioti e di conoscere così il papà Vincenzo, in privato prima di conoscerlo come professore. Parlando con lui non potevi non amare la chimica addirittura come missione di vita. Ho avuto modo di scrivere insieme con Luciano un articolo su Vincenzo Caglioti [2], mettendo in risalto i suoi aspetti umani nel corso del suo incredibile viaggio nella Scienza favorito dalla sua longevità.

Era sufficiente guardarsi attorno per constatare quanto la chimica contribuisce alla nostra esistenza, alla nostra cultura, alla qualità della nostra vita. Mi pareva che fosse un miracolo che tutto quanto cadeva sotto i nostri occhi, tutti i nostri alimenti, tutti i processi della vita, tutto quello che noi usiamo, quel che portiamo addosso, fosse frutto di reazioni chimiche. Mi affascinava una Scienza capace di creare un mondo materiale inedito e artificiale. La Chimica ha fascino e ha la funzione di chiave di lettura della realtà sensibile.

La frase che leggiamo costituisce il credo di Vincenzo Caglioti e ben inquadra la sua figura al di là della sua storia di chimico, scienziato e manager, innamorato della ricerca e figura di docente universale insieme alla schiera dei suoi assistenti, docenti eccellenti nella mitica Aula della Sapienza caratterizzata dalla scritta leonardesca (*Tristo è quel discepolo che non avanza il suo mestro*). Vincenzo Caglioti è l'erede di Cannizzaro, Paternò, ecc. e ha rappresentato una svolta significativa verso una chimica moderna arricchita da concetti chimico-fisici. L'attività di Vincenzo Caglioti non si è limitata a quella di docente, ma ha ricoperto importanti incarichi a favore della ricerca scientifica nel CNR e in diversi Enti di ricerca e di sviluppo del Mezzogiorno. La Facoltà di Chimica si rivelò per noi una Facoltà molto impegnativa, che richiedeva uno studio e una dedizione assoluta. Fra le varie materie del biennio fui subito affascinato dalla Chimica Organica che allora si studiava sul testo "Lezioni di Chimica Organica" di Guido Bargellini. Un testo molto descrittivo con tante formule e pochi accenni sulla reattività.

¹ Questa testimonianza è stato l'oggetto di un seminario in occasione del XLI Congresso Nazionale della Divisione di Chimica Organica, tenuto a Roma nei giorni 10-14 settembre 2023.

Bargellini era da poco andato in pensione e dopo di lui le lezioni di Chimica Organica 1° erano tenute da un giovane e brillante professore, si chiamava Alessandro Ballio. Realizzerò in seguito che Ballio sarà una figura importante nella mia vita di chimico. Nell'anno successivo arriverà il Prof. Luigi Panizzi con la sua scuola costituita principalmente da assistenti napoletani. Ricordo che con il Prof. Panizzi sostenni l'esame di Chimica Organica 2°, che avevo preparato sul voluminoso "Trattato di Chimica Organica" di Paul Karrer.

Negli anni successivi i colleghi più giovani ebbero la possibilità di preparare gli esami di Chimica Organica su un innovativo testo di "Chimica Organica", il Morrison e Boyd, decisamente una svolta nella didattica e anche un'apertura nel nostro approccio alla ricerca.

Durante l'internato in un laboratorio di Chimica Organica ho conosciuto il chimico più originale che abbia mai incontrato. Era il Prof. Rodolfo Alessandro Nicolaus, napoletano che era stato assistente della Bakunin e che in passato aveva insegnato anche in Svizzera. Era un professore che amava il paradosso, ma che era impossibile non volergli bene. Posso dire che tutto quello che sapevo fare sperimentalmente me lo ha insegnato lui.

Se faccio una fotografia della chimica di allora tutto era basato sui valori dell'analisi elementare, sull'assorbimento nell'UV e sugli spettri IR. L'identificazione strutturale mediante preparazione di derivati funzionali. Avevamo imparato a fare le prime cromatografie su carta rivelate con maleodoranti reattivi.

È strano immaginare che un timido studente del terzo anno di chimica potesse diventare un collega, a sua detta di pari grado, di Rodolfo. Dopo il suo ritorno a Napoli a volte telefonava a me e Luciano per invitarci per parlare delle sue "Melanine", del nero di pirrolo e di tutto un po', spesso durante una partita di Bridge. Certamente Rodolfo è per me una figura indimenticabile e affettuosa e, con un pizzico di orgoglio, ci teneva tanto a farci sentire suoi allievi piuttosto che allievi del Prof. Panizzi.

Durante l'internato arrivò in laboratorio un giovane napoletano con funzione di nostro supervisor. Era Lorenzo Mangoni che mi ha sempre gratificato della sua stima e fiducia. Non posso fare a meno di enumerarlo fra gli incontri importanti della mia vita accademica per i suoi insegnamenti e per la sua pazienza.

Per inciso ricordo che il mio legame con la Scuola Napoletana di Chimica delle Sostanze Naturali si è consolidato nel tempo arricchendosi di amici fraterni quali Luigi Minale, Ernesto Fattorusso, Giuseppe Prota, Aldo Caputo e Lello Riccio e di altri colleghi delle Scuole di Salerno e Catania.

Avendo scelto l'indirizzo organico-biologico della Facoltà ebbi modo di seguire le lezioni di Chimica Farmaceutica tenute dal Prof. Giordano Giacomello che certamente ha favorito in me l'interesse per il campo farmaceutico. Era un professore a tutto tondo imponente e autorevole che avrà un ruolo importante per il mio futuro. Dopo la laurea chiesi "ospitalità" al Prof. Giacomello che dirigeva l'Istituto di Chimica Farmaceutica. Giacomello nella didattica ampliò notevolmente gli spazi della Facoltà di Farmacia dando origine al corso di Laurea in Chimica e Tecnologie Farmaceutiche (CTF). Nella ricerca aveva una visione dipartimentale *ante litteram* e nel suo istituto erano presenti contemporaneamente discipline differenti, fra loro complementari: la farmaceutica, l'organica, la chimica di Fulvio Cacace, la tecnica farmaceutica di Vincenzo Carelli e nel semi-interrato la strutturistica chimica con il giovane brillante strutturista Alfonso Maria Liguori a cui fui assegnato con mia grande gioia. Purtroppo, Alfonso era fin troppo brillante e dopo poco tempo vinse la Cattedra a Bari e lasciò l'istituto. Non avrei mai potuto immaginare che di quella Facoltà sarei diventato il Preside e che Vincenzo Carelli e Fulvio Cacace sarebbero stati per me amici e preziosi consiglieri.

Ho avuto modo di descrivere in un racconto il mio incontro nello studio del Prof. Giacomello con Domenico Marotta [3]. Marotta cercava giovani chimici da assegnare al Laboratorio di Chimica Terapeutica diretto da Daniel Bovet nell'Istituto Superiore di Sanità. Giacomello mi incoraggiò a seguire l'allettante proposta di Marotta che accettai e Marotta fu entusiasta della mia decisione di entrare in istituto. D'allora mi trattò con grande benevolenza che, nel tempo, si è trasformata in una amicizia pur nel rispetto dei rispettivi ruoli. Marotta era stato il Fondatore ed era il Direttore dell'Istituto Supe-

riore di Sanità, organo tecnico del Ministero della Sanità e soprattutto centro di ricerca di eccellenza che aveva nei suoi laboratori figure di primo piano nella ricerca, quali il farmacologo Daniel Bovet, il chimico Ernest Boris Chain, il fisico Mario Ageno, solo per citare i più rilevanti. Dotato di forte personalità, di abilità e intraprendenza, Marotta aveva come ideale l'indipendenza della Scienza dal potere politico con una visione scientifica all'avanguardia e aveva costruito, in anni difficili, un gioiello scientifico, l'Istituto Superiore di Sanità, un'istituzione completa per dare risposte scientificamente valide a ogni esigenza del nostro Paese in campo sanitario, alimentare e ambientale. Il suo interesse per la Chimica era quasi esasperato e aveva da tempo collaborato a promuovere e potenziare la Società Chimica Italiana, occupandone importanti posizioni e diventandone poi Presidente. Ricordo il suo orgoglio nell'aver creato la sede della SCI, a Roma in Viale Liegi e nell'aver organizzato il Congresso Nazionale nel 1958 a Torino, la mia prima partecipazione a un congresso, e il successivo nel 1962 a Napoli, raggiungendo uno standard difficilmente uguagliabile. Durante la mia permanenza in istituto, dal 1957 agli inizi del 1974, siamo rimasti sempre in contatto, con il rammarico di non aver potuto esprimergli di persona la mia solidarietà umana per l'esperienza dolorosa del suo processo² nel 1964, dato che ero negli Stati Uniti.

Marotta mi presentò ai coniugi Bovet, Daniel e Filomena Nitti, che mi accolsero nel migliore dei modi mettendomi a mio agio nel prestigioso Laboratorio di Chimica Terapeutica nato in Italia sul modello del *Laboratoire de Chimie Thérapeutique* del Pasteur parigino. Daniel Bovet era il modello del perfetto scienziato sempre sorridente, gentile fin troppo e apparentemente sempre distratto. Madame Bovet, così da tutti chiamata, era il suo complemento indissolubile, ricercatrice scrupolosa e sempre disponibile a risolvere le criticità che a volte si verificavano in laboratorio. Fui assegnato al Laboratorio di Vittorio Rosnati, un chimico organico con un passato all'Università di Milano, con il quale ho collaborato attivamente nei primi anni del mio soggiorno nell'istituto.

Dopo pochi mesi dal mio ingresso in istituto, nel 1957 Bovet ebbe il Nobel per la Medicina e l'idea di poter discutere liberamente di comportamento animale e di psicofarmaci potenziali, con un Nobel mi sembrava, forse ingenuamente, una situazione di grande prestigio.

La chimica del Laboratorio di Chimica Terapeutica era diretta da un grande chimico, grande in tutti i sensi per i suoi quasi 2 metri di altezza, Giovan Battista Marini Bettolo, che aveva un passato in Sudamerica e con quella parte del mondo aveva mantenuto contatti scientifici continuando a studiare i numerosi principi attivi estratti dalle piante locali.

La Chimica delle sostanze naturali ebbe in quel periodo uno sviluppo notevole aiutata dalla disponibilità di nuove strumentazioni spettroscopiche e di moderne metodologie di separazione.

Ricordo che proprio Marini Bettolo, che aveva un incarico d'insegnamento all'Università Cattolica di Roma, aveva avuto la possibilità di acquistare il primo Spettrometro NMR per l'area romana e a turno facevamo la fila per poterlo utilizzare. Anche la Spettrometria di Massa cominciò a essere utilizzata come mezzo d'indagine nella elucidazione strutturale. Il mio rapporto di grande amicizia e collaborazione con GB, come comunemente lo chiamavamo, è continuato anche dopo l'uscita di entrambi dall'istituto per diventare colleghi universitari e a lui devo molto, sia scientificamente che affettivamente. In istituto avevo avuto occasione di ritrovare Sandro Ballio che dall'università era passato in istituto dove conduceva ricerche nel campo della biochimica legata ai processi di trasformazione microbologica nel gruppo del Prof. Chain. Il nostro rapporto amichevole di colleghi di istituto è continuato fino al 1964, quando Ballio lasciò l'istituto per ricoprire la cattedra di Chimica delle Sostanze Naturali all'Università di Napoli.

A seguito delle vicende processuali del 1964 a carico del Prof. Marotta, come ex Direttore, e del Prof. Giacomello, come Direttore in carica, ci furono profondi cambiamenti; molte delle figure scientifiche più rilevanti lasciarono l'istituto per andare a coprire cattedre universitarie in Italia o all'estero. Il Prof. Marini Bettolo assunse la Direzione dell'istituto e il Prof. Francesco Pocchiari prese la Direzione

² Marotta fu accusato di irregolarità amministrative nella gestione dell'Istituto Superiore di Sanità; nel 1986, sulla prestigiosa rivista *Nature*, questa vicenda giudiziaria venne definita *un'incomprensibile vendetta politica*.

del Laboratorio che Chain aveva diretto in passato. Pocchiari era un ricercatore biochimico brillante e dinamico, capace di stabilire collaborazioni scientifiche improntate anche a un apprezzabile rapporto umano. Qualche anno più tardi, nel 1972, assunse la Direzione dell'istituto dopo Marini Bettolo e, come Direttore, volle istituire la sua Segreteria Tecnica, una struttura agile e operativa esente da intralci burocratici, e mi chiamò a farne parte con mia grande soddisfazione. Ebbi modo in quel periodo di esser nominato come Delegato presso la Comunità Europea a Bruxelles e all'OCSE a Parigi, cariche che ho conservato anche dopo aver lasciato l'istituto. Ricordo ancora con emozione che, come Delegato Italiano, fui chiamato a tenere una conferenza plenaria nel 1976 nella sede centrale dell'OCSE a Parigi [4] sull'incidente all'ICMESA a Seveso. A Pocchiari successe nella Direzione dell'istituto il Prof. Francesco Antonio Manzoli, una personalità straordinaria, promotore di interessanti iniziative scientifiche con il quale ho avuto frequenti consultazioni su problemi di sanità pubblica relativi al controllo dei farmaci, improntate a un solido rapporto umano e a reciproca stima. Grande fu il mio rammarico quando nel 1993 fu indagato e detenuto per lunghi mesi per essere poi prosciolto da ogni imputazione.³

Il mio passaggio all'Università si realizzò nel 1974 con l'assegnazione della Cattedra di Chimica Organica presso l'Università di Camerino. Per una coincidenza non casuale il Presidente della Commissione Giudicatrice del mio concorso fu appunto Sandro Ballio, una specie di destino programmato. Facendo un passo indietro nel tempo nel 1959, quando ero ancora in istituto, Marini Bettolo programò il mio soggiorno di studio in un istituto di ricerca nella *Banlieu Parigina*, per apprendere i metodi di sintesi di molecole marcate da utilizzare per i Curari e gli Psicofarmaci di Bovet per poi seguirne il metabolismo. Un incontro importante in quel periodo fu la conoscenza di Maurice-Marie Janot, Direttore dell'*Institut de Chimie des Substances Naturelles* a Gif-sur-Yvette, che ho molto apprezzato per la sua competenza in chiave chimico-farmacologica e per la disponibilità nei miei riguardi. Incontrerò di nuovo Janot qualche anno più tardi e, frequentandoci per un lungo periodo nella costruzione della prima Farmacopea Europea, fra Strasburgo e Parigi, il nostro rapporto si consolidò fortemente propiziato anche dal suo grande amore per Roma e la sua storia.

Nel 1963 Daniel Bovet, sollecitato dall'amico americano Karl Folkers, Direttore dello *Stanford Research Institute* e Full Professor alla *Stanford University* a Palo Alto in California, mi propose per un soggiorno di studio nei suoi Laboratori [5]. Folkers si rivelò un direttore di ricerca attento, un manager esperto e un docente appassionato. Per il suo interesse principale, rivolto ai meccanismi di trasporto energetico in particolare nelle piante, aveva ricevuto diverse nominations per il Nobel come scopritore del Coenzima Q10 oltre a numerose altre sue importanti ricerche con risultati assai rilevanti.

Molti di noi hanno avuto un'occasione di studio negli Stati Uniti e sono sicuro che per tutti sia stata un'opportunità per ampliare le conoscenze e acquisire una maggiore maturità scientifica.

Folkers mi presentò a Karl Djerassi, professore prestigioso della Stanford University, pregandolo di darmi assistenza con la sua formidabile strumentazione per la risoluzione dei miei delicati problemi di stabilità degli intermedi del processo di "isolamento di plastochinoni, prodotti intermedi organici coinvolti nella catena di trasporto degli elettroni nelle reazioni luce-dipendenti della fotosintesi nelle piante". Ricordo gli incontri con Djerassi sempre concisi e spesso risolutivi, la sua competenza e la sua squadra di collaboratori provenienti da tutto il mondo.

In quel periodo i suoi collaboratori Budzikiewich e Williams, padroni assoluti delle tecniche di Spettrometria di Massa, stavano preparando il testo didattico *Interpretation of Mass Spectra* che è diventato, e credo che sia ancora, un testo usato in tutte le Università del mondo. Ovviamente non solo Mass Spectroscopy, Djerassi aveva una straordinaria competenza anche nella Chiroptical Spectroscopy, nell'NMR e in tutte le tecniche utili alla determinazione strutturale di molecole complesse di origine naturale o ottenute per sintesi.

³ Durante Tangentopoli, Manzoli fu accusato di associazione a delinquere e corruzione, ma fu assolto con formula piena "perché il fatto non sussiste".

Ricordo che la struttura del mio plastochinone, isolato dagli spinaci, fu fatta sul primo Spettrometro NMR H100 sperimentale della Varian, che aveva i suoi laboratori accanto alla Stanford University a Palo Alto. Djerassi amava molto l'Italia e, nel 1981, in occasione di uno dei suoi viaggi in Europa per tenere conferenze o presentare i suoi libri, ci siamo incontrati a Roma; ricordo che mi parlò a lungo del suo impegno civile nei riguardi dell'emancipazione femminile con la prima pillola anticoncezionale da lui realizzata.

Permettetemi una piccola divagazione personale. Tornato in Italia dagli USA ho avuto per diversi anni, come già detto, un incarico di insegnamento di Chimica Organica all'Università di Camerino, dove Luciano mi raggiunse nel 1965 in qualità di professore di Chimica delle Sostanze Naturali. In quegli anni abbiamo avuto l'occasione di incontri che si sono poi rivelati lungimiranti per la costituzione del nostro gruppo di Chimica Organica. Mi piace ricordare che in quel tempo sono stati nostri brillanti studenti Sandro Cacchi, Francesco Gasparrini e Goffredo Rosini, che diventeranno i validi docenti e gli *out standing* ricercatori che la "Chimica Organica" ha conosciuto ed apprezzato.

La molteplicità di incontri importanti è cosa comune e abitudinaria nella vita accademica ed è anche difficile stabilire quanto sia stato importante un incontro rispetto ad un altro.

Proverò allora ad associare gli incontri alle particolari situazioni che ho vissuto nel periodo dal 1975 fino al mio pensionamento nel 2009.

Un'esperienza particolare è stata per me un soggiorno di ca. un mese agli inizi degli anni 1980 nella Repubblica Popolare Cinese, appena uscita dalla Rivoluzione Culturale, visitando Istituti di Chimica da Canton a Pechino, in base ad un accordo fra CNR e Academia Sinica. Erano con me in questa esperienza "non facile" Rosario Nicoletti, amico e collega romano con cui avevo condiviso l'internato per la tesi di laurea negli anni 1954-1956, e Giancarlo Jommi, uno dei migliori chimici organici dell'Università di Milano che, qualche anno più tardi, sarà anche Presidente della Società Chimica Italiana. Conoscevo appena Giancarlo e considero quell'occasione, che ci ha permesso di stabilire un rapporto di amicizia salda e reciproca, uno dei miei incontri importanti.

Un settore di interesse scientifico dominante è stato per me lo studio della Stereochimica e in particolare della Chiralità e ho nutrito un profondo interesse sulla diversità di comportamento degli enantiomeri e degli stereoisomeri, sicuramente originato dalla vicenda tragica del *farmaco Talidomide* [6] che mi aveva coinvolto direttamente su indicazione di Bovet agli inizi degli anni 1960. Io e Francesco Gasparrini, sin dagli anni 1980, abbiamo cercato di occupare uno spazio in questo campo e nel 1991 abbiamo promosso e dato inizio a una serie di Simposi Internazionali sullo studio della Chiralità nei suoi molteplici aspetti. In quell'occasione con Gasparrini "ci siamo inventati" la *Chirality Medal* [7] che ha visto premiate figure eccellenti nel campo della Chiralità. Ho per lunghi anni fatto parte della Commissione per l'assegnazione della nostra medaglia. Ogni vincitore di medaglia meriterebbe di essere citato come "incontro importante" ma nell'impossibilità di farlo, dato che siamo arrivati quest'anno al n° 34, mi limiterò a citare solo alcuni con i quali, al di là della conoscenza scientifica, si è stabilito un rapporto di collaborazione e perfino un *feeling* amichevole. Mi piace ricordare l'Accademico di Francia Jean Jacques della *Sorbonne*, autore di una simpatica confessione letteraria che ha peraltro arricchito la mia biblioteca [8], prima medaglia a Roma nel 1991 insieme a Gil Av del Weizmann, ambedue autorevoli protagonisti della separazione degli enantiomeri: il primo con raffinati metodi di cristallizzazione frazionata, il secondo mediante gas cromatografia (Figura 1).

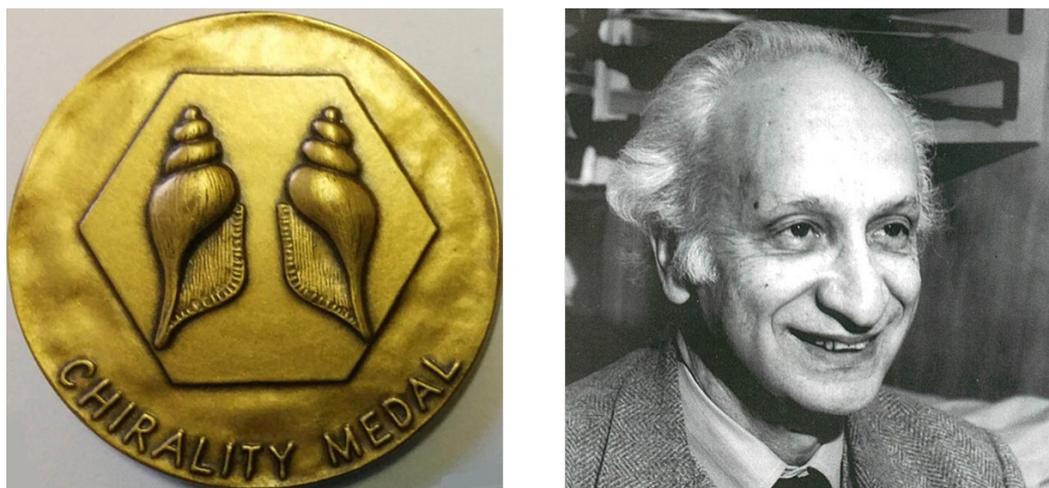


Figura 1. Chirality Medal e Emanuel Gil-Av, primo vincitore della medaglia assieme a Jean Jacques

Voglio ancora citare l'americano William Pirkle, l'inventore dei selettori chirali legati a matrici cromatografiche per la separazione diretta in HPLC, che ha ospitato il nostro Claudio Villani nell'Università di Urbana nell'Illinois per un lungo soggiorno di studio, il tedesco Volker Schurig, antesignano nello studio di complessi olefine-metallo e della *complexation chromatography* e, in particolare, Ryoji Noyori, Nobel per la Chimica nel 2001, di cui ho condiviso la grande fantasia inventiva nella catalisi stereoselettiva (il famoso BINAP) e il suo approccio pragmatico nello studio dei processi di sintesi industriale d'avanguardia nella *Green Chemistry*. Ho avuto con lui diverse occasioni di incontro e di frequentazione, la prima volta nel maggio del 1986 alla IASOC a Ischia e poi a Roma e in seguito in Giappone nel 1997, per l'assegnazione della Chirality Medal, e ancora a Firenze nel 2006, dove per una curiosa coincidenza fummo entrambi premiati dalla Società Chimica Italiana (io con la Medaglia Piria e Noyori con la Medaglia Avogadro). Ricordo che nel 1986 a Roma fu mio ospite e in quell'occasione lo costrinsi ad assistere a casa mia, insieme ad altri colleghi, alla partita Italia-Bulgaria dei Mondiali 1985-1986 in Messico, con un gol di Altobelli; credo sia stata la prima e forse l'unica partita di calcio da lui vista anche se il ricordo di quell'episodio era da lui ricordato puntualmente ad ogni nostro incontro.

Sempre nell'ambito della Chirality Medal, fui lieto di assegnarla nel 1998 al chimico francese Henry Kagan, che insegnava Stereochimica in una delle Università parigine dove l'avevo incontrato nel 1988 e, ancora in seguito, nel 1994 in occasione di un suo soggiorno romano per tenere una conferenza all'Accademia dei Lincei. Ricordo la sua chiarezza didattica e i suoi illuminanti suggerimenti nella catalisi delle sintesi organiche asimmetriche.

Il nostro gruppo accademico nel tempo si è arricchito di validi ricercatori che sono cresciuti e che, a loro volta, hanno favorito altri "acquisti" importanti nei nostri laboratori. A questo proposito è stata rilevante l'acquisizione di Bruno Botta, proveniente dall'Università Cattolica, che aveva, fra le altre, una collaborazione nel campo della sintesi di composti naturali con il Prof. Kyriacos Costa Nicolau che abbiamo avuto modo di conoscere nel 2003, quando gli è stata conferita la *Laurea Honoris Causa* alla Sapienza. In quella occasione ci fu la particolare coincidenza con un Congresso sulle Sostanze Naturali in onore dei 70 anni, miei e di Luciano Caglioti, a cui parteciparono, oltre al nostro gruppo romano di allora, i colleghi di Bologna, Camerino, Chieti e L'Aquila (Figura 2) con i quali avevamo mantenuto una stretta collaborazione e grande amicizia [9].



Figura 2. Il gruppo di Chimica Organica di Farmacia con i colleghi di Bologna, Camerino, Chieti, L'Aquila e al centro Kyriacos Costa Nicolau

Il mio rapporto con il mondo dell'industria, in massima parte farmaceutica, è stato di due tipi: come esperto per la valutazione di progetti industriali e come consulente di ricerca nella realizzazione di processi industriali. Considero queste due tipologie di esperienze di grande interesse che hanno dato modo di ampliare il mio orizzonte scientifico e di consentire incontri con personalità di grande rilevanza nella Chimica Industriale.

Per poco più di una decina di anni, come esperto dei Ministeri della Sanità, dell'Ambiente, dell'Industria, dell'Istruzione e della Ricerca, del CNR e ancora delle Regioni Veneto, Toscana, Marche, Umbria e Calabria, ho visitato una sessantina di aziende, grandi, medie e piccole, in tutto il territorio nazionale e valutato altrettanti progetti di ricerca industriale con finanziamento pubblico/privato. Tanti gli incontri, molti i colleghi coinvolti fra i quali ne desidero citare alcuni. Renato Ugo, dell'Università di Milano, Direttore di una Agenzia di Ricerca Industriale, un grande scienziato prestatato alla ricerca industriale. Il nostro rapporto professionale si è trasformato nel tempo in amicizia e in seguito in solidarietà per le difficoltà da lui incontrate per la grave patologia di cui soffriva. Luigi Nicolais dell'Università di Napoli, anche lui brillante scienziato interessato allo sviluppo di nuovi e innovativi processi industriali; dai nostri incontri, anche se non numerosi, ho sempre tratto motivi di interesse e di apprezzamento.

Voglio infine ricordare, come già accennato, alla mia esperienza di consulente della Direzione Ricerca di Industrie Farmaceutiche, ruolo che mi ha dato modo di collaborare con colleghi italiani e stranieri di cui ho ammirato la competenza e la concretezza. Fra quelli più vicini a me, ricordo Carlo Scolastico, per la sua competenza nella sintesi asimmetrica di potenziali farmaci, Francesco De Angelis, chimico organico esperto nella sintesi e nella elucidazione strutturale mediante Spettrometria di Massa di molecole complesse, e ancora Federico Arcamone, padre dell'*Adriamicina*, con il quale ho collaborato apprezzando molto i suoi suggerimenti. Nel contesto industriale di mia competenza mi sono occupato di *farmaci chirali* e ho potuto interagire con l'americano Charlie Sih dell'Università di Madison nel Wisconsin. Charlie era uno specialista nella sintesi asimmetrica e aveva sperimentato con successo la partecipazione di enzimi per indurre asimmetria. Ho anche avuto occasione di frequentare il suo Laboratorio di Madison come *visiting Professor* in diverse occasioni.

Nell'ultimo periodo della mia vita universitaria ho ricoperto importanti cariche istituzionali che mi hanno portato a interagire con la *governance* del mio Ateneo, venendo a stretto contatto con Rettori, Pro-Rettori e altre eminenti personalità per trattare problematiche gestionali della ricerca e della didattica, ovviamente non strettamente inerenti al mio settore disciplinare.

Fra le figure più significative ricordo, con riconoscenza, i Rettori della Sapienza: Antonio Ruberti che, alla fine degli anni 1970 assegnò alla Chimica Organica di Farmacia la prima sede all'interno della Città Universitaria e che mi chiamò a far parte del Consorzio di Roma Ricerche, esperienza per me di iniziazione nel campo informatico; Giuseppe D'Ascenzo che contribuì a far avere maggiori spazi didattici alla Facoltà di Farmacia di cui sono stato Preside negli anni 1999-2005; Renato Guarini nella gestione dell'Ateneo Federato di cui sono stato Presidente negli anni 2005-2010; Luigi Frati, fattivamente vicino da sempre alla mia Facoltà e, dopo il mio pensionamento, Eugenio Gaudio nell'ambito della Fondazione Roma Sapienza. In tutto questo periodo non posso non ricordare con riconoscenza l'assistenza sia amministrativa che umana, a me riservata, dall'allora Direttore Generale Carlo Musto D'Amore.

In più di mezzo secolo ho assistito ad un progresso straordinario della Chimica Organica, specie se penso alla mia Chimica Organica del Bargellini, progresso in parallelo con lo sviluppo delle tecniche spettroscopiche e spettrometriche che hanno rivoluzionato i metodi della caratterizzazione strutturale dei composti organici: NMR, MS, CD, accompagnato dalle sofisticate tecniche di cromatografia analitica e preparativa: HPLC, anche quella chirale. Nella sintesi organica l'applicazione di approcci stereospecifici e stereo selettivi con particolare attenzione verso prodotti bioattivi, nuovi materiali, nuovi catalizzatori e l'interesse crescente per gli aspetti applicativi.

Nella tipologia degli incontri importanti ci sono quelli che sono stati tali anche dal lato umano e da questo punto di vista devo dire che la comunità dei colleghi della Chimica Organica "della mia generazione" è stata per me un contenitore di valori molto grande: sarei in profondo imbarazzo a escluderne qualcuno. Mi limiterò pertanto a ricordare le Scuole, molte delle quali assai prestigiose, con le quali sia io personalmente che il nostro gruppo abbiamo avuto interazioni scientifiche importanti basate anche su rapporti di amicizia e di stima. Dietro a ogni Scuola citata vedo colleghi di grande valore, apprezzati protagonisti sia nella ricerca che nella didattica che hanno condiviso con me mezzo secolo di vita accademica.

Inizio dal Nord per finire con le Scuole Siciliane: i colleghi della Chimica Organica di Padova, di Trieste e di Udine; i colleghi e le colleghe di Torino e di Milano fra Politecnico, Via Golgi e Via Venezian, di Pavia, di Genova, di Parma, di Ferrara, di Bologna, fra Istituto Ciamician, Chimica Industriale e Farmacia, di Firenze e di Pisa, fra Chimica Industriale e Farmacia; i colleghi di Camerino, dell'Aquila e di Farmacia di Chieti, di Perugia fra Scienze e Farmacia, di Viterbo e di Bari; i colleghi e le colleghe di Napoli, di Salerno, di Messina, di Catania, di Palermo e, a parte, i colleghi e le colleghe della Chimica Organica della Sapienza, fra Facoltà di Scienze e Farmacia, Facoltà, quest'ultima, che più mi appartiene e con la quale ho condiviso la maggior parte della mia vita accademica.

Infine, desidero concludere questa mia testimonianza con un doveroso omaggio ai nostri Maestri della Chimica Organica Italiana, limitandomi a quelli che ho avuto modo di incontrare e conoscere e di cui ho potuto apprezzare il valore dei loro insegnamenti: *Adolfo Quilico, Angelo Mangini, Luigi Panizzi, Gabriello Illuminati, Giorgio Modena, Fernando Montanari, Giovanni Speroni, Giuseppe Leandri, Raffaele Fusco, Giuseppe Bianchetti, Piero Pino, Cesare Cardani, Luigi Canonica, Martino Colonna, Renato Andrisano, Giancarlo Berti, Giuseppe Casnati e Paolo Grunanger*, che ci hanno illuminato e consentito di imparare, insegnare, indagare e gestire questa meravigliosa disciplina.

Riferimenti bibliografici

- [1] D. Misiti, Ricordo di Luciano Caglioti, *Rendiconti Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL*, 2021, 139°, Vol. II°, fascicolo 2.
- [2] D. Misiti, L. Caglioti, Vincenzo Caglioti, di professione chimico, *Molecole in Primo Piano – La Chimica nella vita quotidiana*, Vol. 5 “Chimica fra Storia, letteratura e arte”, pag. 33-42, Aracne, Roma, 2020.
- [3] D. Misiti, Domenico Marotta: un chimico che pensava in grande ... una testimonianza fra lo storico e il personale, *La Chimica nella Scuola (CnS)*, 2021, **4**, 67-71.
- [4] D. Misiti, Accadde a Parigi ... Testimonianze” (Il Maggio Francese; Une soirée inattendue), *La Chimica nella Scuola (CnS)*, 2022, **5**, 72-79.
- [5] D. Misiti, La mia scoperta dell’America. La prima esperienza americana di un giovane ricercatore, *La Chimica nella Scuola (CnS)*, 2022, **3**, 61-68.
- [6] D. Misiti, G. Cancelliere, Il caso Talidomide ... un’occasione per parlare di Chiralità, *La Chimica nella Scuola (CnS)*, 2021, **4**, 59-66.
- [7] Second International Symposium on Chiral Discrimination (ISCD 2), Roma, 27-31 maggio, 1991.
- [8] J. Jacques, *Les Confessions d’un chimiste ordinaire*, Editions du Seuil/science ouverte, 1981.
- [9] *Natura e Chimica: una sinergia per l’innovazione*, congresso tenuto a Roma presso il CNR, 11-12 dicembre 2003.

Project “Teaching with Objects”

It is a pleasure to announce the official release of the “Teaching with Objects” platform (<https://teachingwithobjects.org>)!



The project Teaching with Objects

It is originally an Erasmus+ Cooperation Partnership in Higher Education project (2022-2024), initiated as part of the Universeum network by six partners:

- Université de Strasbourg – Jardin des Sciences
- Università Degli Studi di Padova – University of Padua Museum
- Humboldt Universität zu Berlin – Coordination Center for Scientific University collections in Germany
- Dutch Foundation for Academic Heritage (Stichting Academisch Erfgoed - SAE)
- Universiteit Gent – GUM (Ghent University Museum)
- Things That Talk Foundation

A community of professional

The Teaching with Objects platform constitutes one of the outcomes of the project and is designed as a sustainable tool for object-based teaching. In the continuity of the project, it establishes an active network, a community of practice, supporting teaching with objects from university museums and collections.

Thanks to the contribution of professionals - curators, teaching practitioners - and students, the platform supports, accompanies and promotes the network's activities. The platform is currently moderated by a working group common to Universeum and Umac/ICOM professional networks, and composed of founding members of the project, through funding from Umac.



About Universeum

Universeum is a European network, established in the year 2000, concerned with academic heritage in its broadest sense, both tangible and intangible. It aims at the preservation, study, access and promotion of university collections, museums, archives, libraries, botanical gardens, astronomical observatories, etc. It is open to heritage and museum professionals, researchers, students, university administrators and all those involved in university heritage.



Mission

UMAC is the global advocate for higher education museums and collections of all disciplines. UMAC's mission is to contribute to society, for the benefit of all, by sustaining the continued development of university museums and collections as essential resources devoted to research, education, and the preservation of cultural, historic, natural and scientific heritage.

The platform in practice

On this platform, you will find a wide range of articles and resources: reflections on learning and teaching practices, practical guides, and reviews on various aspects of teaching with objects, as well as a “directory” of practitioners to connect with.

A platform open to contribution

Are you interested in sharing your methodologies, instruments, experiences or reflections on our platform? Join us or contact us to discuss your contribution ideas: info@teachingwithobjects.org

On behalf of the Teaching with objects working group

X Scuola Nazionale di Didattica della Chimica “Giuseppe Del Re”



X Scuola Nazionale di Didattica della Chimica “Giuseppe Del Re”

Discutere, Sperimentare, Riflettere

Le reazioni chimiche: il tempo e non solo

Rimini, 15 – 17 settembre 2025



La Divisione di Didattica organizza anche quest’anno la Scuola Nazionale di Didattica della Chimica “Giuseppe Del Re”, rivolta prevalentemente ai docenti di scuola superiore di secondo grado. Questa decima edizione si svolgerà a Rimini dal 15 al 17 settembre e avrà come tema: *Discutere, Sperimentare, Riflettere - Le reazioni chimiche: il tempo e non solo*.

Come recita la prima parte del titolo, verrà dato ampio spazio alla sperimentazione e alla discussione che verteranno su due argomenti particolarmente rilevanti: la *cinetica chimica*, un aspetto che viene svolto di rado in classe pur avendo una grande importanza dal punto di vista biologico e industriale, e le *formulazioni cosmetiche*, un tema richiesto da molti docenti che permette di affrontare anche concetti di base come soluzione, gel, sospensione, miscela, emulsione, ma anche di densità e di stabilità.

Il primo giorno, questi due argomenti saranno introdotti da relazioni generali con l’obiettivo di mettere in evidenza la complementarità fra termodinamica e cinetica, lo sviluppo storico che ha portato all’interpretazione moderna della cinetica chimica e la necessità di sviluppare un curriculum verticale per trasformare la chimica da disciplina a “materia” di insegnamento.

Il secondo giorno, “fuori programma” ci saranno due conferenze legate in qualche modo agli argomenti della Scuola: la prima affronterà il tema affascinante e poco conosciuto della cinetica nelle stelle, mentre la seconda tratterà di microplastiche, un problema ambientale grave e attualissimo che, fino a poco tempo fa, riguardava anche i prodotti cosmetici.

Per il programma dettagliato vedi: https://www.soc.chim.it/it/didattica/Scuola_Del_Re_2025

Il Comitato Organizzatore e Scientifico della Scuola

I fisici e i chimici si confrontano sulla didattica

Il 4 e il 5 settembre 2025 si terrà a Roma, presso l'Accademia Nazionale dei Lincei, un convegno in cui, per la prima volta, i fisici e i chimici discuteranno di didattica: come insegnare la fisica e la chimica e, soprattutto, come integrare queste due discipline per un più efficace apprendimento da parte degli studenti.

Il convegno, nato sotto l'ala della Fondazione i Lincei per la Scuola, oltre a presentare progetti e percorsi in cui fisica e chimica si intrecciano e in cui si evidenzia l'importanza di un approccio storico-epistemologico, dedicherà i pomeriggi del 4 settembre e 5 settembre a due temi cruciali: il primo tratterà di meccanica quantistica, per sottolineare le sfide didattiche dal punto di vista fisico e chimico, mentre il secondo affronterà le metodologie didattiche, ancora una volta per confrontare le due discipline e trovare punti di contatto.



Fondazione
I Lincei per la Scuola



Per ulteriori informazioni consultare il sito: <https://linceiscuola.it/wp-content/uploads/2025/06/programma-convegno-chimica-fisica-4-5-settembre-2025.pdf>