

Paola Albanese^a, Francesca Cardano^b, Luca Consentino^c, Sara Fulignati^d, Tommaso Giovannini^{*e}, Daniele Mazzarella^f, Nicola Mirotta^g, Roberto Nisticò^h, Emilia Paoneⁱ, Giacomo Trapasso^l

LE 10 TECNOLOGIE EMERGENTI IN CHIMICA 2024

Per evidenziare il contributo della chimica al progresso tecnologico, IUPAC seleziona annualmente le “Top Ten Emerging Technologies in Chemistry”: dieci innovazioni che offrono soluzioni rivoluzionarie alle principali sfide globali. In questo articolo, i 10 Young Observer italiani (<https://www.iupac.cnr.it/it/young-observers>) presentano e discutono le tecnologie emergenti selezionate per il 2024.



Introduzione

L'International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) è l'autorità mondiale per gli standard digitali in chimica, la nomenclatura e la terminologia chimica, inclusa l'assegnazione dei nomi ai nuovi elementi della tavola periodica, i metodi standardizzati di misurazione e le masse atomiche. Fondata nel 1919, IUPAC ha creato e continua a conservare il linguaggio comune della chimica, riunendo chimici di tutto il mondo e promuovendo lo sviluppo sostenibile.

IUPAC comprende 57 nazioni affiliate, ognuna rappresentata dalla propria National Adhering Organization (NAO). Per l'Italia, questo ruolo è ricoperto dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). Con l'obiettivo di rafforzare la partecipazione di giovani ricercatori alle attività di IUPAC, il NAO-CNR-IUPAC (<https://www.iupac.cnr.it/>) ha istituito, a partire dal 2021, un bando per selezionare dieci Young

Observers italiani. I vincitori del bando per il periodo 2024-25 sono gli autori di questo articolo. Tra le numerose iniziative della IUPAC, il progetto Top Ten Emerging Technologies in Chemistry riveste un ruolo di particolare rilevanza, mirando a identificare e valorizzare tecnologie emergenti in grado di affrontare le sfide globali con soluzioni innovative e sostenibili. In questo articolo, sono presentate e

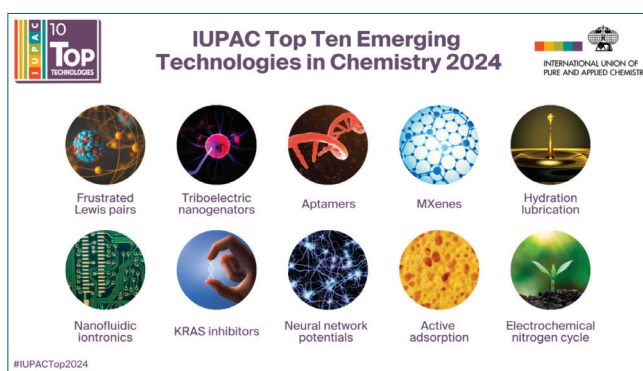


Fig. 1 - Le 10 tecnologie emergenti in Chimica selezionate da IUPAC per il 2024 (<https://iupac.org/what-we-do/top-ten/>)

Autori

^a Dipartimento di Biotecnologie, Chimica e Farmacia e Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente, Università degli Studi di Siena

^b Dipartimento di Chimica, Università degli Studi di Torino

^c Dipartimento STEBICEF, Università degli Studi di Palermo e Istituto per lo Studio dei Materiali Nanostrutturati, CNR, Palermo

^d Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale, Università di Pisa

^e Dipartimento di Fisica e INFN, Università degli Studi di Roma Tor Vergata

^f Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche, Università degli Studi di Roma Tor Vergata

^g CNR - Unità Valorizzazione della Ricerca, Roma

^h Dipartimento di Scienza dei Materiali, Università degli Studi di Milano-Bicocca

ⁱ Dipartimento DICEAM, Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria

^l Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica, Università Ca' Foscari Venezia

*tommaso.giovannini@uniroma2.it

discusse le dieci tecnologie che gli esperti IUPAC hanno selezionato per il 2024 [1] (Fig. 1).

1. Coppie di Lewis frustrate

Una coppia di Lewis frustrata (frustrated Lewis pair - FLP) è un composto o una miscela che contiene un acido e una base di Lewis che, per motivi sterici, non possono legarsi direttamente. Le FLP hanno dimostrato che processi tradizionalmente riservati ai metalli di transizione possono essere promossi da molecole leggere a base di P, N e B [2]. Le FLP sono infatti in grado di attivare molecole come H₂ o CO₂ o legami C-H e C-F, e trovano applicazione nella catalisi asimmetrica, nella chimica radicalica [3] e nella produzione di materiali innovativi, tra cui polimeri biodegradabili, sensori e materiali autoriparanti [4, 5].

2. Nanogeneratori triboelettrici

Un nanogeneratore triboelettrico (*triboelectric nanogenerator* - TENG) è un dispositivo che sfrutta l'effetto triboelettrico per convertire l'energia meccanica in energia elettrica. L'effetto triboelettrico consiste nel trasferimento di cariche elettriche tra due materiali diversi a seguito di contatto e separazione, che crea una differenza di potenziale. I TENGs sono una tecnologia rivoluzionaria per l'elettronica di uso quotidiano nell'alimentazione di smartphone, tracker fitness [6], fino all'ambito biomedico [7] (pace-maker) e trovano anche impiego nell'Internet of Things (IoT), in ambito smart city ed in robotica [8].

3. Aptameri

Gli aptameri sono brevi sequenze di acidi nucleici (DNA o RNA) che si legano con elevata specificità e affinità a bersagli quali peptidi, proteine, e ioni metallici. Noti anche come "anticorpi sintetici", operano in maniera analoga agli anticorpi tradizionali, ma possono essere sintetizzati chimicamente *in vitro*, senza l'uso di organismi viventi, riducendo costi e tempi di produzione, e garantendo un'elevata riproducibilità [9a]. Le applicazioni degli aptameri variano dalla diagnostica [9b], alla terapia specifica [9c], e al *drug delivery*, con il rilascio selettivo di farmaci verso cellule target come quelle tumorali [10].

4. MXenes

L'isolamento del primo materiale bidimensionale, il grafene, nel 2004 ha aperto una nuova area di ricerca nei campi della scienza dei materiali, della

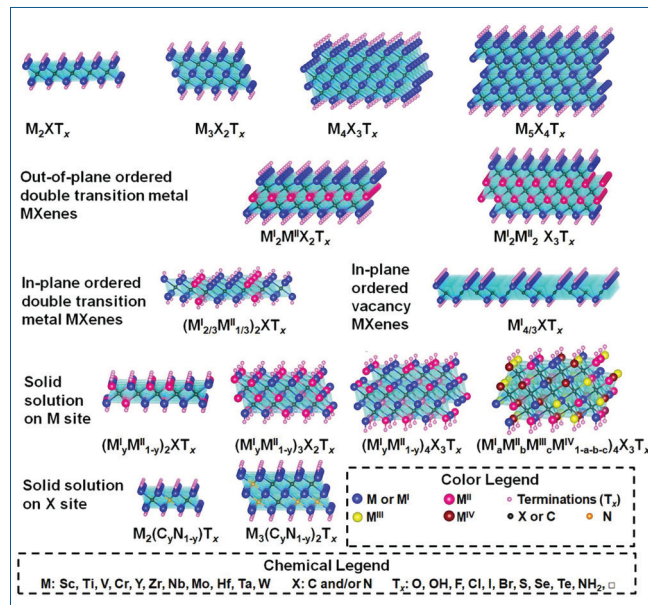


Fig. 2 - Strutture e composizioni tipiche degli MXenes. Immagine riprodotta da [13]

fisica e della chimica. Nel 2011, sono stati scoperti gli MXenes, materiali bidimensionali basati su carburi, nitrucci e carbonitrucci di metalli di transizione (Fig. 2) caratterizzati da una combinazione unica di conduttività metallica, idrofilicità e chimica superficiale modulabile. Gli MXenes trovano applicazione in vari ambiti, spaziando dall'accumulo di energia, all'elettrochimica, alla catalisi e alle tecnologie ambientali [11-13], fino a trovare impiego come catalizzatori per la produzione di H₂, rappresentando un'alternativa sostenibile ai metalli nobili.

5. Lubrificazione per idratazione

Ispirandosi alla natura, la lubrificazione per idratazione riproduce i sofisticati meccanismi che rendono fluido e senza sforzo il movimento delle articolazioni [14]. Le proprietà uniche dell'acqua, come l'aumento della viscosità sotto pressione senza solidificare, consentono una lubrificazione estremamente efficace [15]. Strati d'acqua stabilizzati da molecole come la lubrificina riducono quasi a zero l'attrito. La lubrificazione per idratazione si basa su idrogel avanzati, biocompatibili e resistenti, usati in lenti a contatto, protesi articolari e strumenti medici e promettenti anche per l'ingegneria tissutale e la rigenerazione [16].

6. Ionotronica nanofluidica bioispirata

Il cervello umano è un sistema intelligente basato sullo scambio di informazioni sotto forma di impulsi

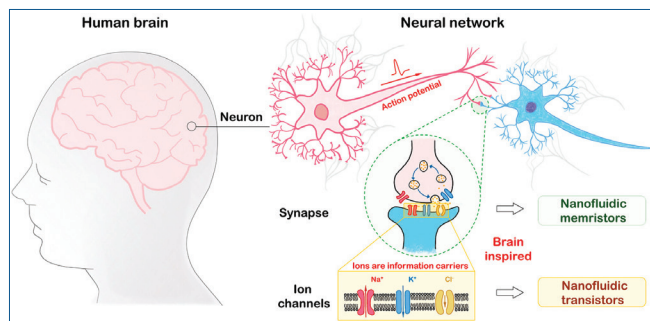


Fig. 3 - Schemi dei meccanismi ionici coinvolti nella generazione e trasmissione dei segnali nel cervello umano e della loro ispirazione per lo sviluppo della ionotronica nanofluidica bioispirata. Immagine riprodotta da [18]

elettrici (sinapsi) [17]. Questo processo ha ispirato lo sviluppo di dispositivi in scala nanometrica capaci di regolare diversi parametri, riproducendo i segnali elettrici neurali e svolgendo funzioni di memoria [18]. Questi sistemi, noti come *Bioinspired Nanofluidic Ionotronics* (BNI), sottopongono la soluzione acquosa ricca di ioni che scorre al loro interno a un *nanoconfinamento*, rendendo le molecole *superfluide* (Fig. 3) e riducendo l'energia necessaria per il loro trasporto nel sistema [17, 18]. I BNI aprono nuove prospettive sia nella costruzione di reti neurali artificiali sia nel trattamento di patologie neurologiche [18, 19].

7. Inibitori di KRAS

Molte forme tumorali sono causate dall'espressione di geni mutati (oncogeni). Tra i più diffusi vi è la mutazione di KRAS (*Kirsten Rat Sarcoma Virus*) [20] che ha un ruolo fisiologico chiave nella regolazione del ciclo cellulare. L'oncogene è stato considerato "non trattabile" a causa della sua complessa attività biochimica fino al 2013, quando è stata identificata la prima molecola in grado di inibire efficacemente e selettivamente la mutazione di KRAS, aprendo prospettive terapeutiche [21]. Questo traguardo ha portato all'approvazione di due farmaci, un passo decisivo nel trattamento delle mutazioni di KRAS trasformandole in bersagli farmacologici concreti per combattere il cancro [22].

8. Potenziali a reti neurali

Il Machine Learning (ML) e l'Intelligenza Artificiale (IA) hanno rivoluzionato la chimica e la scienza dei materiali, come dimostrato dal Premio Nobel per la Chimica 2024 [23]. Tra gli algoritmi più innovativi spiccano i *Neural Network Potentials*, che utilizzano reti neurali addestrate su simulazioni computazionali ad alto livello [24] per modellizzare il comportamen-

to di sistemi chimici complessi (Fig. 4) [25], non trattabili con i metodi tradizionali della chimica teorica e computazionale. Questa tecnologia sta già mostrando applicazioni di successo, come la progettazione di nuovi materiali, l'ottimizzazione di reazioni chimiche e la predizione di strutture proteiche.

9. Adsorbimento attivo

L'adsorbimento è il fenomeno superficiale in cui avviene l'aumento della concentrazione di una sostanza (adsorbato) sulla superficie di un sistema condensato (adsorbente) attraverso forze superficiali/interfacciali. L'adsorbimento è sempre stato considerato come un processo "passivo", fino a che, nel 2021, è stato riportato un processo di adsorbimento innovativo di tipo "attivo" (definito come adsorbimento meccanico, "*mechanisorption*") basato sull'utilizzo di strutture metallo-organiche decorate con macchine molecolari [26] in grado di "afferrare" le molecole di adsorbato in condizioni di non-equilibrio [27]. Questa scoperta apre nuovi scenari in settori come l'energia, il risanamento ambientale, la biomedicina, e il dosaggio di farmaci.

10. Elettrificazione del ciclo dell'azoto

Il ciclo dell'azoto è fondamentale per la vita sulla Terra e per l'industria chimica moderna, ma il suo impatto ambientale è significativo. Tra le sue fasi chiave, la sintesi dell' NH_3 tramite il processo Haber-Bosch, essenziale per i fertilizzanti, è responsabile di circa

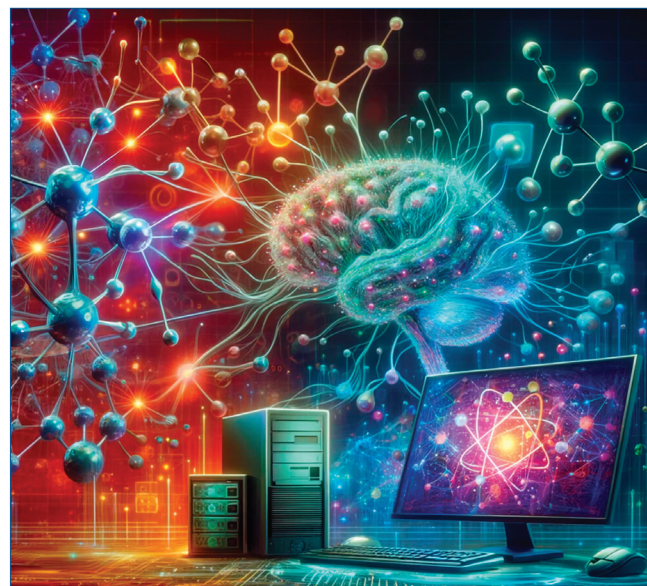


Fig. 4 - Rappresentazione di DALL-E (<https://openai.com/dall-e>) per illustrare le prospettive dei potenziali a reti neurali. Immagine riprodotta da [25]

l'1,5% delle emissioni globali di CO₂. L'elettificazione del ciclo dell'azoto, sfruttando elettrocatalisi e fonti energetiche rinnovabili, offre un'alternativa per rendere sostenibile questo sistema, riducendo le emissioni e l'inquinamento da fertilizzanti azotati [28]. Restano numerose sfide catalitiche ed elettrochimiche per elettrificare il ciclo che renderanno necessaria una profonda trasformazione dell'industria chimica attuale [30].

Conclusioni

Le tecnologie emergenti del 2024 selezionate da IUPAC dimostrano il potenziale della chimica nell'affrontare le sfide globali e promuovere uno sviluppo sostenibile, riflettendo alcune tendenze che stanno modellando il futuro di questa disciplina e delle scienze ad essa connesse. Il ruolo sempre più centrale dell'intelligenza artificiale, presente nelle tecnologie scelte nell'ultimo triennio da IUPAC, sta rivoluzionando il modo in cui nuovi materiali vengono scoperti e le proprietà chimico-fisiche di sistemi complessi vengono predette. Allo stesso tempo, l'interconnessione con la fisica, la scienza dei materiali e le bioscienze continua a crescere, come dimostrano gli MXEne, i nanogeneratori triboelettrici, e le applicazioni biomediche degli aptameri e le innovazioni nella lubrificazione per idratazione. Questi sviluppi non solo rispondono alle sfide scientifiche ed economiche globali, ma si allineano anche ai progressi celebrati dai recenti Premi Nobel per la Chimica.

In conclusione, le innovazioni selezionate per il 2024 evidenziano come la ricerca interdisciplinare e l'applicazione pratica possano trasformare idee rivoluzionarie in soluzioni concrete per il benessere globale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Gomollón-Bel, *Chem. Int.*, 2024, **46**, 8.
- [2] D.W. Stephan, *J. Am. Chem. Soc.*, 2015, **137**, 10018.
- [3] M. Ju *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, 2023, **145**, 19478.
- [4] A.R. Jupp *et al.*, *Trends Chem.*, 2019, **1**, 35.
- [5] D.W. Stephan, *Chem*, 2018, **4**, 2483.
- [6] Z.L. Wang *et al.*, *Energy Environ. Sci.*, 2015, **8**, 2250.
- [7] Z.L. Wang, *ACS Nano*, 2013, **7**, 9533.
- [8] F.R. Fan *et al.*, *Nano Energy*, 2012, **1**, 328.
- [9] a) M.R. Dunn *et al.*, *Nat. Rev. Chem.*, 2017,

- 1**, 0076; b) L.F. Yang *et al.*, *Chem. Sci.*, 2023, **14**, 4961; c) S. Ni *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, **13**, 9500.
- [10] A. Fallah *et al.*, *Biochem. Biophys. Rep.*, 2024, **40**, 101852.
- [11] M.D. Firouzjaei *et al.*, *Mater. Today Adv.*, 2022, **13**, 100202.
- [12] M. Naguib *et al.*, *Adv. Mater.*, 2011, **23**, 4248.
- [13] M. Naguib *et al.*, *Adv. Mater.*, 2021, **33**, 2103393.
- [14] J. Klein, *Friction*, 2013, **1**, 1.
- [15] L. Ma *et al.*, *Nat. Commun.*, 2015, **6**, 6060.
- [16] W. Lin *et al.*, *Acc. Mater. Res.*, 2022, **3**, 213.
- [17] L. Yu *et al.*, *Nano Res.*, 2024, **17**, 503.
- [18] Y. Hou *et al.*, *J. Phys. Chem. Lett.*, 2023, **14**, 2891.
- [19] W. Chen *et al.*, *Science*, 2023, **382**, 559.
- [20] L. Huang *et al.*, *Sig. Transduct. Target Ther.*, 2021, **6**, 386.
- [21] J.M. Ostrem *et al.*, *Nature*, 2013, **503**, 548.
- [22] B.O. Herzberg *et al.*, *Oncologist*, 2023, **28**, 283.
- [23] <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2024/summary/>
- [24] S. Käser *et al.*, *Digit. Discov.*, 2023, **2**, 28.
- [25] T.T. Duignan. *ACS Phys. Chem. Au*, 2024, **4**, 232.
- [26] E.R. Kay *et al.*, *Angew. Chem. Int. Edit.*, 2015, **54**, 10080; C.J. Bruns *et al.*, *Acc. Chem. Res.*, 2014, **47**, 2186; V. Balzani *et al.*, *Chem. Soc. Rev.*, 2009, **38**, 1542.
- [27] L. Feng *et al.*, *Science*, 2021, **374**, 1215.
- [28] Z.Y. Wu *et al.*, *Nat. Commun.*, 2021, **12**, 2870.
- [29] D. Erdemir *et al.*, *Int. J. Hydrog. Energy*, 2024, **82**, 1230.
- [30] U.B. Shahid *et al.*, *Curr. Opin. Electrochem.*, 2021, **30**, 100790.

The 2024 Top Ten Emerging Technologies in Chemistry

To highlight the impact of chemistry on technological progress, IUPAC annually selects the "Top Ten Emerging Technologies in Chemistry": ten innovations offering groundbreaking solutions to major global challenges. In this article, the 10 Italian Young Observers (<https://www.iupac.cnr.it/it/young-observers>) present and discuss the emerging technologies selected for 2024.

