

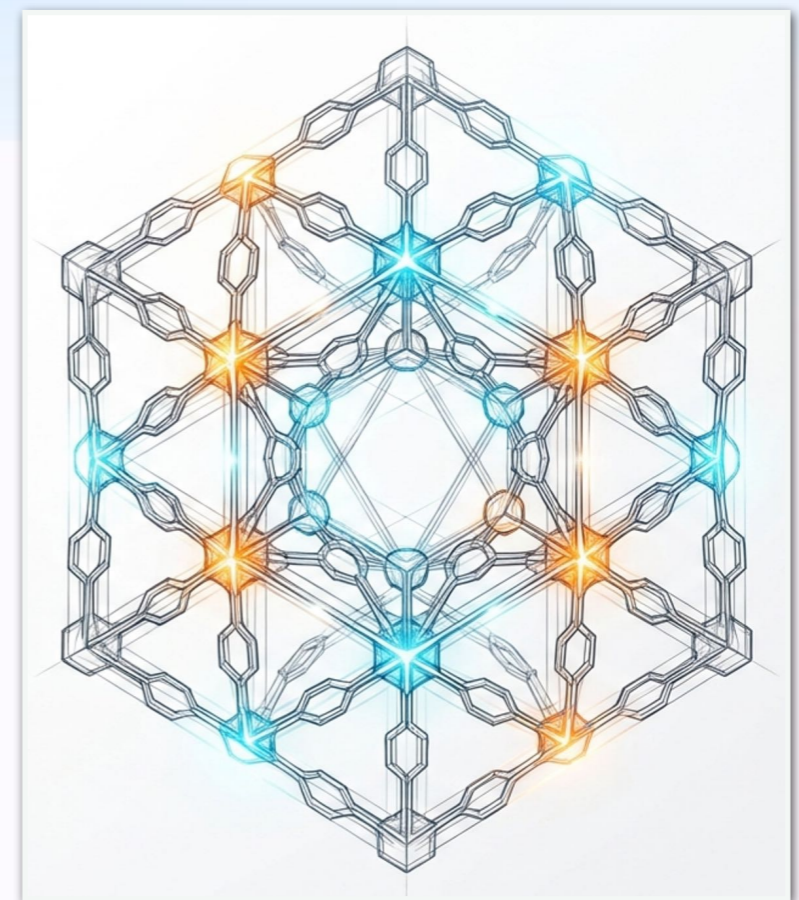


# Elementi di didattica legati ai MOF

Potenzialità didattiche e  
applicazioni STEM

**Riccardo Peruzzini**

28 aprile 2026

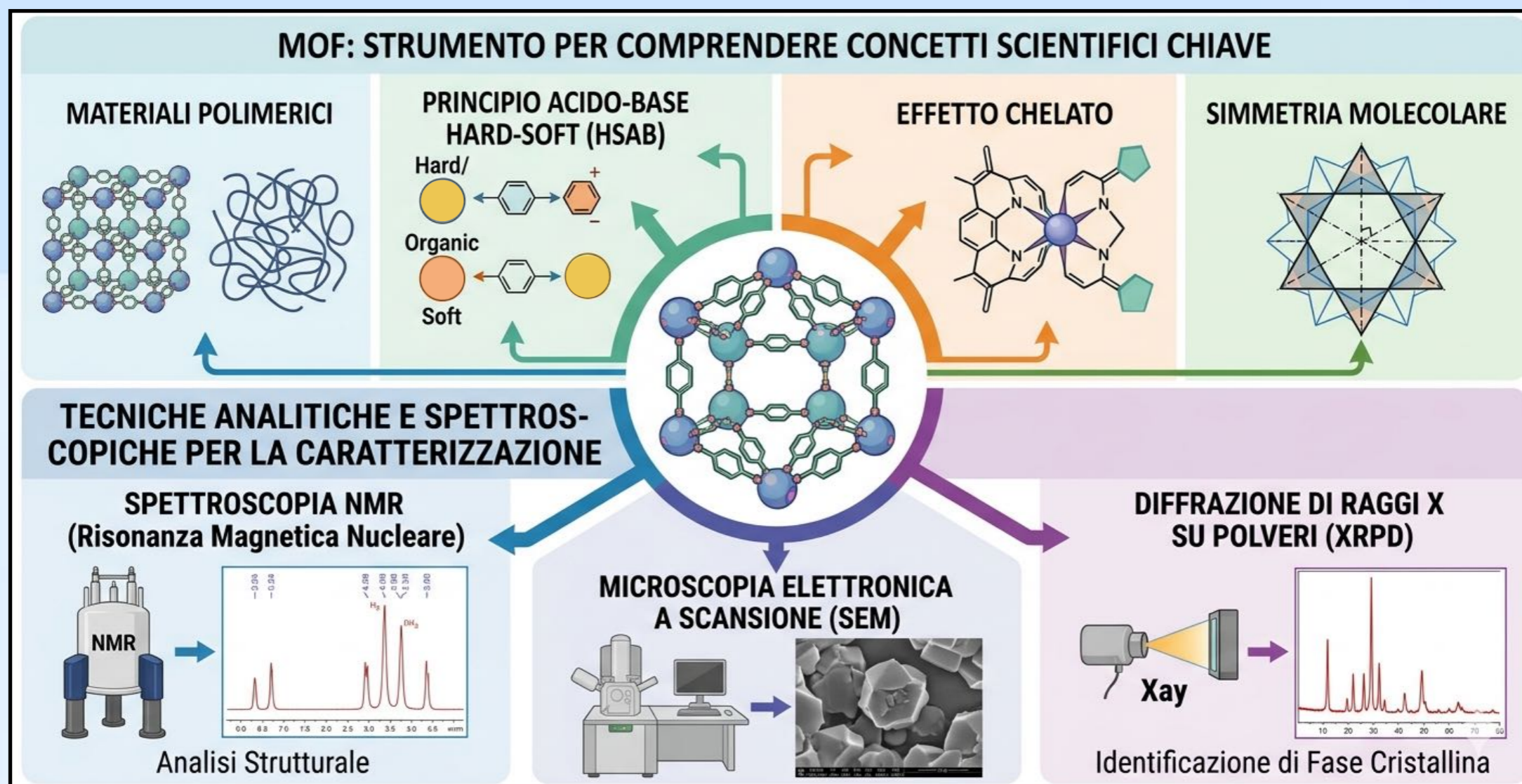


*Immagini generate con supporto di Gemini*

# La didattica dei MOF

## I MOF sono strettamente legati alle frontiere della chimica

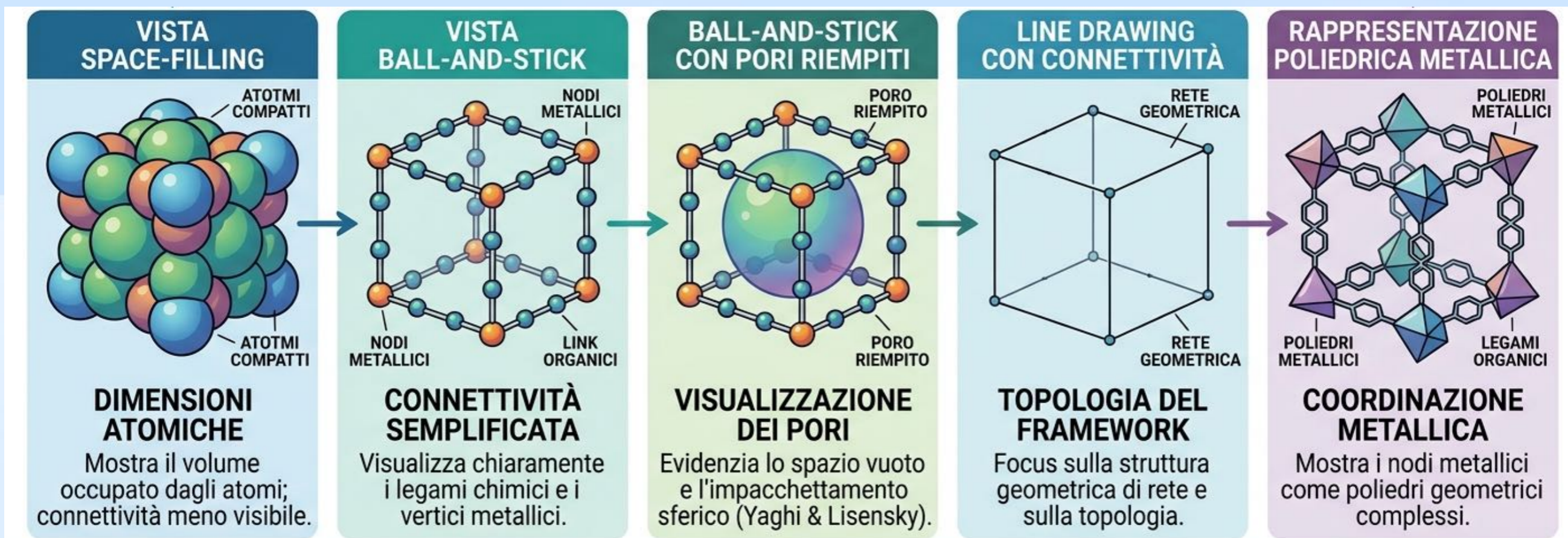
- L'utilizzo dei MOF nella didattica permette di affrontare numerose tematiche di chimica, correlate all'attualità e all'Educazione Civica.



# La didattica dei MOF

## Visualizzare i MOF aiuta a comprenderli e utilizzarli

- ▶ Non sempre è semplice comprendere la struttura dei MOF.
- ▶ L'utilizzo delle rappresentazioni "semplificate", come ball-and-stick possono aiutare nella loro visualizzazione.



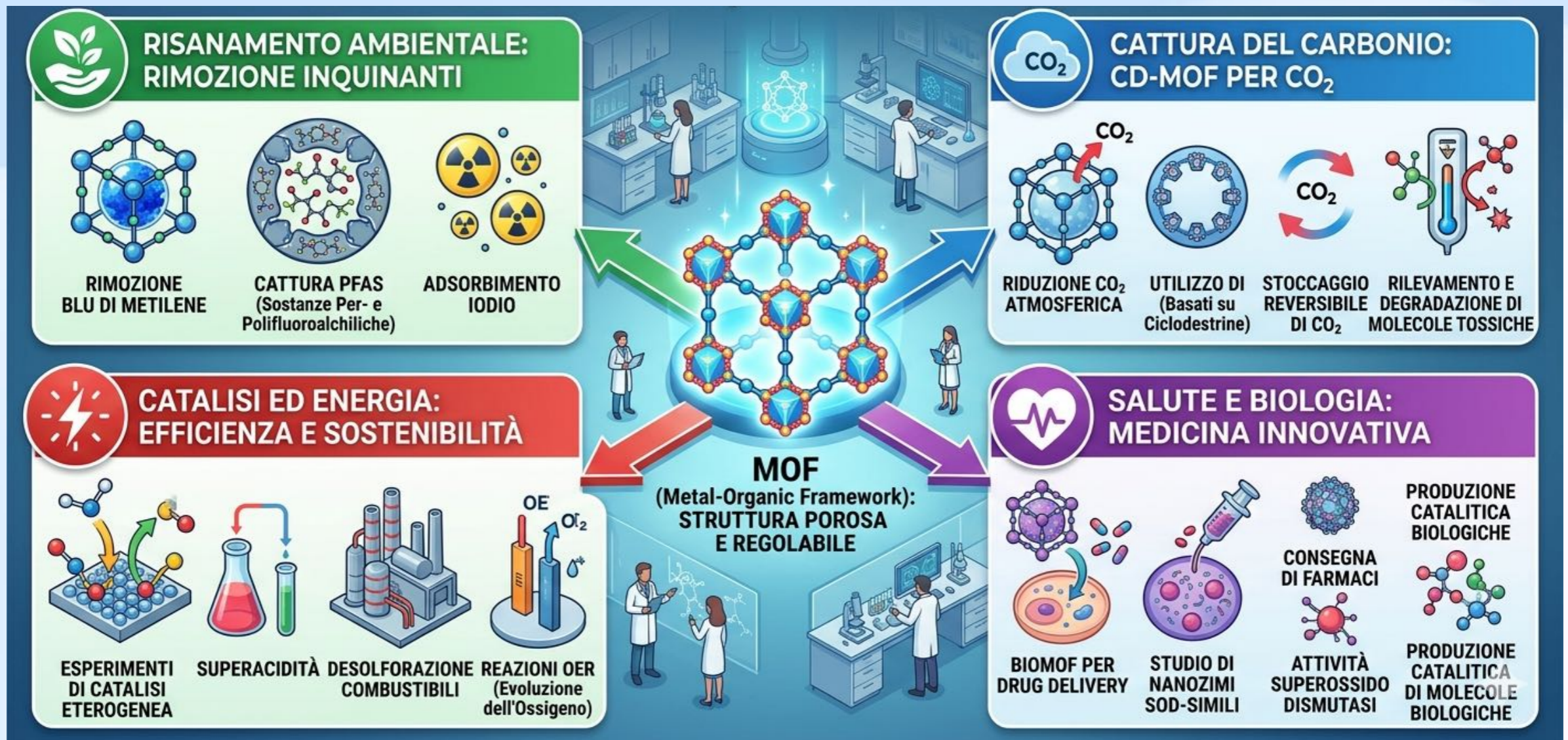
Molteplici visualizzazioni dello stesso MOF aiutano a:  
Decifrare strutture complesse, Facilitare lo studio, Comprendere le applicazioni.



# La didattica dei MOF

## Le principali applicazioni “verdi” dei MOF

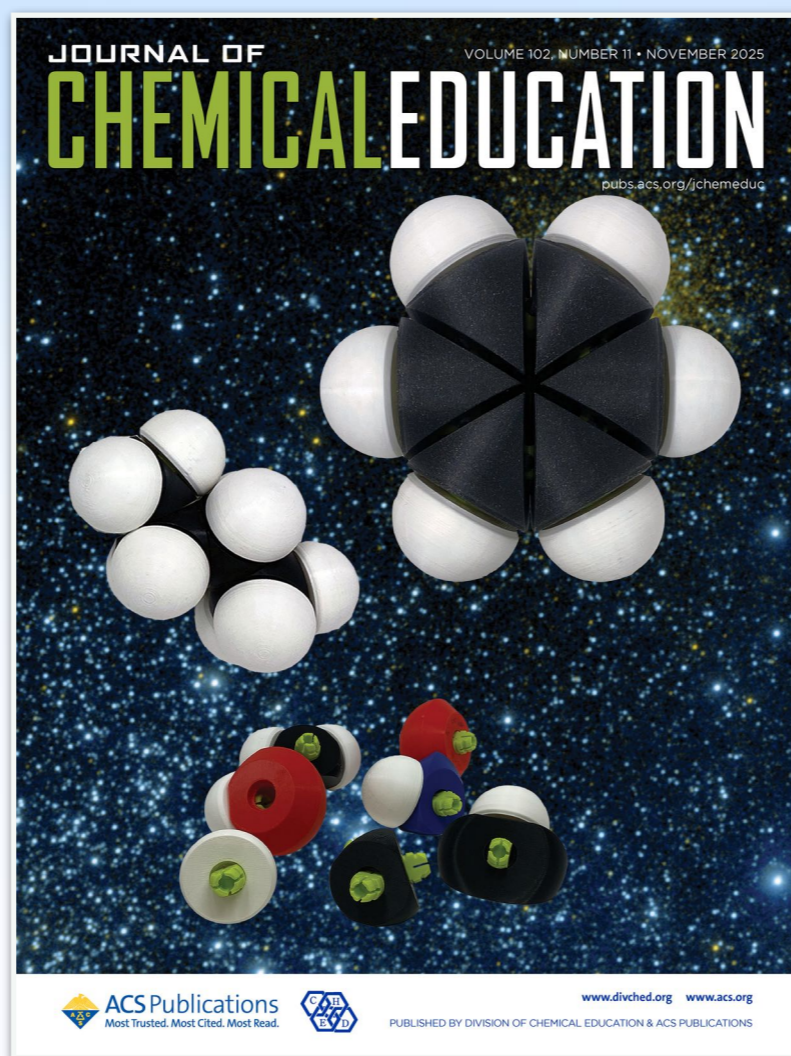
- Gli studenti sono solitamente attratti dai MOF quando vedono l'impatto che tali composti possono avere sulle loro vite, come la possibilità di **cattura del carbonio dall'atmosfera**, quella di **rilevare e degradare molecole tossiche**, o la **produzione catalitica di molecole di interesse biologico**.



# Esperimenti con i MOF

## Sintesi "Green" dell'HKUST-1

- ▶ Si riporta di seguito una possibile attività laboratoriale con i MOF.
- ▶ Evidentemente, data la complessità della tematica, la sintesi è consigliata alle classi più avanzate dei licei, dei tecnici tecnologici e dei professionali di settore.
- ▶ L'esperienza prevede la sintesi "green" di uno dei più promettenti MOF: HKUST-1

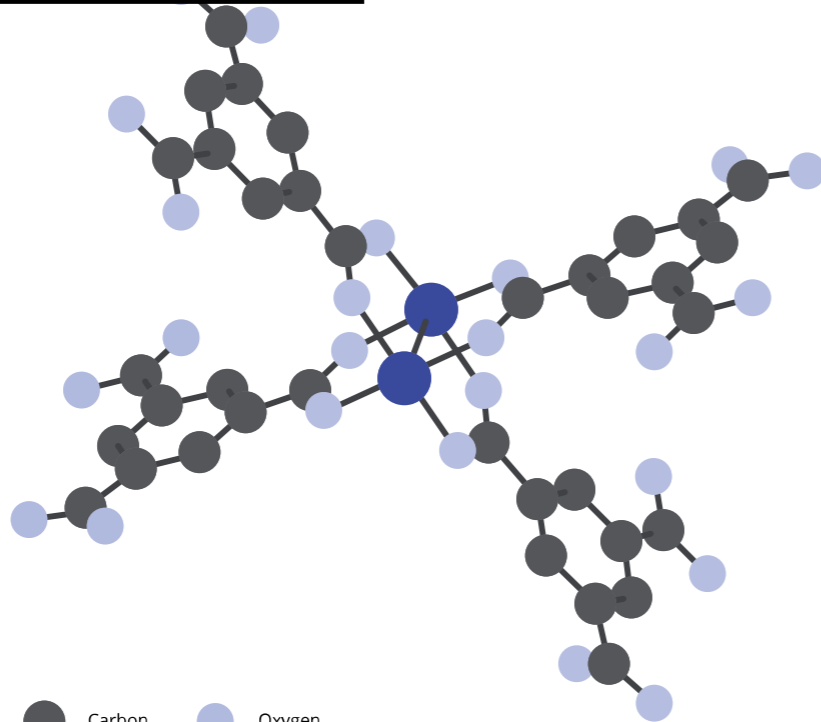
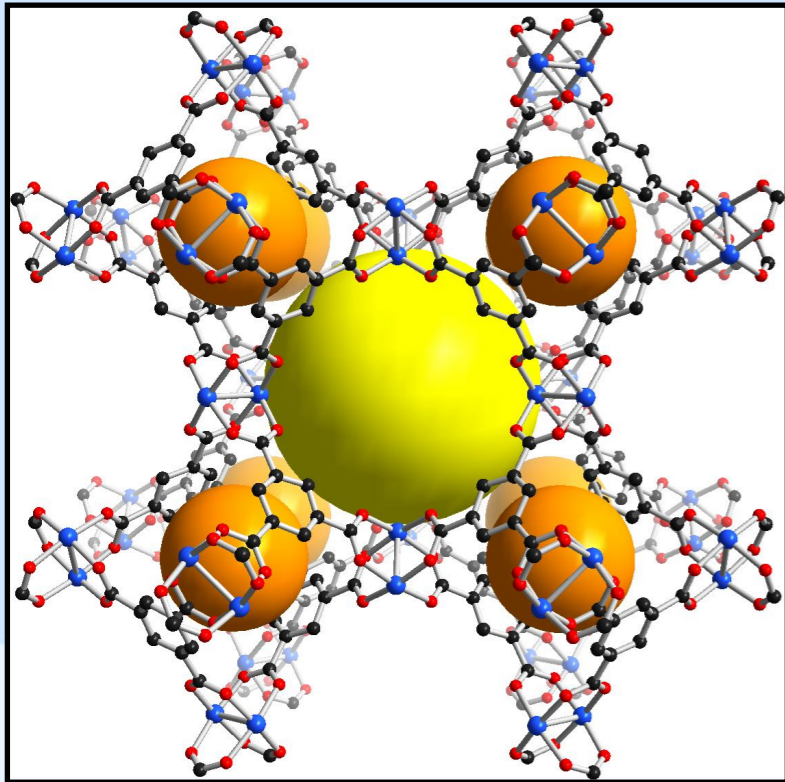


**LINK**

# Esperimenti con i MOF

## Cos'è HKUST-1?

Il nome HKUST-1 viene dall'università in cui è stato sintetizzato la prima volta nel 1999: Hong Kong University of Science and Technology



### PROPRIETÀ STRUTTURALI E FISICHE

**Formola Chimica:**  
 $[Cu_3(BTC)_2(H_2O)_3]_n$

**Alta Area Superficiale:**  
(BET: ~1500–2200 m<sup>2</sup>/g)

**Alto Volume dei Pori:**  
(~0.7 cm<sup>3</sup>/g)

**Struttura Porosa Cubica:**  
(Reticolo geometrico tridimensionale)

**Stabilità Termica:**  
(Fino a ~250-300 °C)

**\*Nota:** Sensibile all'Acqua e all'Umidità

**Legante Organico BTC**

**Nodi di Rame (Cu<sup>2+</sup>)**

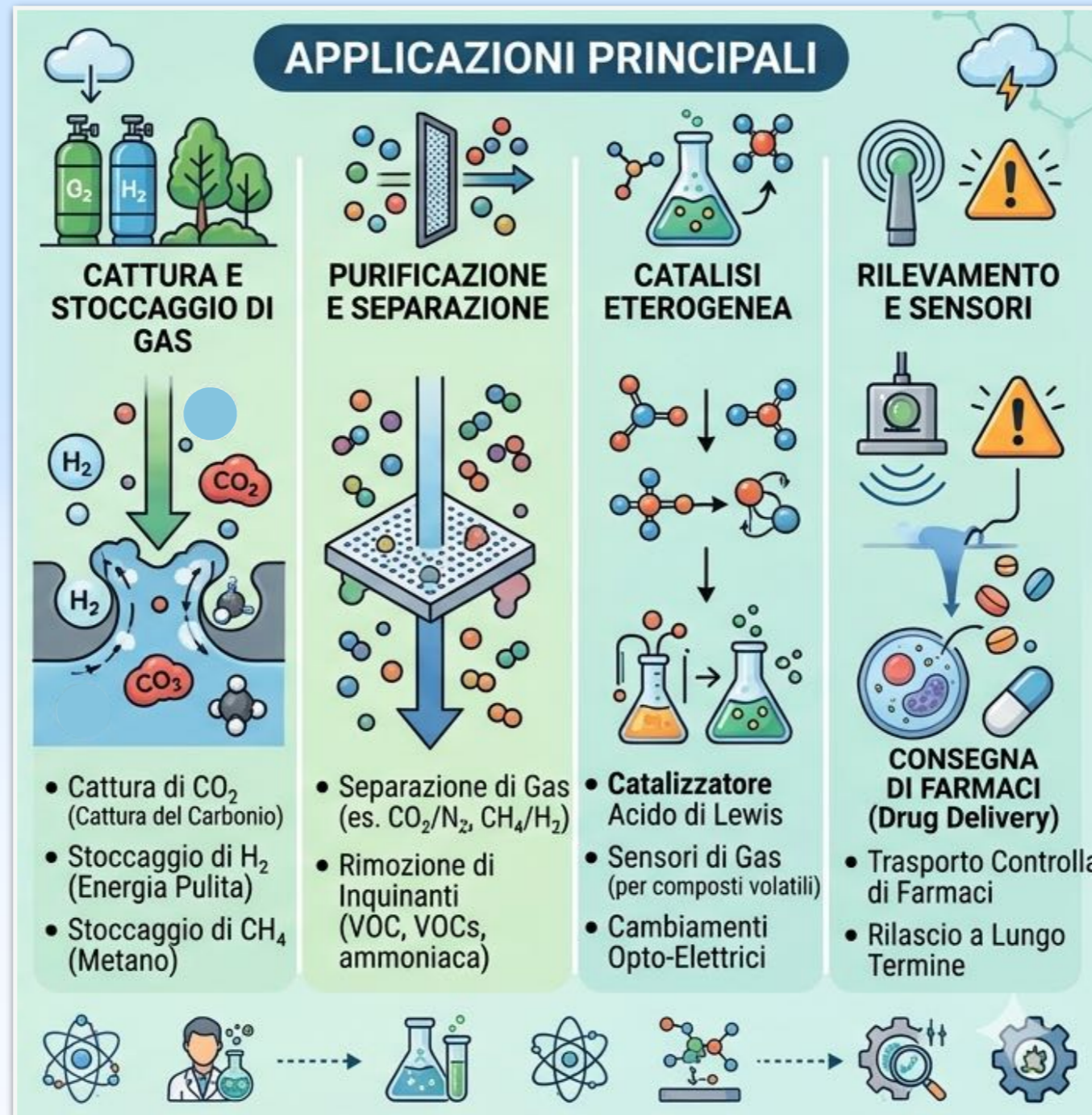
**Unità Paddlewheel (t-paddlewheel)**

**Pori Principali (~18 Å)**

**Aperture dei Pori (~6-9 Å)**

# Esperimenti con i MOF

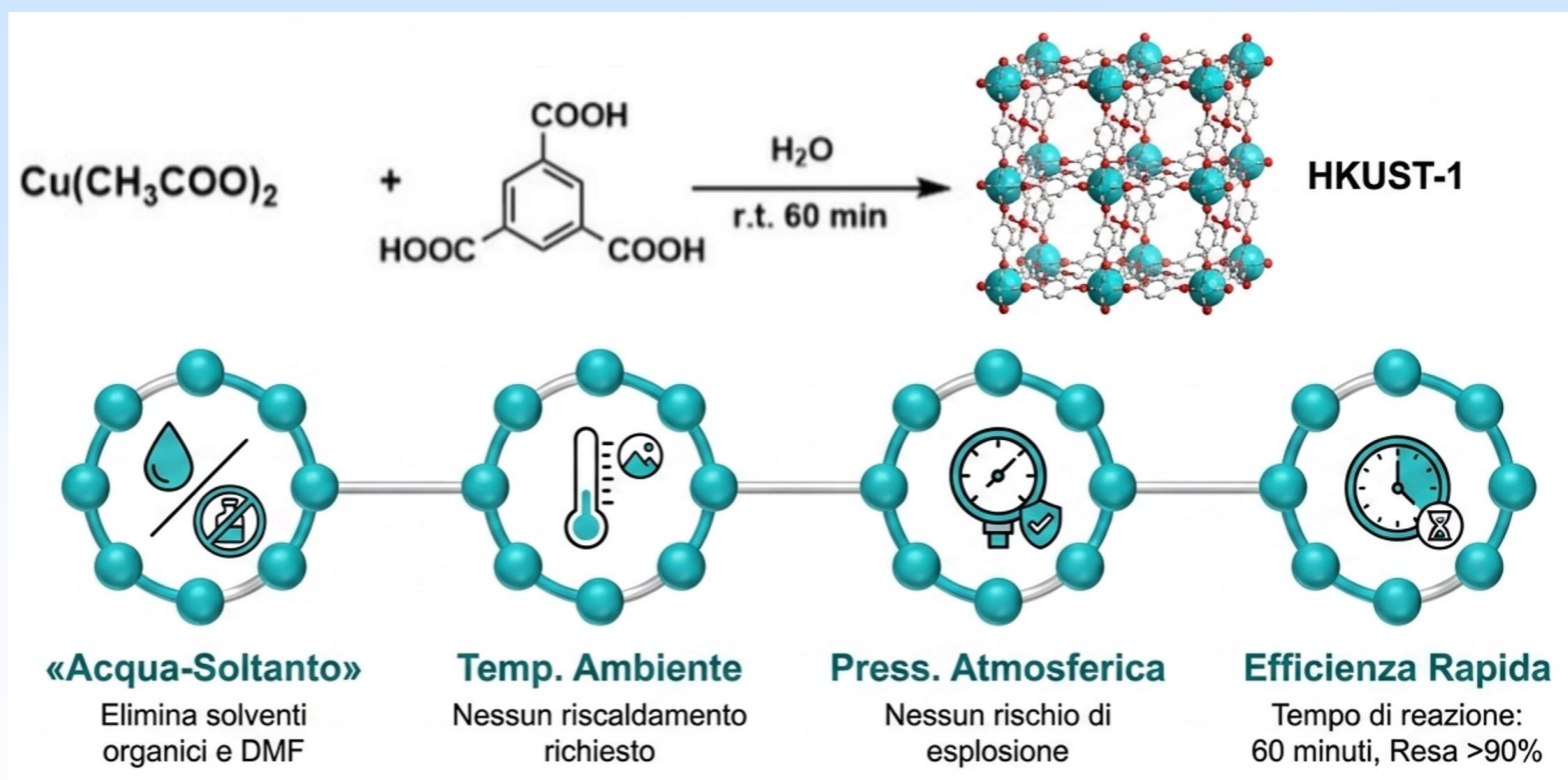
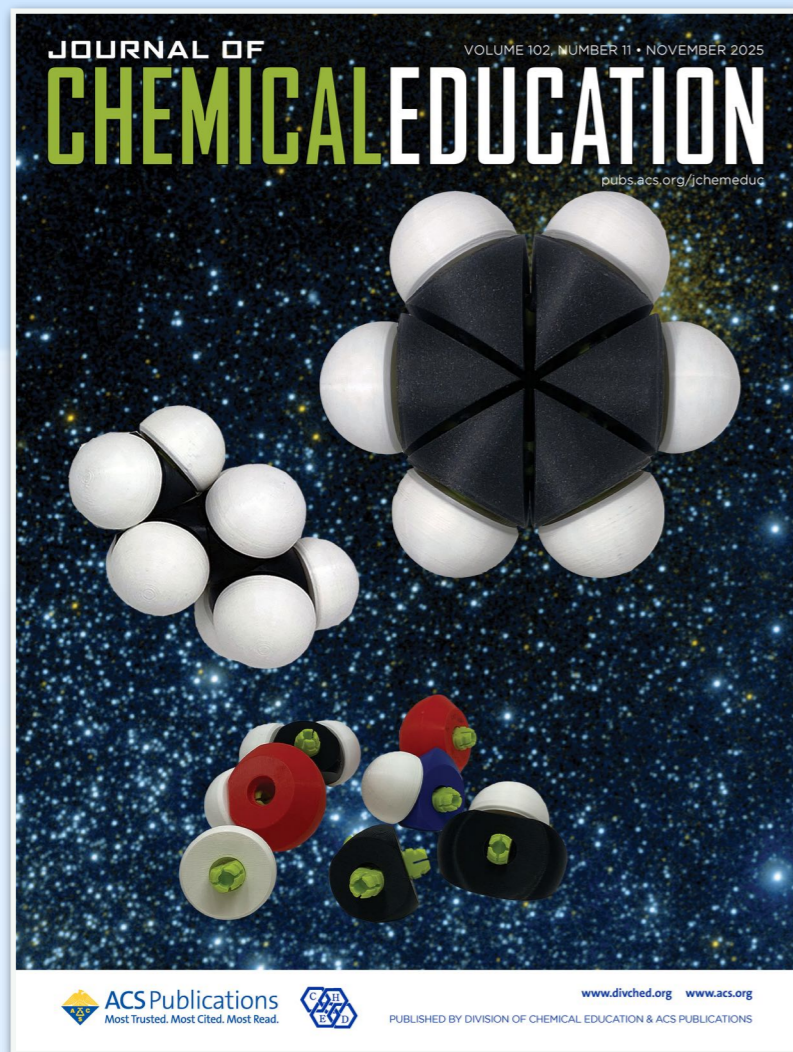
## Cos'è HKUST-1?



# Sintesi "Green" dell'HKUST-1

## Una nuova sintesi, secondo i principi di Green Chem

- ▶ Nel novembre 2025 è stato presentato un articolo che rende "disponibile" anche a laboratori didattici e non universitari la sintesi dell'HKUST-1



**LINK**

# Sintesi "Green" dell'HKUST-1

## Prima Parte: preparazione della soluzione di reazione

[LINK](#)

### Reagenti e Materiali

- ▶ **Acetato di Rame monoidrato** [ $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ] (0.85 g)
- ▶ **Acido Trimesico (Acido benzene-1,3,5-tricarbossilico,  $\text{H}_3\text{BTC}$ )** (0.50 g)
- ▶ **Etanolo** (95% o assoluto)
- ▶ **Acqua deionizzata**
- ▶ **Attrezzatura:** 2 becher da 50 mL, piastra con agitatore magnetico, sistema di filtrazione sottovuoto (imbuto Buchner), stufa

### ATTENZIONE

- L'acido trimesico può essere irritante per gli occhi: usare sempre occhiali e guanti.
- L'acetato di rame è tossico per gli organismi acquatici: smaltire i residui nei contenitori appositi per i metalli pesanti.



# Sintesi "Green" dell'HKUST-1

## Prima Parte: preparazione della soluzione di reazione

### Procedura

[LINK](#)

#### 1. Preparazione Soluzione A (Il Metallo):

- ▶ Sciogliere 0.85 g di acetato di rame in 20 mL di acqua deionizzata. La soluzione apparirà di un azzurro limpido. L'uso dell'acetato è strategico: lo ione acetato funge da base debole, aiutando la deprotonazione dell'acido trimesico durante la reazione.

#### 2. Preparazione Soluzione B (Il Linker):

- ▶ Sciogliere 0.50 g di acido trimesico in 20 mL di etanolo. L'acido trimesico non è molto solubile in acqua fredda, quindi l'etanolo è essenziale. Agitare fino a completa dissoluzione.

#### 3. Mixing e Reazione:

- ▶ Versare lentamente la soluzione B nella soluzione A sotto agitazione magnetica costante.
- ▶ Si noterà la formazione immediata di un precipitato turchese opaco.
- ▶ Lasciare in agitazione per circa 45-60 minuti a temperatura ambiente. Se si vuole accelerare, si può scaldare leggermente a 40°C.

# Sintesi "Green" dell'HKUST-1

## Seconda Parte: attivazione

[LINK](#)

### Procedura

#### 4. Recupero del Prodotto

- ▶ Filtrare la sospensione utilizzando un imbuto Buchner con carta da filtro a pori stretti. Lavare il solido sul filtro due volte con etanolo freddo per rimuovere i residui di reagenti non reagiti.

#### 5. L'Attivazione

- ▶ Un MOF appena sintetizzato ha i pori occupati dalle molecole di solvente (acqua ed etanolo).
- ▶ Per renderlo "attivo" (capace di adsorbire gas) è necessario mettere il solido in stufa a 100-120°C per un'ora.
- ▶ **Effetto Visivo:** Il solido passerà da un colore azzurro chiaro/turchese a un blu scuro/viola intenso. Questo viraggio indica che le molecole d'acqua coordinate al rame sono state rimosse, lasciando i siti metallici "aperti" (insaturi).

# Sintesi "Green" dell'HKUST-1

## Discussione sulla sintesi "verde"

[LINK](#)

### Analisi e discussione per la classe

Alcuni spunti interessanti:

**Stechiometria:** E' possibile calcolare le moli dei due reagenti che sono state utilizzate. Il rapporto teorico nel cristallo è 3:2. Corrisponde a quello pesato? (Solitamente si usa un leggero eccesso di linker).

**Geometria di Coordinazione del metallo:** Studiando le immagini schematiche (ball-stick, ad esempio) è possibile verificare che il rame forma unità "paddle-wheel" (a ruota di mulino). Ogni coppia di atomi di rame è legata da quattro gruppi carbossilici.

**Test di porosità (Il "trucco" della goccia):** Una volta attivato il MOF (blu scuro), aggiungi una goccia d'acqua. Il solido tornerà istantaneamente azzurro. Questo dimostra la reversibilità del legame di coordinazione nei pori.

**Una sintesi "verde":** Il metodo in base acquosa soddisfa pienamente cinque dei dodici principi della chimica verde: 1) Prevenzione dei rifiuti; 2) Sintesi chimiche meno pericolose; 3) Solventi e ausiliari più sicuri; 4) Efficienza energetica; 5) Sicurezza intrinseca per la prevenzione degli incidenti

# Sintesi "Green" dell'HKUST-1

## Sintesi Green di MOF: Innovazione Didattica e Motivazione

Questo progetto ha introdotto una sintesi 'green' di HKUST-1 nei laboratori di Chimica Generale II. Utilizzando solo acqua a temperatura ambiente, il metodo migliora la sicurezza e aumenta drasticamente la motivazione degli studenti.

### Innovazione Green vs Metodi Tradizionali

#### INNOVAZIONE GREEN

#### Acqua come unico solvente

Sostituisce solventi tossici e infiammabili come il DMF con acqua pura a temperatura ambiente.

#### Sintesi superiore al 90%

Sintesi rapida completata in soli 60 minuti con un'efficienza produttiva estremamente elevata.

#### Allineamento ai Principi Green

Soddisfa pienamente 5 dei 12 principi della chimica verde, inclusa la prevenzione dei rifiuti.



#### Confronto dell'aderenza ai principi della Chimica Verde

	Solventi Utilizzati	Energia Richiesta	Sicurezza Intrinseca
<b>Solvotermico</b>	 Etanolo DMF	 Alta (85°C, Notte)	 No
<b>Ultrasuoni</b>	 Etanolo DMF	 Media (Temp. Amb.)	 Parziale
<b>Acquoso (Green)</b>	 Solo Acqua	 Bassa (Temp. Amb.)	 Sì (Massima)

### L'Impatto sulla Motivazione degli Studenti

**4,87/7**  
in Motivazione Intrinseca

Gli studenti hanno riportato alti livelli di interesse e divertimento durante il progetto.

**Massimo impatto sulle matricole**

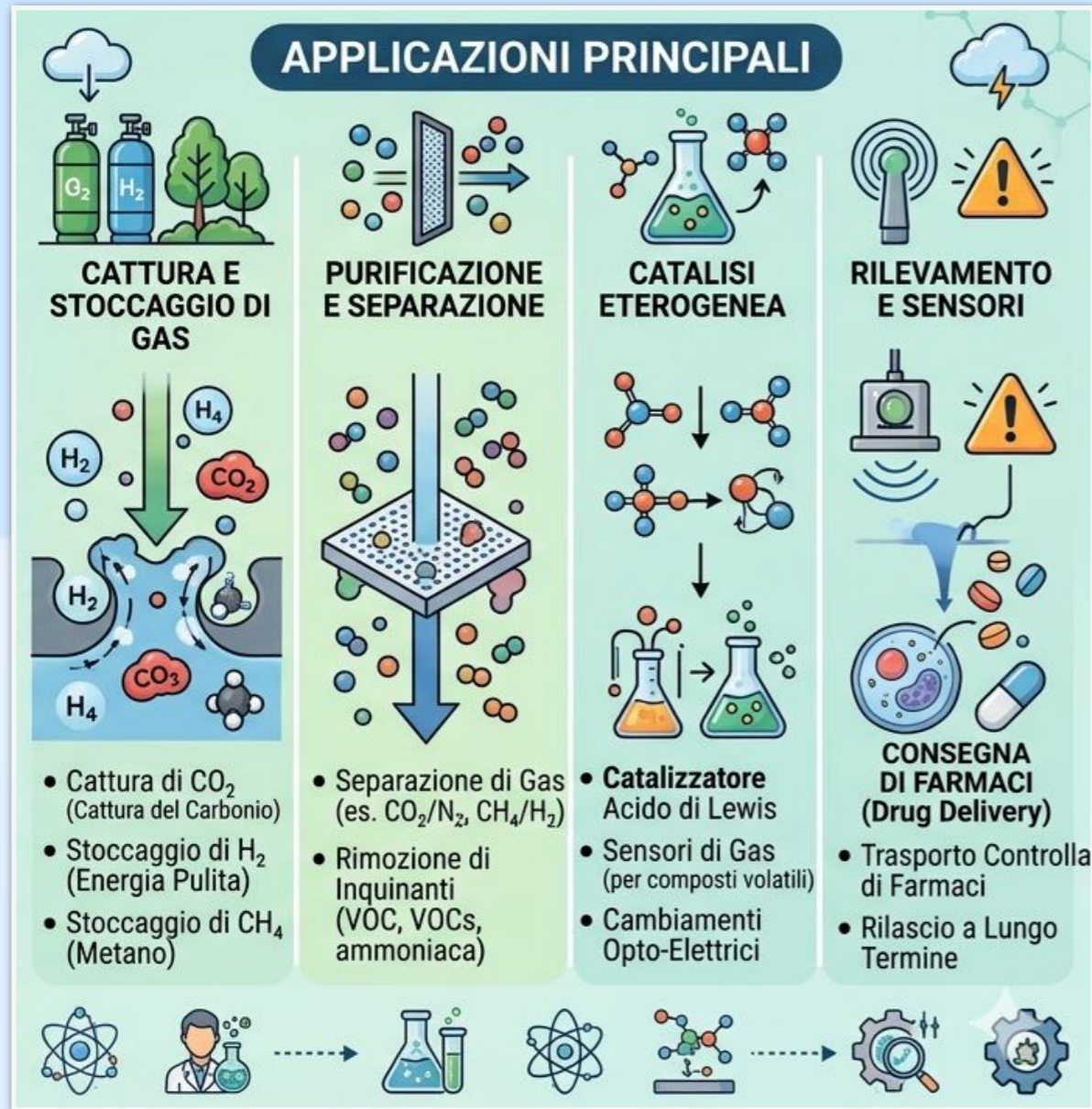
Gli studenti del primo anno hanno percepito il valore e l'utilità più alti (5,75/7).

“ **Consapevolezza sulla sostenibilità** ”

Gli studenti hanno evidenziato una maggiore comprensione del problem-solving ambientale e della gestione rifiuti.

# Esempi di applicazione di HKUST-1

## Esempi di applicazioni “green” del MOF



1. Adsorbimento di inquinanti
2. Cattura dell'anidride carbonica

# Esempi di applicazione di HKUST-1

## Adsorbimento di inquinanti

### ESPERIMENTO DI ADSORBIMENTO DI INQUINANTI CON MOF (HKUST-1)

DECONTAMINAZIONE ACQUATICA ATTRAVERSO LA NANO-TECNOLOGIA

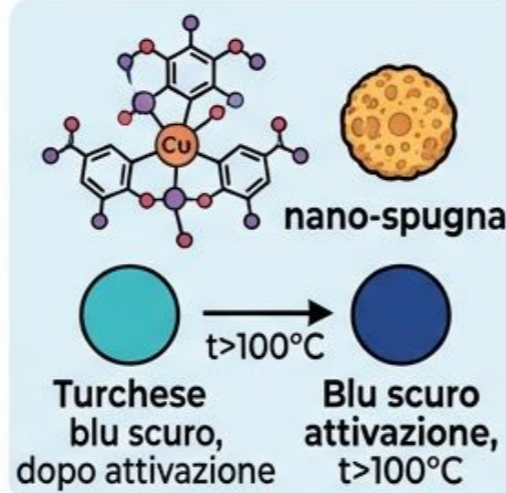
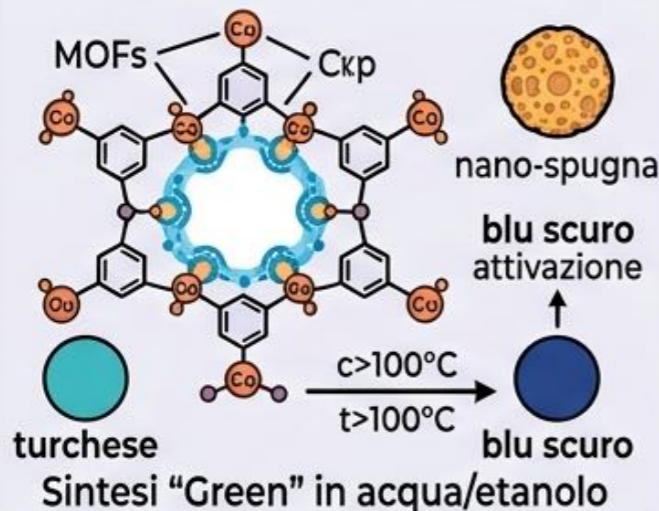
Nobel Chimica 2025: Kitagawa, Robson, Yaghi

#### IL PROBLEMA & L'OBIETTIVO



Micro-inquinanti organici persistenti (es. coloranti) nell'acqua.

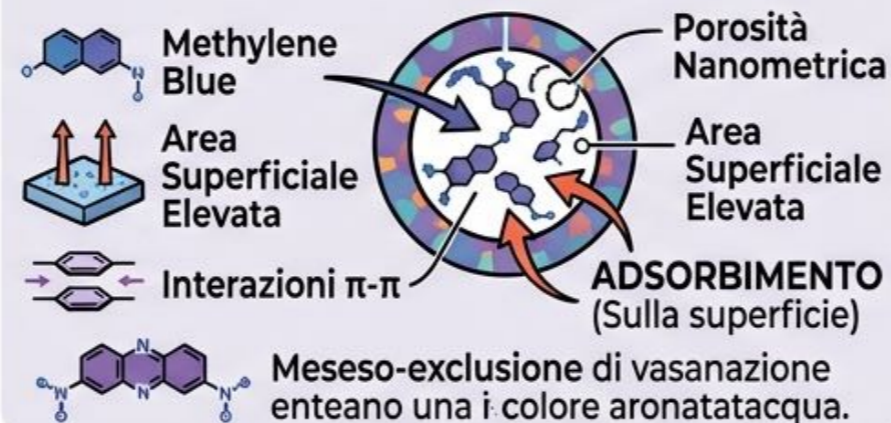
#### IL MATERIALE: MOF HKUST-1



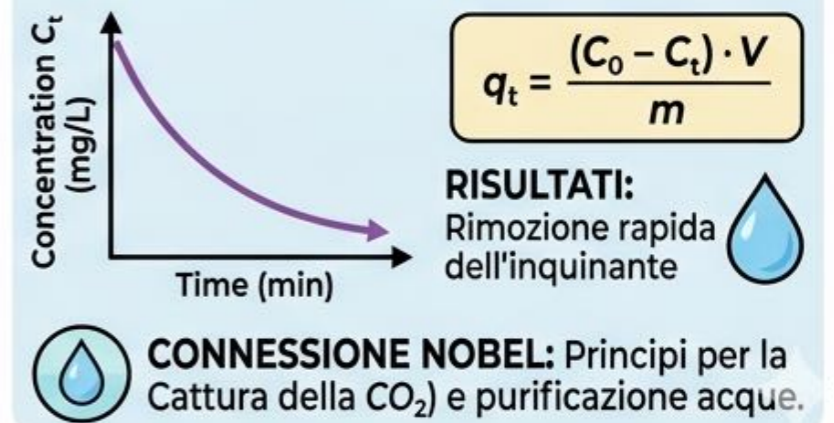
#### LA PROCEDURA SPERIMENTALE



#### IL MECCANISMO MOLECOLARE



#### ELABORAZIONE DATI & CONCLUSIONE



# Esempi di applicazione di HKUST-1

## Adsorbimento di inquinanti

### Reagenti e Materiali

[LINK](#)



- ▶ 100-200 mg di **HKUST-1** (attivato in stufa).
- ▶ **Inquinante modello:** Blu di Metilene (polvere o soluzione concentrata)
- ▶ **Etanolo** (95% o assoluto)
- ▶ **Acqua deionizzata**
- ▶ Attrezzatura: Spettrofotometro UV-Vis (o colorimetro), matracci tarati, pipette, cronometro, cuvette.

# Esempi di applicazione di HKUST-1

## Adsorbimento di inquinanti

### Procedura

[LINK](#)

#### 1. Preparazione della "Soluzione Inquinata"

- ▶ Preparare una soluzione stock di Blu di Metilene (es. 100 mg/L).
- ▶ Diluirla per ottenere una soluzione di lavoro a circa 10-20 mg/L. Si consiglia di filtrare la soluzione con Buchner prima di procedere.
- ▶ NB: Questa concentrazione è ideale: è abbastanza scura da essere visibile, ma rientra nel range di linearità della legge di Beer-Lambert per la maggior parte degli spettrofotometri.

#### 2. Adsorbimento dell'inquinante e monitoraggio

- ▶ Versare 50 mL della soluzione di Blu di Metilene in un becher sotto agitazione magnetica.
- ▶ Aggiungere circa 50-100 mg di HKUST-1 nel becher e avviare il cronometro.
- ▶ Cronometrare il tempo necessario al sistema per completare l'adsorbimento.
- ▶ Al termine della reazione, se l'esperimento è stato condotto correttamente, si avrà un contrasto visivo molto netto.

# Esempi di applicazione di HKUST-1

## Adsorbimento di inquinanti

[LINK](#)

Come appare il sistema al termine della reazione?

### 1. La Fase Liquida

- ▶ La soluzione, che inizialmente era di un blu intenso e opaco, diventa completamente limpida e incolore

### 2. La Fase Solida (Il Sedimento)

- ▶ Il MOF (HKUST-1) apparirà ora come una polvere depositata sul fondo di un blu ancora più scuro, quasi nerastro. Questo accade perché i pori del cristallo sono ora fisicamente "riempiti" dalle molecole di colorante che hanno una densità ottica elevatissima.
- ▶ **Test della Consistenza:** se si agita il becher, il solido si muoverà come una sospensione sabbiosa che tende a precipitare rapidamente (a differenza di un colorante in soluzione che non precipita mai).
- ▶ **ATTENZIONE:** se la soluzione resta azzurra, molto probabilmente si è raggiunta la  **saturazione del MOF**. È stato aggiunto troppo Blu di Metilene rispetto alla capacità del MOF. Tutti i "posti a sedere" (i pori) sono occupati e il colorante in eccesso resta fuori.

# Esempi di applicazione di HKUST-1

## Adsorbimento di inquinanti

### Monitoraggio tramite spettrofotometro o app

[LINK](#)

#### 1. Preparazione del monitoraggio

- ▶ Impostare lo spettrofotometro a **665 nm**.
- ▶ **Tempo zero ( $t_0$ )**: Prelevare un'aliquota di 2-3 mL di soluzione dell'inquinante, misurare l'assorbanza a 665 nm.

#### 2. Monitoraggio della reazione

- ▶ Trasferire in una cuvetta il colorante.
- ▶ Aggiungi una punta di spatola di MOF (molto poco!). Agita rapidamente con una bacchettina di plastica (o chiudi con il tappo e capovolgi una volta).
- ▶ Inserisci nello spettrofotometro e inizia il monitoraggio.
- ▶ Il raggio dello spettrofotometro di solito passa a metà altezza della cuvetta. Appena il MOF si depositerà sul fondo i valori non saranno più alterati dalla presenza del solido e il raggio attraverserà solo il liquido che sta diventando sempre più trasparente (i primi dati potrebbero essere meno precisi).
- ▶ **ATTENZIONE**: un modo più rapido è monitorare la reazione in un becher, prelevando campioni ogni 2-3 minuti. Non avendo il tempo di far depositare il MOF sono necessarie più cuvette e la soluzione prelevata deve essere filtrata ogni volta (con filtri a siringa, per es.)

# Esempi di applicazione di HKUST-1

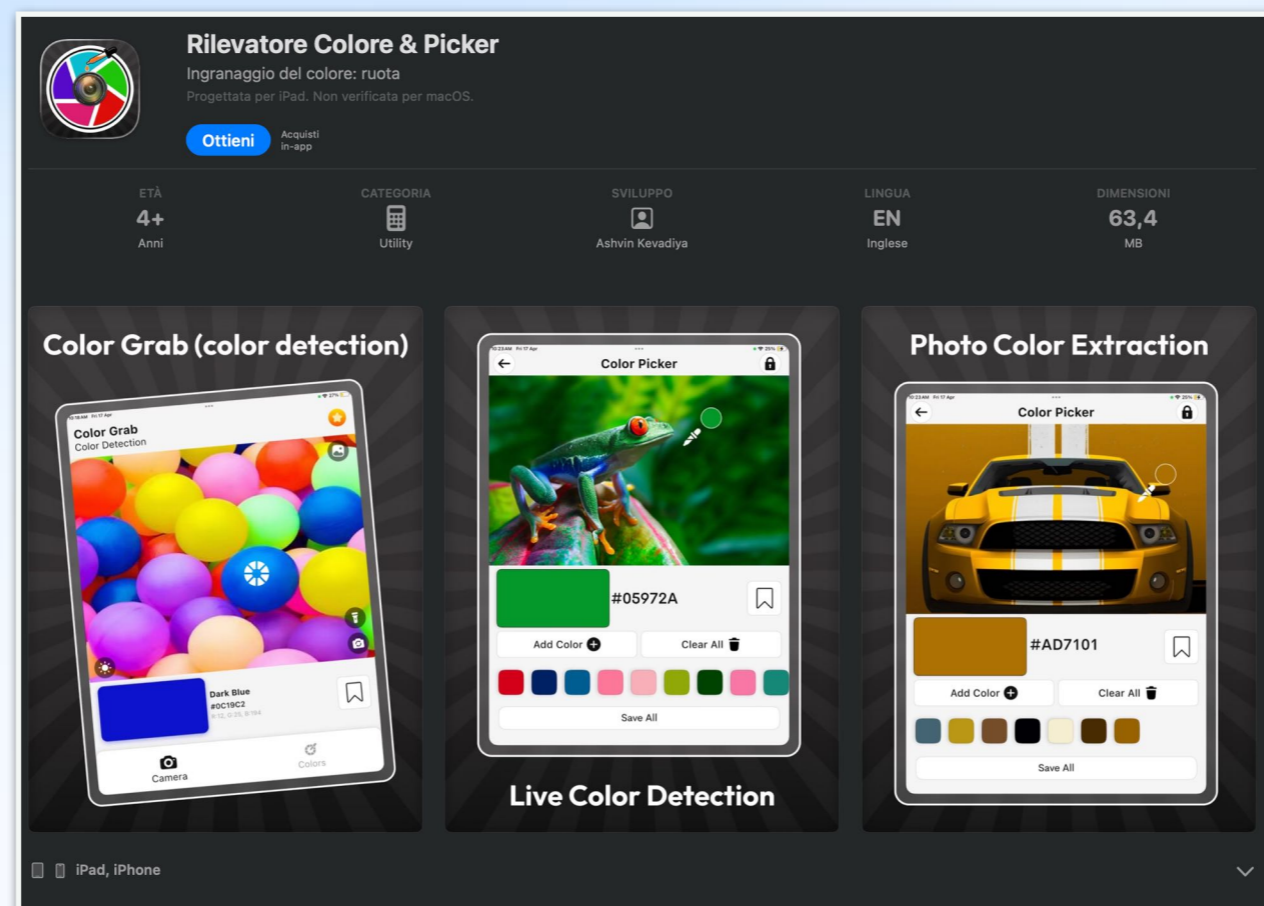
## Adsorbimento di inquinanti

Un diverso monitoraggio: lo smartphone

[LINK](#)

### L'alternativa dello smartphone

- ▶ In alternativa si può utilizzare il sensore di uno smartphone, con un app tipo color grab.
- ▶ Il monitoraggio può essere fatto in parallelo allo spettrofotometro, oppure in sostituzione di questo.



# Esempi di applicazione di HKUST-1

## Adsorbimento di inquinanti

### Bonifica delle Acque: Rimozione del Blu di Metilene con il MOF HKUST-1

#### Preparazione e Setup Iniziale



Soluzione Acquosa di Blu di Metilene (50 - 300 mg/L)



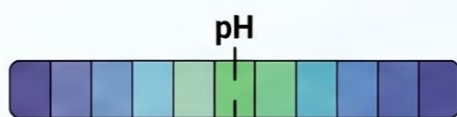
Dosaggio dell'Adsorbente HKUST-1 (50 - 200 mg per 50-100 mL)



#### Struttura dell'HKUST-1

Polvere blu con cristalli ottaedrici, dimensione particelle ~15-16  $\mu\text{m}$ , alta area superficiale (fino a 2100  $\text{m}^2/\text{g}$ )

#### Condizioni Operative Ottimali



pH Ottimale: 7 - 7.5

pH > 4.2 rende la superficie MOF carica negativamente, favorendo attrazione del colorante cationico



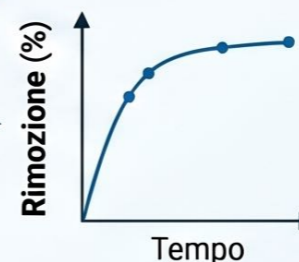
Agitazione Costante & Temperatura Ambiente (~25°C / 298 K)

**Natura del Processo:** Spontaneo ( $\Delta G^\circ$  negativo) ed Esotermico. Maggiore efficienza a temperature più basse.

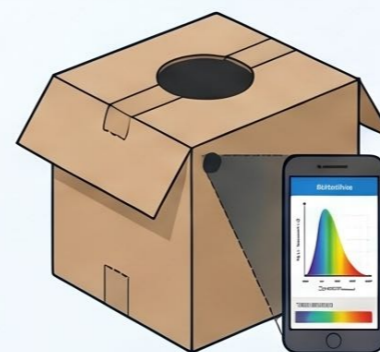
#### Tempi, Cinetica e Monitoraggio



Tempi di Equilibrio: 60 - 120 minuti



Cinetica di Pseudo-Secondo Ordine ( $R^2 > 0.99$ ): Passaggio limitante è l'adsorbimento chimico



**Monitoraggio Smart (App Color Meter):** Analisi intensità colore in tempo reale in camera oscura artigianale

#### Risultati e Rigenerazione

Efficienza di Rimozione **>94%**

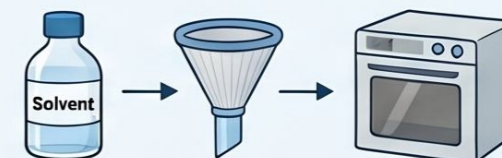
In condizioni ottimali, HKUST-1 rimuove quasi la totalità del Blu di Metilene



Capacità Massima di 250 mg/g (Modello di Langmuir)

#### Performance HKUST-1 vs Altri Adsorbenti

Adsorbente	Capacità (mg/g)
HKUST-1 (MOF)	250 mg/g
MOF-235	187 mg/g
Carbone Attivo (Eucalyptus bark)	45.45 mg/g
Gusci di Nocciola	8.82 mg/g



**Lavaggio e Riattivazione:** MOF usato rigenerato con Etanolo/Metanolo, poi riattivato in forno a 100°C per riutilizzo

# Esempi di applicazione di HKUST-1

## La rigenerazione del MOF

[LINK](#)

### RIGENERAZIONE DEL MOF HKUST-1 DOPO ADSORBIMENTO DI BLU DI METILENE

**STATO INIZIALE:  
MOF "CARICO"  
(SATURO)**

Pori saturati da  
Blu di Metilene.  
Struttura inattiva.



LAVAGGIO CON  
SOLVENTE



**STEP 1:  
DESORBIMENTO  
& ESTRAZIONE**

L'etanolo scioglie  
il colorante.  
Gli ioni  $H^+$  competono  
per i siti attivi.

**CICLO DI  
RIUTILIZZO  
(SOSTENIBILITÀ)**

**STEP 2: MOF "SOLVATATO"  
& LAVAGGIO FINALE**

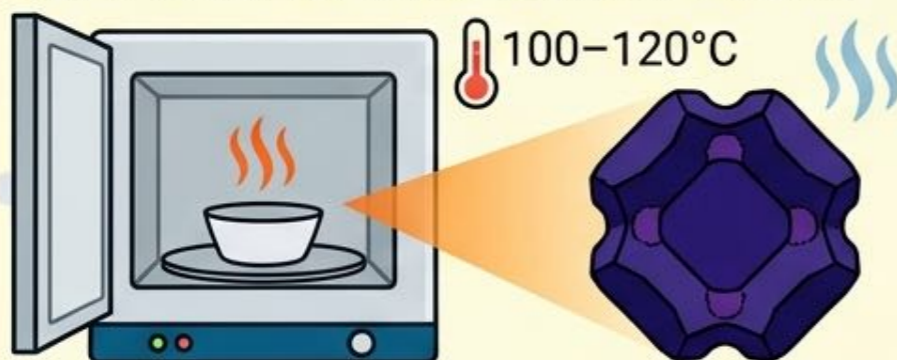
Blu di Metilene rimosso.  
I pori sono pieni di  
Etanolo/Acqua.



Centrifugazione/  
Filtrazione      Rimozione del  
Solvente Blu.

ATTIVAZIONE  
TERMICA

**STEP 3: RI-ATTIVAZIONE IN STUFA**

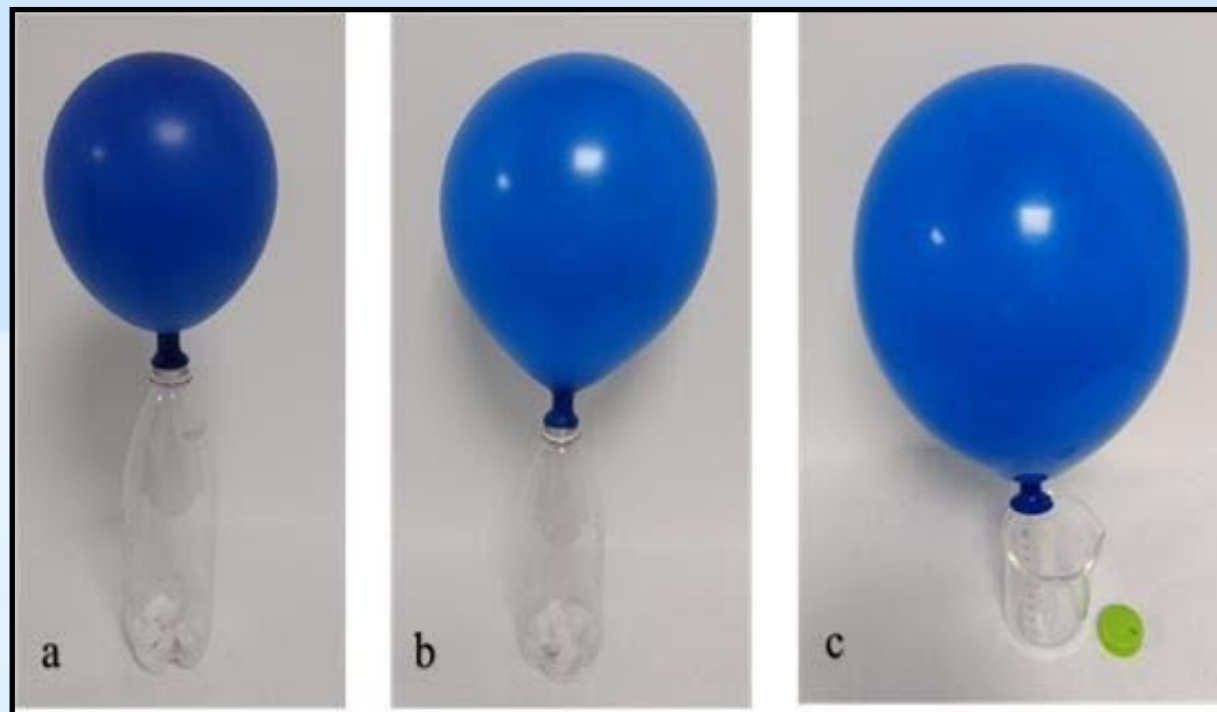


Evaporazione del solvente dai pori.  
Riapertura dei siti attivi di Rame ( $Cu^{2+}$ ).

**CONNESSIONE NOBEL:** I MOF sono "spugne rigenerabili".  
Principi fondamentali per la Cattura della  $CO_2$  industriale (Carbon Capture).

# Esempi di applicazione di HKUST-1

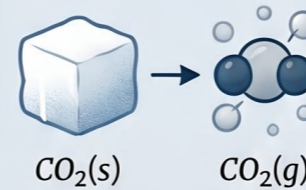
## L'adsorbimento di anidride carbonica



[LINK](#)

### Cattura della CO<sub>2</sub>: L'Esperimento del Palloncino con i MOF

#### Fondamenti e Sicurezza

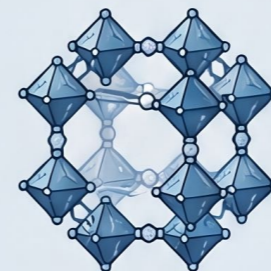


**Sublimazione e Legge dei Gas:**  
Il ghiaccio secco passa direttamente da solido a gas ( $CO_2(s) \rightarrow CO_2(g)$ ).

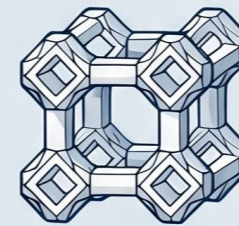


**Protezione dal Ghiaccio Secco:**  
Maneggiare il ghiaccio secco (-79°C) esclusivamente con pinze per evitare ustioni da freddo.

#### MOF: Spugne Molecolari



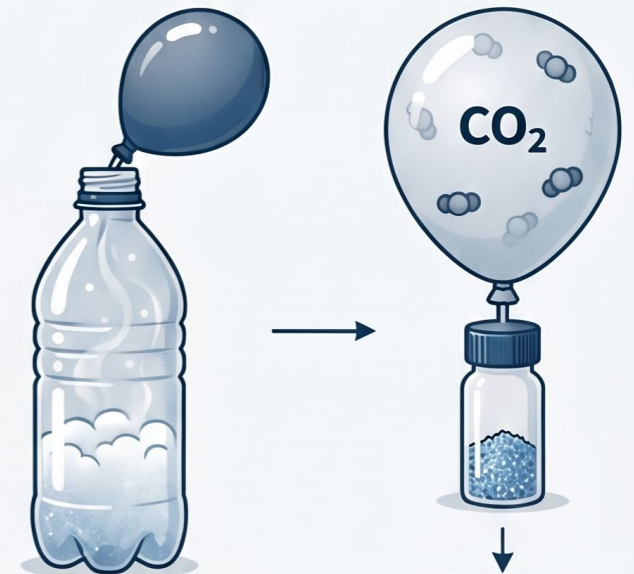
HKUST-1



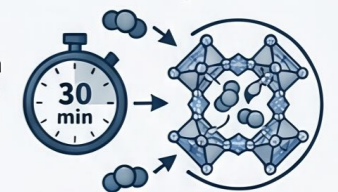
AlF

HKUST-1 e AlF possiedono aree superficiali enormi (oltre 1000 m<sup>2</sup>/g) per intrappolare gas.

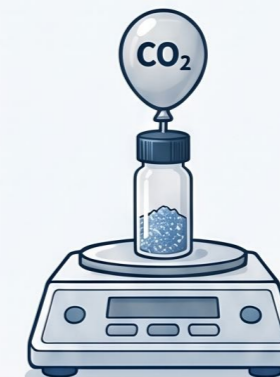
#### Procedura Sperimentale



**Generazione e Cattura del Gas:**  
Sublimare il ghiaccio secco in una bottiglia e riempire un palloncino con la CO<sub>2</sub> prodotta.



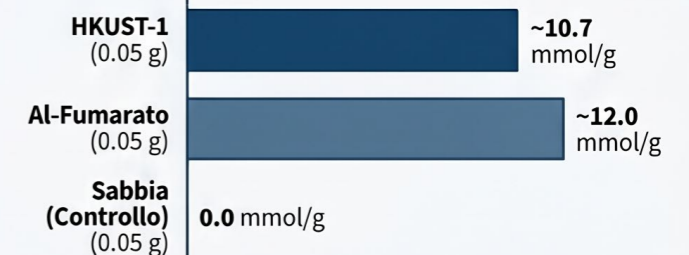
**Fase di Adsorbimento (30 min):**  
Fissare il palloncino a una fiala con 0,05g di MOF attivato e attendere l'adsorbimento.



$$PV = nRT$$

**Pesata Finale e Calcolo:**  
Misurare l'aumento di massa della fiala per calcolare le millimoli di CO<sub>2</sub> catturate.

#### Risultati Tipici (T=296K)



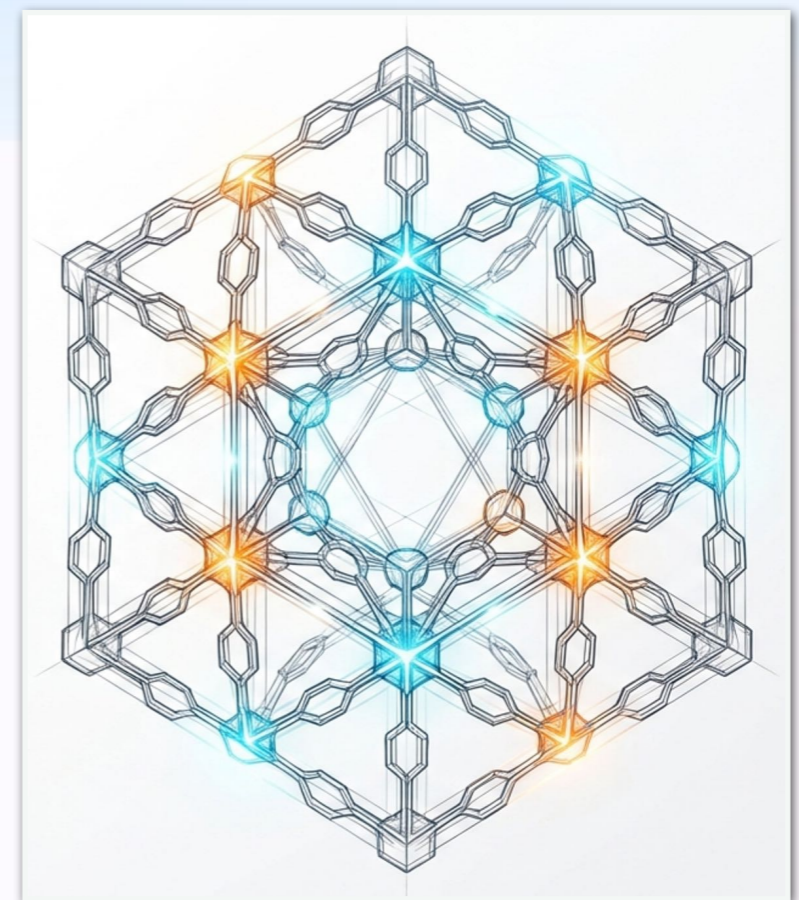


# Elementi di didattica legati ai MOF

Potenzialità didattiche e applicazioni STEM

**Riccardo Peruzzini**

28 aprile 2026



*Immagini generate con supporto di Gemini*