

I plasmi: la materia delle stelle... e dei nostri laboratori

L'Istituto per la Scienza e la Tecnologia dei Plasmi rappresenta un punto di riferimento per la ricerca avanzata sui plasmi cosiddetti freddi, plasmi fuori dall'equilibrio termodinamico.

Plasmi di bassa temperatura • Modellizzazione e simulazione dei plasmi
Cinetica dei plasmi • Diagnostiche di plasma

Istituto per la Scienza e la Tecnologia dei Plasmi

Dipartimento di Scienze Fisiche e Tecnologie della Materia

I plasmi freddi

Nei plasmi freddi lo stato del sistema è governato dalle collisioni tra particelle (molecole, atomi ed elettroni) e non può essere descritto in modo accurato da grandezze macroscopiche come la temperatura. Le specie chimiche immagazzinano energia nei gradi di libertà interni e gli stati eccitati che vengono a formarsi possono attivare meccanismi reattivi altrimenti inaccessibili, che portano alla formazione di prodotti specifici in modo preferenziale.

Nei plasmi freddi lo stato del sistema è governato dalle collisioni tra particelle e non può essere descritto in modo accurato da grandezze macroscopiche come la temperatura.

Per parlare delle collisioni, pensiamo a un'altalena, o a una spesa al mercato della frutta... cosa hanno in comune un'altalena, la collisione di due molecole e la spesa al mercato della frutta? Parecchio! La tecnologia che sta dietro la produzione ortofrutticola, per esempio, si alimenta con la scienza di base, quella che studia fenomeni apparentemente lontani dalla vita quotidiana, ma le cui applicazioni cambiano in meglio la vita delle persone. Lo studio teorico-

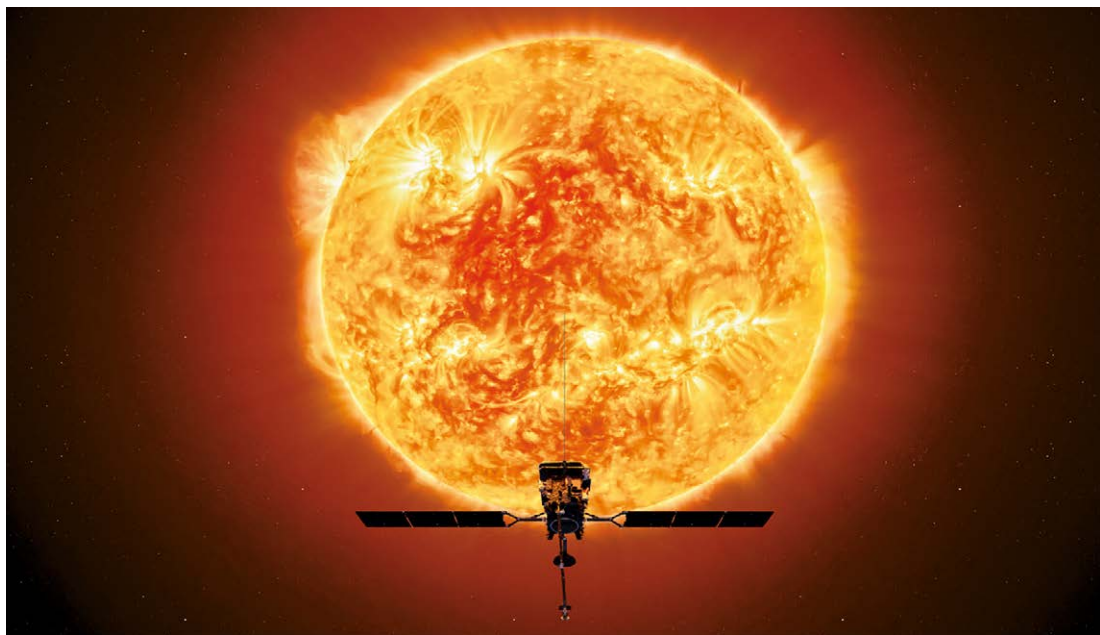
computazionale delle collisioni molecolari, condotto molto, ma molto in dettaglio (sia in fase gassosa che con le superfici solide),

in ISTP-Bari, permette di sapere come progettare dispositivi in grado, per esempio, di produrre fertilizzanti dall'aria e dall'energia del Sole, convertendo rapidamente rifiuti organici, che nessuno vorrebbe vicino casa, in fondamentale nutrimento per le piante, senza inquinare. Anche l'anidride carbonica, responsabile dell'effetto serra, potrebbe essere distrutta così, ottenendo carburante liquido dal Sole: da problema a soluzione!

E l'altalena? Ci sono delle specie chimiche che vanno demolite per ottenerne di nuove, molto più utili. Se le rompiamo in maniera brutale, sprechiamo tanta energia, aumentando i costi del prodotto finale, per esempio della frutta. Possiamo invece dare una serie di piccole spinte alle molecole al momento giusto, proprio come un'altalena, per farle andare avanti e indietro così forte che a un certo punto si spezzano, usando meno energia dei processi convenzionali. Per farlo, si usano plasmi di non-equilibrio, miscele gassose in cui la carica elettrica delle molecole serve per guidare opportunamente i processi, in maniera molto più flessibile che in condizioni di equilibrio. Ma occorre lavorare tanto per ottenere risultati, simulando le spinte con la dinamica molecolare [1] di differenti

specie chimiche molto in dettaglio, studiando come cambiano nel tempo tante specie chimiche operanti simultaneamente, usando la cinetica chimica.

Questa metodologia teorico-computazionale permette di studiare queste e molte altre cose, con applicazioni principalmente nei campi dell'energia e dell'aerospazio, in stretta collaborazione con una comunità di scienziati che non ha confini geografici.



Satellite Solar Orbiter in prossimità del Sole (Credit: ATG Europe-ESA).

I modelli descrittivi

L'ISTP Bari, in particolare i ricercatori del gruppo PKP "Plasma kinetics & Processes", ha sviluppato modelli chimico-fisici avanzati che, per il loro carattere fondamentale, consentono di modellizzare sistemi in condizioni molto diverse.

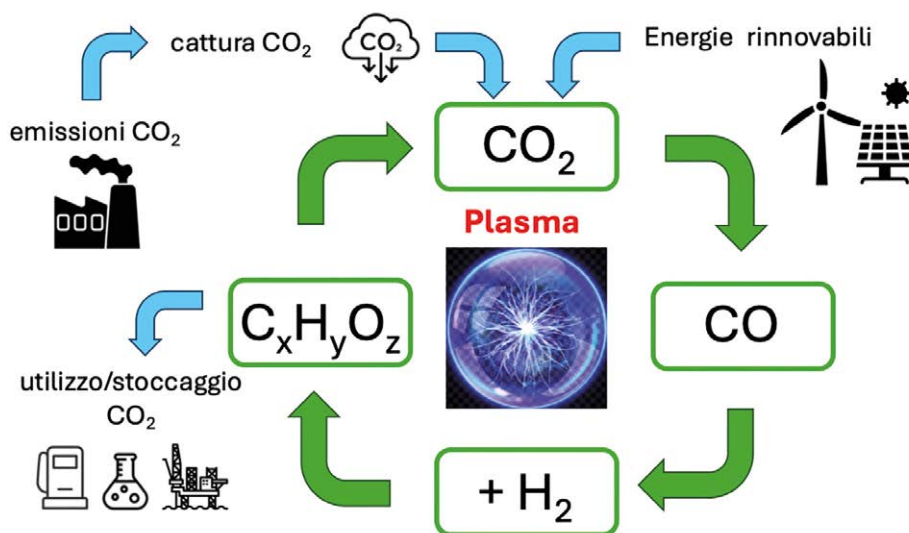
Un esempio significativo è la conversione della CO_2 tramite scariche elettriche che, riscaldando selettivamente gli elettroni nel gas, promuovono l'eccitazione della vibrazione della molecola di anidride carbonica e determinano la sua dissociazione, in condizioni più favorevoli rispetto ai meccanismi di decomposizione termica. Pertanto, il plasma si candida come tecnologia abilitante a servizio delle strategie globali di decarbonizzazione, contribuendo sia all'avanzamento scientifico sia alla definizione del ruolo dei plasmi di bassa temperatura nel settore energetico/ambientale.

Modelli cinetici dettagliati sono stati impiegati con successo anche nell'indagine delle condizioni di ingresso di veicoli spaziali in atmosfere planetarie, dove la velocità ipersonica viene dissipata dai processi termochimici e dalla radiazione. La caratterizzazione del plasma nell'onda d'urto, generata dall'impatto del veicolo sull'atmosfera, è importante per la simulazione dei flussi di calore a parete. I moduli cinetici implementati in codici fluidodinamici hanno mostrato di incrementare il carattere predittivo delle simulazioni, con ricadute sulla progettazione degli scudi termici, tematica inquadrata nelle attività dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA) e della NASA per l'esplorazione dei pianeti del Sistema Solare.

In quest'ottica si inserisce anche lo studio del plasma di cui è fatta la materia visibile dell'Universo, come quella del Sole, delle stelle, dello spazio interstellare e dei nuclei galattici attivi. Se ne occupano i ricercatori del gruppo di Plasmi Spaziali e astrofisici che studiano i processi fondamentali [2] e le dinamiche cruciali per capire il funzionamento dell'Universo, ma anche per le possibili applicazioni tecnologiche, adottando un approccio integrato tra analisi di dati sperimentali, teoria e simulazioni numeriche. I dati provengono dalle sonde dei satelliti, che misurano particelle e campi elettromagnetici *in situ*, e da telescopi che osservano, da remoto, le emissioni di oggetti lontani. Si affianca l'analisi dei dati osservativi a simulazioni numeriche, che sfruttano tecniche di calcolo parallelo, e a studi teorici volti a predire e interpretare le osservazioni sperimentali. Le tematiche di maggior interesse sono i fenomeni complessi, quali la turbolenza o i complicati processi di interazione tra campi elettromagnetici e particelle, che avvengono nei plasmi astrofisici, come ad esempio il mezzo circumterrestre, il Sole, le stelle e il mezzo interstellare.

I laboratori virtuali

Per studiare i comportamenti complessi, che i plasmi di basse temperature spesso mostrano, comporta-



Cattura, utilizzo e stoccaggio della CO₂.

menti multi-scala e caotici, le simulazioni numeriche sono diventate uno strumento fondamentale per ricostruire e prevedere il funzionamento dei gas in varie configurazioni di scariche elettriche, in diversi contesti, o per scoprire nuovi fenomeni fisici e orientare lo sviluppo tecnologico. Il Laboratorio virtuale di plasmi freddi utilizza tecniche computazionali [3] tipiche dei gas ionizzati, della fisica atomica e molecolare, dell'elettromagnetismo e della cinetica chimica in diversi campi:

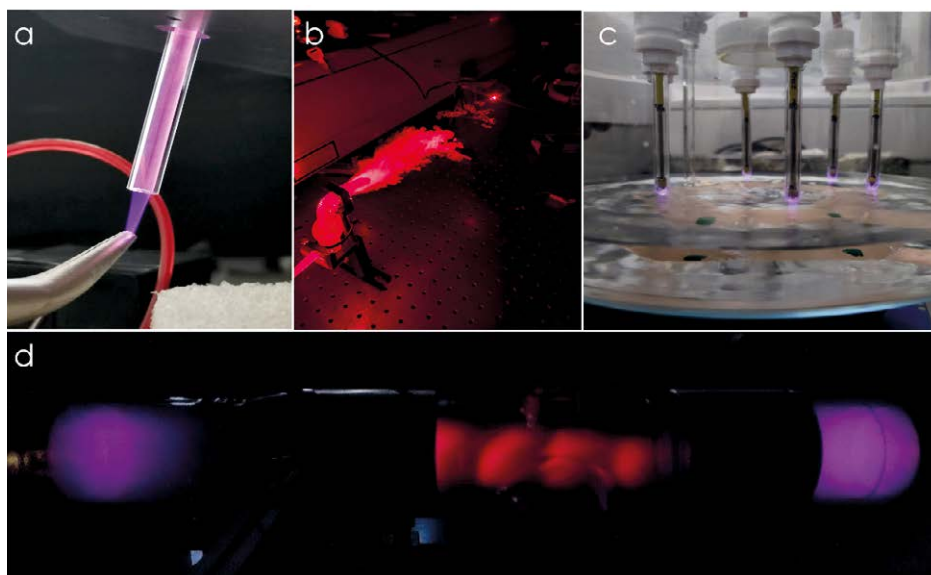
- i motori ionici per la propulsione spaziale. In questo ambito, i plasmi sono usati per generare spinta nei satelliti e nelle sonde. Le simulazioni aiutano a ottimizzare l'efficienza del funzionamento, a ridurre il consumo di propellente e a prolungare la durata operativa dei propulsori;
- i maser passivi, dispositivi impiegati come orologi atomici nei sistemi di navigazione satellitare. Qui, i plasmi sono usati per produrre atomi di idrogeno in uno stato eccitato. Le simulazioni consentono di modellare il flusso e l'interazione dell'idroge-

no con le pareti, per migliorarne la resa e la stabilità;

- l'interazione tra plasma e parete in reattori per la fusione termonucleare controllata, un tema cruciale per la futura produzione di energia pulita. Il gas ionizzato ad altissima temperatura, dell'ordine di cento milioni di gradi nella parte centrale, interagisce con la parete nella parte periferica. Le simulazioni descrivono come le particelle cariche si comportano vicino alle pareti del reattore. Si possono in questo modo prevedere i danni e suggerire soluzioni tecnologiche che ottimizzino sia le operazioni dei reattori

che la ricerca di materiali più resistenti;

- le sorgenti di ioni per acceleratori, dove il plasma produce fasci ionici da inviare verso bersagli (fabbricazione di microcircuiti) o per l'alimentazione e il riscaldamento di reattori a fusione nucleare. La modellazione numerica serve a migliorare la qualità e la stabilità del fascio generato;
- le scariche elettriche in gas per attivare reazioni chimiche a bassa energia, usate in trattamenti di superficie e produzione di specie reattive utili nel settore ambientale e biomedico.



Esempi di plasmi a pressione atmosferica: a) un plasma-jet in elio alimentato da microonde; b) una nebbia attivata da plasma per applicazioni agroalimentari; c) scariche per l'attivazione dell'acqua d'irrigazione; d) un plasma a bassa pressione: la "negative glow" viola ai catodi e la "positive column" al centro, con il "Faraday dark space" che le separa.

Le tecnologie sperimentali

Affianco alle metodologie computazionali, l'ISTP ha sviluppato le metodologie per studiare sperimentalmente i plasmi utilizzando la spettroscopia di emissione ottica, che osserva la luce emessa dal plasma per identificarne atomi e molecole e stimare, ad esempio, temperatura e densità elettronica. In alternativa, i laser vengono impiegati per eccitare le singole specie chimiche e analizzarne con estrema precisione l'emissione ottica.

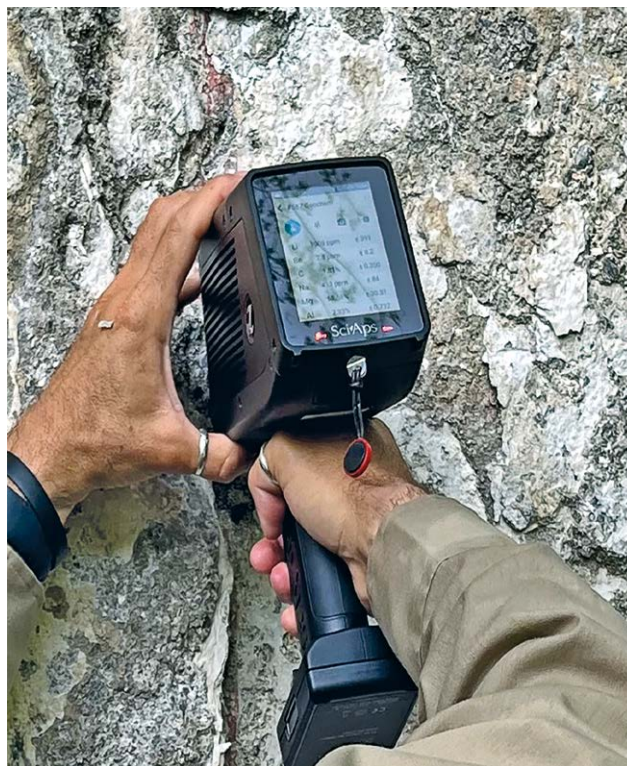
In un'ottica di sostenibilità, i plasmi a bassa temperatura trovano applicazione anche in agricoltura e nel settore alimentare. La *plasma agriculture* è una frontiera emergente che impiega il plasma freddo per stimolare la germinazione dei semi, rafforzare le difese naturali delle piante e sanificare superfici senza l'uso di pesticidi. Una tecnologia pulita e promettente per un'agricoltura sostenibile [4].

Parallelamente, l'ISTP ha sviluppato competenze nella spettroscopia dielettrica applicata alla risposta a stimoli ambientali di dispositivi costituiti da biomateriali naturali e biodegradabili ottenuti con tecniche sostenibili. Questi includono melanine estratte dai prodotti del metabolismo di rifiuti umidi delle mosche soldato nere fornite dalla startup INSECTTA di Singapore, e dai semi di cumino neri in collaborazione con l'Università di Camerino. Questi materiali si sono rivelati ideali per sensori elettronici biocompatibili "free touch", sempre più richiesti in ambito medico, ambientale e agricolo.

Vedasi il caso della spettroscopia di impedenza che viene utilizzata per sviluppare strumenti diagnostici avanzati, per contrastare la diffusione della Xylella in collaborazione con altri Istituti CNR, contribuendo alla tutela del territorio e alla salute delle coltivazioni.

Un'altra metodologia spettroscopica interessante, la LIBS, acronimo di Laser Induced Breakdown Spectroscopy, è basata sull'uso di laser e consente di eseguire un'analisi chimica in tempo reale.

L'ISTP si è dotato di un innovativo strumento LIBS Portatile per indagini in campo, uno strumento compatto e leggero utilizzabile da un singolo individuo senza alcuna preparazione del campione. Diventa così possibile svolgere un'analisi rapida, quantitativa e qualitativa della composizione di vegetali, suoli, rocce, minerali, metalli, sedimenti, meteoriti o reperti archeologici, anche in ambienti ostili. A titolo di esempio, la LIBS portatile [5], insieme a tecniche analitiche e di imaging, viene oggi impiegata sia per studiare il degrado delle murature antiche in pietra a Bari, allo scopo di proteggere gli edifici storici in



Applicazione della LIBS portatile *in situ*.

calcare dagli agenti atmosferici, sia per sviluppare metodologie innovative sulla nutrizione minerale delle colture pugliesi, quali l'uva da tavola (in collaborazione con l'Università di Bari) per ottimizzare la gestione delle risorse non rinnovabili, sia per lo studio dei meteoriti sul campo di ritrovamento (in collaborazione con il CNRST del Marocco).

Riferimenti bibliografici

- [1] R. CELIBERTO *et al.*, "Atomic and Molecular Data for Spacecraft Re-Entry Plasmas", *Plasma Sources Science and Technology*, 25, 3, 2016.
- [2] O. PEZZI *et al.*, "Turbulence and particle energization in twisted flux ropes under solar-wind conditions", *Astronomy & Astrophysics*, 686, 2024.
- [3] I. LEVCHENKO *et al.*, "Perspectives, frontiers, and new horizons for plasma-based space electric propulsion", *Physics of Plasmas*, 27, 2, 2020.
- [4] P.R. ROTONDO *et al.*, "Physicochemical properties of plasma-activated water and associated antimicrobial activity against fungi and bacteria", *Scientific Reports*, 15, 5536, 2025.
- [5] G.S. SENESI, O. DE PASCALE, *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) In-Situ: From Portable to Handheld Instrumentation*, in S. D'AMICO, V. VENUTI (a cura di), *Handbook of Cultural Heritage Analysis*, Springer, Cham 2022.