



Sebastiano Campagna^a, Marcella Bonchio^b,
Margherita Venturi^c, Franco Scandola^d

^aUniversità di Messina e Centro di Ricerca Interuniversitario
per la Conversione Chimica dell'Energia Solare
(SOLAR-CHEM), sezione di Messina

campagna@unime.it

^bITM-CNR, Università di Padova e SOLAR-CHEM,
sezione di Padova

marcella.bonchio@unipd.it

^cUniversità di Bologna e SOLAR-CHEM, sezione di Bologna

margherita.venturi@unibo.it

^dUniversità di Ferrara e SOLAR-CHEM, sezione di Ferrara

snf@unife.it

VERSO LA FOTOSINTESI ARTIFICIALE: COMPETENZE, STRUTTURE E PROGETTI DI RICERCA NEL SETTORE

La fotosintesi artificiale, ovvero la conversione diretta di energia solare in energia chimica attraverso la sintesi fotoindotta di specie chimiche ad alta energia, quali idrogeno e altri combustibili, a partire da specie a bassa energia come acqua e anidride carbonica, un processo ispirato alla fotosintesi naturale, è stato per lungo tempo un sogno inseguito dalla comunità scientifica internazionale. Gli sviluppi degli ultimi anni permettono adesso di affrontare il problema con buone speranze di successo. L'articolo presenta una breve panoramica delle problematiche relative alla fotosintesi artificiale, delle strutture e dei progetti di ricerca nel settore attualmente presenti nei vari Paesi, con particolare attenzione per gli studi che vengono portati avanti dai ricercatori del SOLAR-CHEM, centro interuniversitario italiano per la conversione chimica dell'energia solare.

Un po' di storia e uno sguardo alla situazione internazionale

"...On the arid lands there will spring up industrial colonies without smoke and without smokestacks; forests of glass tubes will extend over the plains and glass buildings will rise everywhere; inside of these will take place the photochemical processes that hitherto have been the guarded secret of the plants, but that will have been mastered by human industry which will know how to make them bear even more abundant fruit than nature, for nature is not in a hurry and mankind is. And if in a distant future the supply of coal becomes completely exhausted, civilization will not be checked by that, for life and civilization will continue as long as the sun shines! If our black and nervous civilization, based on coal, shall be followed by a quieter civilization based on the utilization of solar energy, that will not be harmful to progress and to human happiness."

Questa è la conclusione della celebre conferenza intitolata "La fotochimica del futuro", tenuta da Giacomo Ciamician a New York nel 1912, nell'ambito del Congresso Internazionale di Chimica Applicata [1], di cui cade il centenario proprio quest'anno. Nonostante siano trascorsi 100 anni i contenuti della conferenza sono di estrema attualità; Ciamician, infatti, prefigura la possibilità di utilizzare l'energia solare, gratuita, ben distribuita sulla Terra e virtualmente infinita, per produrre energia sotto forma di carburanti, attraverso un processo ispirato alla fotosintesi dei sistemi naturali, detto fotosintesi artificiale, che è stato per decenni un lontano Sacro Graal della ricerca scientifica. Data la complessità del processo naturale ("il segreto custodito dalle piante"), gli studi scientifici nel settore si sono finora "accontentati" di utilizzare i primi stadi alla base della fotosintesi, ovvero assorbimento di luce e separazione di carica, per sviluppare il processo di conversione dell'energia solare in energia elettrica, che è oggi alla base dei sistemi foto-



Fig. 1 - Paragone tra consumo di elettricità e combustibili in Italia nel 2010

voltaici. Il processo fotosintetico completo, però, non si arresta alla separazione di carica; procede infatti con la conversione dell'energia solare in energia chimica sotto forma di specie chimiche ad alta energia, a partire da specie poco energetiche e ampiamente diffuse, quali acqua e anidride carbonica, senza l'intervento di nessuna altra forma esterna di energia, esclusa quella solare. Con questa conversione in energia chimica, la fotosintesi risolve anche i problemi legati all'irradiazione solare, ovvero l'intermittenza e la bassa concentrazione dell'energia: le specie chimiche ad alta energia prodotte (nel caso del sistema naturale, carboidrati, mentre nel caso dei processi artificiali si guarda con interesse alla produzione di idrogeno molecolare o di metano) sono infatti immagazzinabili e rappresentano forme di energia concentrata. L'energia chimica infatti ha innegabili vantaggi rispetto all'energia elettrica: è, oltre che concentrata e immagazzinabile, anche facilmente trasportabile a costi bassi (tranne alcune, rilevanti, eccezioni quali l'idrogeno); inoltre, cosa ancora più importante, è che la nostra civiltà ha bisogno di carburanti (ovvero di energia chimica) molto più che di energia elettrica, che è solo una delle forme di energia e fra l'altro neanche la più usata: il nostro Paese (e anche la Terra nella sua globalità) ne ha già a sufficienza (Fig. 1). Lo sviluppo di un'efficace fotosintesi artificiale rimane pertanto una necessità per un futuro ecosostenibile e pacifico.

Mentre nel secolo passato la ricerca applicata nel campo della conversione dell'energia solare si andava sempre più concentrando sul fotovoltaico, la ricerca collegata alla fotosintesi naturale ed artificiale ha dovuto attendere lo sviluppo di teorie e scoperte chiave per essere affrontata sistematicamente. La ricerca moderna sulla fotosintesi artificiale ha infatti le sue radici nei lavori scientifici apparsi all'inizio degli anni Settanta del secolo scorso, che hanno posto le basi per la comprensione dei processi fotoindotti di trasferimento elettronico in specie molecolari. Tali studi hanno mostrato la possibilità reale di ottenere lo splitting fotochimico dell'acqua nei suoi componenti molecolari, H_2 ed O_2 , utilizzando esclusivamente energia solare. Ad indicare un legame virtuale con le predizioni di Giacomo Ciamician, uno dei gruppi di ricerca leader a livello mondiale nello studio dei trasferimenti elettronici fotoindotti è stato quello guidato da Vincenzo Balzani, con sede presso il Dipartimento di Chimica dell'Università di Bologna, intitolato proprio a Ciamician [2].

Un impulso decisivo alla ricerca in questo campo è poi avvenuto negli anni Ottanta e Novanta, segnati dalla nascita della fotochimica supramolecolare, ancora dovuta alla scuola fotochimica italiana di Bologna e Ferrara [3, 4]. Negli stessi anni gli studi sulla caratterizzazione strutturale dei centri di reazione e dei sistemi antenna dei sistemi fotosintetici naturali [5, 6], insieme allo sviluppo e alla diffusione delle tecniche spettroscopiche risolte nella scala dei femtosecondi [7], hanno permesso una maggiore comprensione dei processi molecolari alla base della fotosintesi naturale.

Infine, un importante tassello per la comprensione dei processi naturali, e quindi verso la possibilità concreta di realizzare una fotosintesi artificiale, si è aggiunto nell'ultima decade, grazie alla caratterizzazione strutturale dell'*oxygen evolving complex* (OEC) dei sistemi naturali [8, 9].

La struttura generale schematica di un sistema fotosintetico artificiale era comunque stata definita dal gruppo di ricerca di Balzani già alla fine del secolo scorso [10, 11].

Tale schematizzazione, mostrata in Fig. 2, comprende: (i) un insieme di cromofori (l'antenna), avente il ruolo di assorbire luce solare e convogliarla ad un sito specifico (la trappola energetica) attraverso una serie di trasferimenti energetici fotoindotti intramolecolari (la funzione compiuta dall'antenna è quindi quella di convertire energia solare in energia elettronica e dirigerla in un sito specifico); (ii) un centro di reazione, costituito da una serie di specie redox-attive, in cui l'energia solare, convertita in energia elettronica e convogliata nello stato eccitato della trappola energetica, è utilizzata per compiere una serie di processi di trasferimento elettronico che portano alla separazione delle cariche (la funzione del centro di reazione è quindi la trasformazione dell'energia elettronica in energia redox); (iii) catalizzatori multielettronici, capaci di accumulare cariche (elettroni o lacune elettroniche) per compiere processi multielettronici quali l'ossidazione dell'acqua ad ossigeno molecolare e la riduzione dei protoni ad idrogeno molecolare. Negli ultimi 15 anni lo schema di Fig. 2 è poi stato utilizzato, con lievi modifiche, da vari gruppi [12].

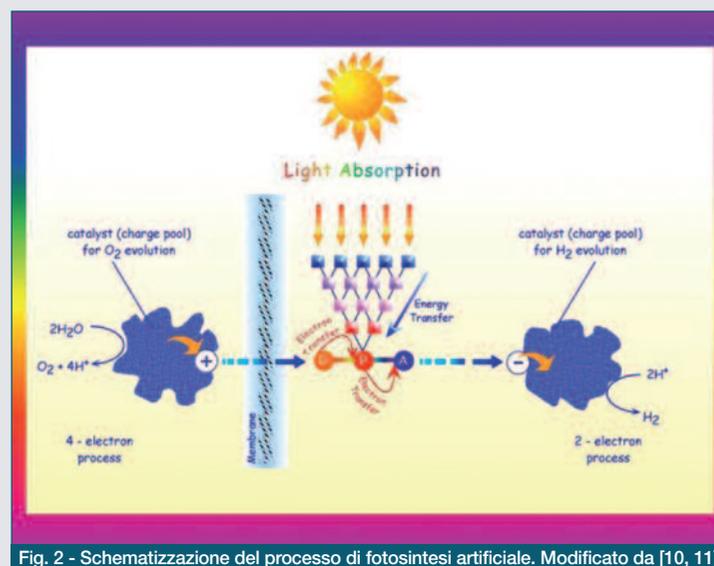


Fig. 2 - Schematizzazione del processo di fotosintesi artificiale. Modificato da [10, 11]

CHIMICA & ENERGIA



Fig. 3 - Alcuni dei principali centri di ricerca interuniversitari per la fotosintesi artificiale. Legenda: A: NSF Center for Chemical Innovation (USA); B: Joint Center for Artificial Photosynthesis (USA); C: Research Triangle Solar Fuels Institute (USA); D: Center for Bio-Inspired Solar Fuel Production (USA); E: Argonne-Northwestern Solar Energy Research Center (USA); F: Korean Center for Artificial Photosynthesis (Sud Corea); G: SolarCap (Gran Bretagna); H: Swedish Consortium for Artificial Photosynthesis; I: Towards BioSolar Cell (Paesi Bassi); L: SolarChem (Italia); M: Institute for Clean Energy (Cina); N: Solar Energy Conversion Cluster (Irlanda); O: Artificial Photosynthesis - Catalunya (Spagna)

A partire dai primi anni del 2000, grazie all'accumulo delle conoscenze chiave sulla fotosintesi naturale e sui processi fotoindotti di trasferimento elettronico ed energetico in sistemi molecolari e supramolecolari, con lo sviluppo delle nuove tecniche sintetiche basate sulla chimica supramolecolare e con le potenti capacità investigative della spettroscopia ultraveloce, il quadro è pronto per la realizzazione di sistemi in grado di realizzare efficaci processi fotosintetici artificiali. Che i tempi fossero ormai maturi per compiere questo passo fondamentale nella ricerca scientifica è ulteriormente dimostrato dagli sforzi, anche economici, profusi in questa direzione dalla comunità scientifica internazionale, riunitasi a Bethesda, Washington DC nel 2005 nell'ambito di un incontro organizzato dall'U.S. Department of Energy (DOE).

Nel corso di questa riunione, convocata esclusivamente ad invito dal DOE, circa 200 scienziati, inclusi due degli autori di questo articolo, sono stati definiti i passi fondamentali da compiere per superare gli ultimi ostacoli ed arrivare all'utilizzo efficace dell'energia solare e, in particolare, alla realizzazione della fotosintesi artificiale [13].

Da allora, nella maggior parte dei Paesi industrializzati, gruppi di ricerca di varie università ed enti di ricerca si sono riuniti in centri specifici per raggiungere la massa critica necessaria ad affrontare con successo l'importante sfida scientifica. Di seguito sono elencati alcuni di tali centri (vedi Fig. 3):

- *NSF Center for Chemical Innovation: Powering the Planet* (www.ccisolar.caltech.edu/): fondato nel 2005 con la partecipazione di cinque gruppi di ricerca, ha ricevuto nuova linfa nel 2008 grazie ad un finanziamento *ad hoc* della NSF (4 M\$/anno fino al 2017). Attualmente ne fanno parte ricercatori di 19 università, tra cui CalTech, MIT, California State, Brookhaven National Laboratory, University of Rochester, Michigan State, Penn State;

- *DoE Joint Center for Artificial Photosynthesis* (<http://solarfuelshub.org/>): fondato nel 2009 e finanziato dall'U.S. DOE con 122 M\$ per cinque anni, comprende ricercatori del CalTech, del Berkeley National Laboratory e di altre università californiane;

- *Korean Center for Artificial Photosynthesis*: fondato nel 2009, ha il suo "quartier generale" nella Sogang University in Corea, dove un Dipartimento di nuova costruzione è interamente dedicato a ricerche sulla fotosintesi artificiale;

- *Energy Frontier Research Center: Solar Fuels at UNC* (<http://www.efrc.unc.edu/index.html>): fondato nel 2009 dall'U.S. DOE, include, tra l'altro, la University of North Carolina at Chapel Hill, la Duke University, la University of Florida, il Research Triangle Solar Fuel Institute (a sua volta una federazione di università della Nord Carolina), il Georgia Institute of Technology e la University of Maryland. È finanziato dall'U.S. DOE con più di 16 M\$/anno su base quinquennale;

- *Argonne-Northwestern Solar Energy Research Center* (<http://www.ansercenter.org/>): fondato nel 2009 e finanziato dall'U.S. DOE, comprende Northwestern University, Argonne National Laboratory, University of Chicago, Yale University, University of Illinois at Urbana-Champaign;

- *Center for Bio-Inspired Solar Fuel Production* (<http://solarfuel.clas.asu.edu/>): include ricercatori dell'Arizona State University e della University of Arizona;

- *SolarCap - Consortium for Artificial Photosynthesis* (www.solarcap.org.uk/default.asp): è un consorzio britannico, fondato nel 2009 e comprendente ricercatori delle Università di York, di East Anglia, di Manchester e di Nottingham. È stato recentemente finanziato con 1,7 M£ su base triennale dall'Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) inglese. L'EPSRC ha anche finanziato, con 4 M£, il progetto *New and Renewable Solar Routes to Hydrogen* (www3.imperial.ac.uk/energyfutureslab/research/grandchallenges/solarhydrogen), che ha come capofila l'Imperial College, e, con 1,6 M£, il progetto *Artificial Photosynthesis: Solar Fuels* (www.glasgow-solarfuels.com/index.html), guidato dall'Università di Glasgow;

- *Solar Energy Conversion Cluster-SEC* (<http://www.seccluster.ie/>): è stato finanziato con 4,7 M€ per sei anni e comprende, dal 2007, la Dublin City University, la University College Dublin e la Limerick University;

- *Swedish Consortium on Artificial Photosynthesis* (www.fotomol.uu.se/Forskning/Biomimetics/consortium/index.shtml): è l'antesignato dei centri interuniversitari mirati alla ricerca sulla fotosintesi artificiale. Fondato nel 1994, comprende le università di Uppsala, di Lund, di Stoccolma e il KTH di Stoccolma. Partecipa attualmente al progetto *Solar-H2*, che include 12 laboratori europei e che è finanziato con circa 4 M€ dalla Comunità Europea;

- *Towards BioSolar Cell*: finanziato nel 2009 con 25 M€ dal governo

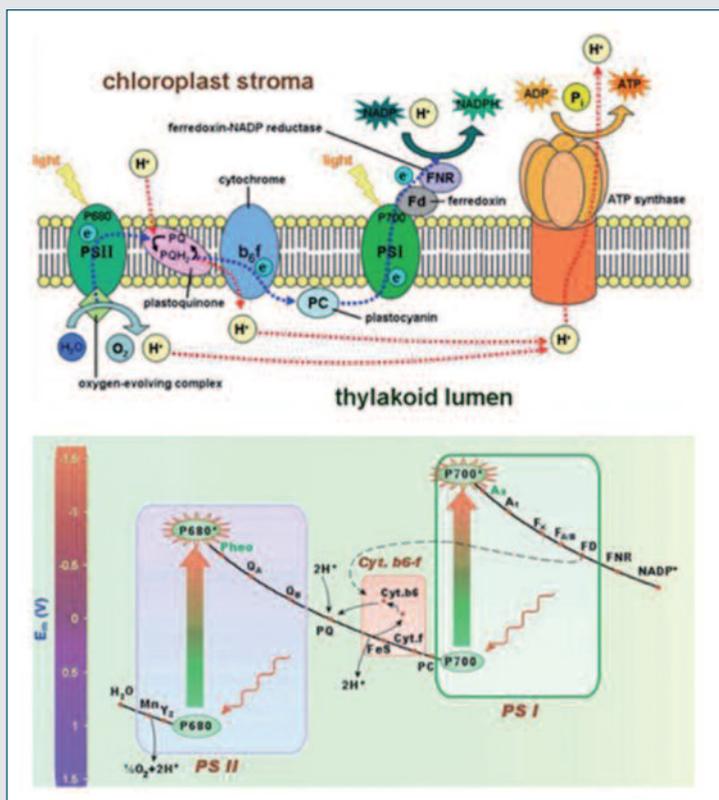


Fig. 4 - Rappresentazione schematica dei processi coinvolti nella fotosintesi naturale

olandese, comprende tra l'altro gruppi di ricerca delle università di Leiden, Amsterdam, Groningen e Delft;

- altri centri analoghi sono presenti o in preparazione in vari Paesi, quali Spagna (per esempio, il Progetto Fotosintesi artificiale in Catalogna, con sede a Tarragona), Giappone, Brasile, Australia, Francia e Cina, dove nel 2011 è stato ufficialmente inaugurato l'Institute for Clean Energy, che è adesso parte della Chinese Academy Institute of Chemical Physics in Dalian.

Contemporaneamente alla nascita e allo sviluppo di Centri Interuniversitari per lo studio della fotosintesi artificiale, il crescente interesse della comunità internazionale su questa tematica è diventato sempre più evidente dall'organizzazione di specifici congressi internazionali dedicati all'argomento, compresi congressi organizzati all'interno di serie di conferenze altamente prestigiose: nel solo 2011 si sono infatti tenuti numerosi congressi specifici, per esempio in Australia, Repubblica Ceca, Francia, Stati Uniti, Grecia, Regno Unito, inclusa la *Faraday Discussion on Artificial Photosynthesis* svoltasi a Edinburgo nel settembre 2011 (www.rsc.org/ConferencesAndEvents/RSCConferences/FD/faraday-discussion-155.asp). Una nuova serie di Gordon Research Conferences, denominata *Renewable Energy: Solar Fuels*, è stata inserita ufficialmente all'interno di questa prestigiosa organizzazione dal 2009. La terza edizione della Gordon Research Conference on Solar Fuels si è tenuta dal 13 al 18 maggio 2012 al Ciocco, in Italia (www.grc.org/programs.aspx?year=2012&program=renewable), anche in riconoscimento del contributo fornito nel campo da gruppi di ricerca italiani.

Uno sguardo alla situazione italiana: il centro di ricerca interuniversitario per la conversione chimica dell'energia solare (SOLAR-CHEM)

In Italia, la ricerca sulla fotosintesi artificiale ha recentemente portato alla creazione del *Centro di ricerca interuniversitario per la conversione chimica dell'energia solare (SOLAR-CHEM)*. Tale Centro è stato istituito nel 2009 - un anno chiave per la costituzione dei centri internazionali sulla fotosintesi artificiale, come ben si evince dalle informazioni riportate sopra - ed ha come soci fondatori le università di Ferrara (Dipartimento di Scienze Chimiche), di Messina (Dipartimento di Chimica Inorganica, Chimica Analitica e Chimica Fisica) e di Bologna (Dipartimento di Chimica "G. Ciamician").

Raggruppa cioè i laboratori italiani che, come anche già citato precedentemente, sono tra i fondatori della moderna ricerca sulla fotosintesi artificiale e che hanno profondamente contribuito negli ultimi 35 anni allo sviluppo di questo settore a livello internazionale.

Solidamente integrato con altri gruppi di ricerca internazionali e coinvolto in una vasta rete di collaborazioni, il Centro SOLAR-CHEM nei pochi anni intercorsi dalla sua fondazione si è ulteriormente ingrandito

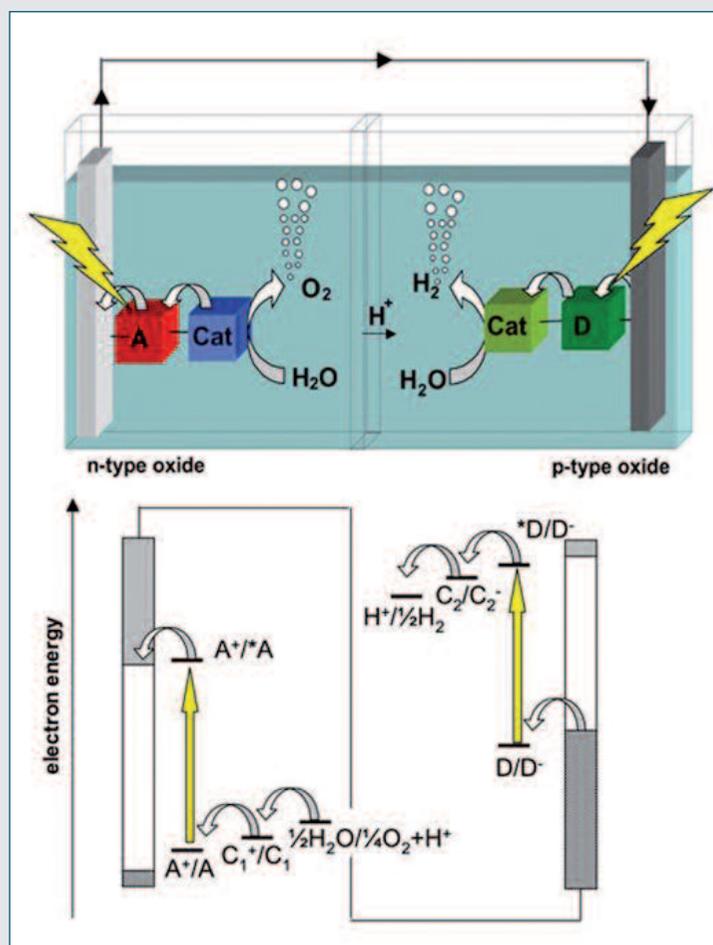


Fig. 5 - Schematizzazione di una cella fotoelettrolitica per la fotosintesi artificiale, con produzione fotoindotta di idrogeno e ossigeno, in fase di studio da parte dei ricercatori di SOLAR-CHEM

CHIMICA & ENERGIA

con la partecipazione di ricercatori di altre università, quali Padova e Trieste, così che al momento sono più di 30 i ricercatori che ne fanno parte. Il Centro ha come finalità quella di contribuire, attraverso un approccio interdisciplinare, allo sviluppo di metodologie efficienti per la conversione dell'energia solare in combustibili (fotosintesi artificiale), evidenziando la presenza in Italia di competenze consolidate, coordinate e convergenti e migliorando ulteriormente le attività di collaborazione già in atto tra gruppi di ricerca delle università convenzionate, con condivisione di apparecchiature e di personale. Nell'ambito delle sue attività istituzionali, il Centro promuove la cooperazione e lo scambio scientifico tra gli studiosi, italiani e stranieri, specializzati nello studio della conversione chimica dell'energia solare, inclusi aspetti di fotochimica ed elettrochimica supramolecolare e di trasferimento fotoindotto di energia ed elettroni. Gli obiettivi specifici riguardano: (a) la progettazione di antenne artificiali supramolecolari, di specie multicomponenti per la separazione di carica

fotoindotta, di catalizzatori multielettronici azionati dalla luce; (b) l'integrazione funzionale tra i componenti sopraindicati; (c) la progettazione di macchine e dispositivi molecolari fotoattivi; (d) la messa a punto di materiali semiconduttori funzionalizzati e (e) la conversione fotochimica di substrati a basso contenuto energetico in combustibili.

Il Centro ha inoltre la finalità di promuovere giornate di studio, seminari e convegni, anche a carattere internazionale, favorendo scambi di docenti e ricercatori.

Diverse linee di ricerca sono al momento attive in SOLAR-CHEM. Molte di esse confluiscono in un approccio alla fotosintesi artificiale che prevede la preparazione di celle fotoelettrochimiche per lo splitting fotoindotto dell'acqua.

SOLAR-CHEM: dai concetti di base alle applicazioni

La fotosintesi naturale produce l'energia che sostiene la vita sulla Terra, usando luce solare per scindere l'acqua in ossigeno e idrogeno, che si combina con anidride carbonica per produrre carboidrati. Un'analisi dal punto di vista energetico della conversione dell'energia solare in energia chimica che avviene in natura indica che è la scissione fotoindotta dell'acqua e non la produzione di carboidrati il processo

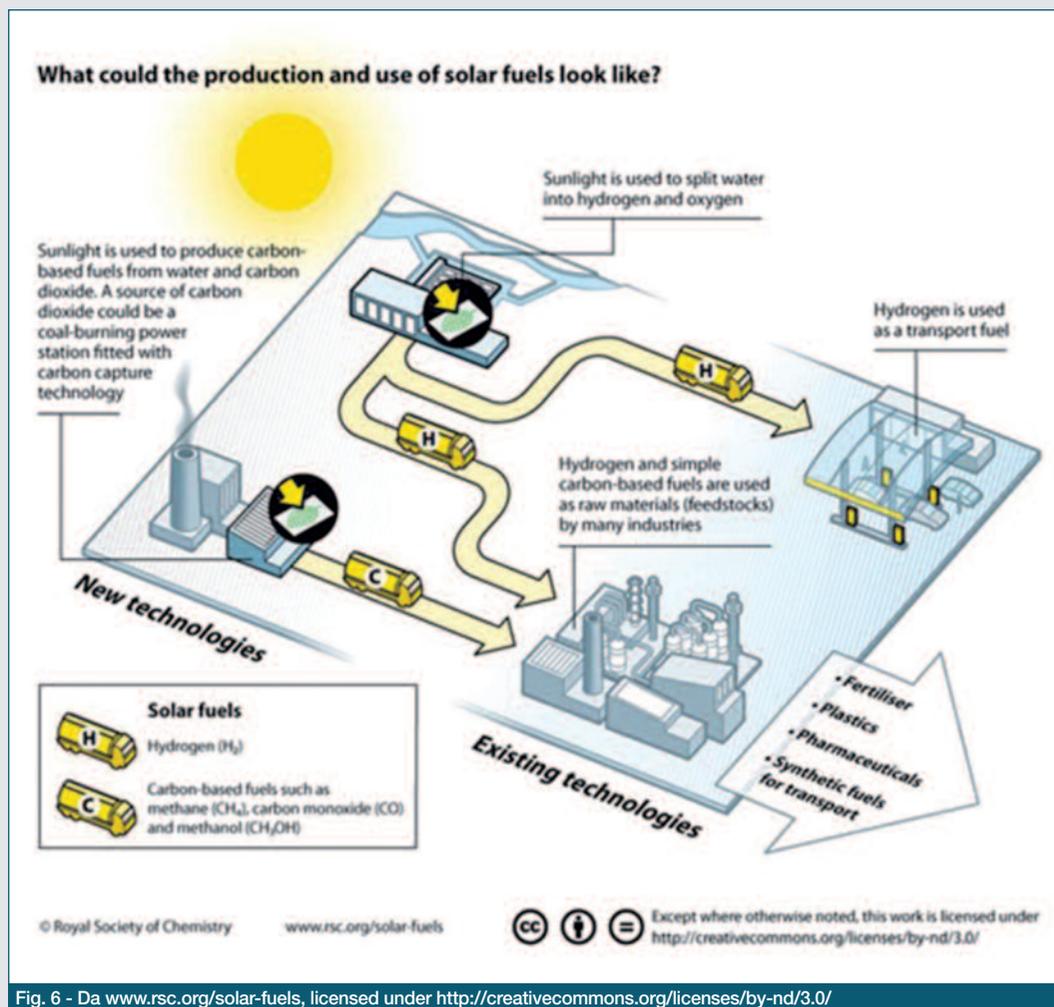


Fig. 6 - Da www.rsc.org/solar-fuels, licensed under <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/>

chiave per immagazzinare l'energia. Il potenziale reversibile della reazione di splitting dell'acqua è infatti 1,23 V, mentre il potenziale per la produzione di carboidrati da acqua e CO₂ è 1,24 V.

Quindi, nella fotosintesi l'energia solare è sfruttata per indurre il processo di scissione dell'acqua: la produzione di carboidrati è soltanto il metodo usato dalla Natura per immagazzinare l'idrogeno prodotto attraverso la scissione dell'acqua.

L'aspetto cruciale per la realizzazione della fotosintesi artificiale consiste pertanto nella capacità di ottenere la fotoscissione dell'acqua attraverso un metodo diretto: il problema non è di facile soluzione anche perché, mentre i processi fotochimici sono inerentemente mono-elettronici, i processi coinvolti nella formazione di idrogeno e ossigeno dall'acqua (vedi Fig. 2) sono multielettronici (lo stesso dicasi per le reazioni tra l'idrogeno e la CO₂ che portano a specie ad alto contenuto energetico). Il problema è stato risolto dalla Natura confinando in "comparti" diversi i processi catalitici e le funzioni di assorbimento di luce e separazione di carica (operate dai sistemi antenna e dai centri di reazione).

La Fig. 4 illustra in breve i meccanismi di base della fotosintesi naturale. PSI e PSII sono i due fotosistemi (ovvero, proteine trans-membrana) che operano di concerto nelle piante verdi per assorbire energia

luminosa e separare le cariche, attraverso una serie di trasferimenti elettronici a cui partecipano, come intermedi, diverse specie all'interno della membrana tilacoide. Le cariche positive (lacune elettroniche) e negative (elettroni) sono immagazzinate da lati opposti della membrana cellulare. In particolare, le cariche positive sono accumulate nell'OEC (oxygen evolving complex), attraverso una sequenza di processi fotoindotti di trasferimento elettronico e protonico che identificano il *Kok-cycle*. La forma altamente ossidata dell'OEC compie il processo multielettronico di ossidazione dell'acqua ad ossigeno molecolare ad un potenziale prossimo a quello termodinamico, con conseguente rilascio di protoni che migrano nella parte opposta della membrana, per ricombinarsi poi con gli elettroni. Il sistema è altamente organizzato nelle dimensioni di spazio, tempo ed energia.

Il progetto per la fotosintesi artificiale di SOLAR-CHEM utilizza un approccio *bottom up* gerarchico di tipo supramolecolare, in cui i componenti molecolari sono strutturalmente organizzati e funzionalmente integrati per realizzare processi altamente complessi e pregiati. Un progetto specifico, ispirato alla fotosintesi naturale, è mostrato in Fig. 5, dove i componenti *D* ed *A* rappresentano l'insieme di sistemi antenna e specie redox-attive (vedi anche Fig. 2) supramolecolari, mentre *Cat* sta ad indicare catalizzatori molecolari multielettronici.

Il ruolo dei componenti della membrana tilacoide per la connessione elettronica delle subunità riduttive ed ossidative è qui svolto dalle connessioni elettriche della cella, mentre il trasferimento protonico (che nel sistema naturale rappresentato in Fig. 4 è realizzato dalla macchina molecolare ATP sintasi) avviene attraverso una membrana artificiale.

L'energia solare che arriva sulla Terra in *un'ora* è superiore all'energia globalmente utilizzata in *un anno* dalla nostra civiltà. Da questa sem-

plice considerazione è comprensibile come lo sviluppo di una efficiente fotosintesi artificiale possa rivoluzionare l'attuale modello di consumi energetici. Inizialmente l'impatto principale si prevede possa essere la fornitura energetica di aree geografiche particolarmente svantaggiate dal punto di vista delle infrastrutture presenti nel territorio (ovviamente i Paesi del terzo mondo, ma anche località montane ed insulari in Italia), ma a medio e lungo termine tutta la rete energetica globale potrebbe essere riconvertita. La Fig. 6 mostra un esempio di come la nuova tecnologia solare possa essere facilmente integrata con esistenti tecnologie: è da notare come il sistema illustrato sia esclusivamente alimentato da energia solare.

Conclusioni

Abbiamo qui voluto mettere in luce la grande rilevanza della fotosintesi artificiale per la soluzione del problema energetico globale, fotografare la situazione generale della ricerca a livello internazionale ed evidenziare la posizione di grande potenzialità della ricerca italiana nel settore. Alla luce della situazione generale sopra esposta, delle ampie, complementari ed eccellenti competenze maturate in Italia nel campo di ricerca specifico, dei processi spontanei di collaborazione e coordinamento in corso fra i gruppi interessati e della fortissima concorrenza attualmente esistente a livello internazionale, riteniamo che la fotosintesi artificiale costituisca un settore di ricerca suscettibile di forte sviluppo e, come tale, meritevole di appropriata attenzione in sede di programmazione delle risorse a livello nazionale e nell'eventuale elaborazione di nuove piattaforme per la ricerca italiana in settori di punta, anche considerati centrali dal programma Horizon 2020.

Bibliografia

- [1] G. Ciamician, *Science*, 1912, **36**, 385.
- [2] V. Balzani *et al.*, *Science*, 1975, **189**, 852.
- [3] Supramolecular Photochemistry, V. Balzani (Ed.), Nato Asi Series C 214, Reidel, Dordrecht, The Netherlands, 1987.
- [4] V. Balzani, F. Scandola, Supramolecular Photochemistry, Horwood, Chichester (UK), 1991.
- [5] J. Deisenhofer *et al.*, *J. Mol. Biol.*, 1984, **180**, 385.
- [6] G. McDermott *et al.*, *Nature*, 1995, **374**, 517.
- [7] A.H. Zewail, *J. Phys. Chem. A*, 2000, **104**, 5660.
- [8] K.N. Ferreira *et al.*, *Science*, 2004, **303**, 1831.
- [9] Y. Umena *et al.*, *Nature*, 2011, **473**, 55.
- [10] F. Scandola *et al.*, *Chimica e Industria*, 1995, **77**(11), 959.
- [11] V. Balzani, S. Serroni, *Science Spectra*, 2000, **22**, 28.
- [12] Vedi per esempio: M.H.V. Huynh *et al.*, *Coord. Chem. Rev.*, 2005, **249**, 457.
- [13] Basic Research Needs for Solar Energy Utilization, U.S. DOE, Office of Science, Bethesda, Washington D.C., 2005, www.sc.doe.gov/bes/reports/files/SEU_rpt.pdf.

ABSTRACT

The Road-map to Artificial Photosynthesis: Competences, Structures and Research Projects in the Field

Artificial photosynthesis, that is the direct conversion of solar energy into chemical energy by means of photo-driven synthesis of high-energy chemical species (i.e., fuels) from low-energy chemical species (e.g., water and carbon dioxide), a bio-inspired process, has been for long time a Holy Grail of Science. The impressive research progress of the last few years have now paved the way to face with high success probability the problems to be solved for achieving an efficient artificial photosynthesis. This article reports a brief overview of the scientific problems connected with artificial photosynthesis and of the main research structures and projects devoted to this field in various Countries, including the studies by researchers of SOLAR-CHEM, the Italian interuniversity center for the chemical conversion of solar energy.