

**VERSO UN
MONDO
NUOVO**

Verso un mondo nuovo

di Chris Forman e Claire Asher

Pubblicato da **Atlante Srl**

Via Volta 12 40053 Valsamoggia (Bologna)

E-mail atlante@atlantelibri.com

www.atlantelibri.com

Edizione originale

Brave Green World

Published by MIT Press by arrangement with UniPress Books Ltd.

Design, layout, and text copyright © UniPress Books Ltd. 2021

Responsabile di edizione	Kate Shanahan
Manager di progetto	Natalia Price-Cabrera
Direzione artistica	Paul Palmer-Edwards
Illustrazioni	Robert Brandt
Ricerca iconografica	Natalia Price-Cabrera

Edizione italiana a cura di Atlante Srl

Traduzione	Costanza Bocchia (capp. 1, 2, 5, 6, 9) Atlante Srl (capp. 3, 4, 7, 8, 10) Copyright © Atlante Srl 2023
-------------------	--

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta, fotocopiata, registrata o trasmessa in alcuna forma senza il permesso scritto dei titolari di copyright. Copia di questo libro è stata inviata per il deposito legale alla Biblioteca Nazionale di Firenze e alle altre sedi preposte.

ISBN: 978 88 7455 195 8

Stampato in Italia

CHRIS FORMAN
CLAIRE ASHER

VERSO UN MONDO NUOVO

COME LA SCIENZA PUÒ
SALVARE IL PIANETA

Sommario

Introduzione . . . 5

1 L'energia del pianeta

La radiazione solare e la vita . . . 08

2 Il fenomeno della circolarità

Soluzioni suggerite dalla natura . . . 30

3 Sistemi lineari antropici

Quando il prodotto finale è lo spreco . . . 54

4 Produzione additiva

Il punto di svolta della stampa 3D . . . 80

5 Biologia sintetica

La costruzione di nuovi sistemi biologici . . . 104

6 Fenomeni emergenti

Il tutto è maggiore della somma delle parti . . . 128

7 Algoritmi e intelligenza artificiale

L'ingrediente magico . . . 152

8 Il processo digitale

La computazione in-materica . . . 178

9 Le città del futuro

Sinternet: una nuova era . . . 202

10 Oltre i limiti

Un sentiero verso le stelle . . . 226

Riferimenti . . . 250

Glossario . . . 252

Indice . . . 254

Introduzione

Gli anelli di un albero raccontano la storia della sua vita e quella dell'ambiente in cui è cresciuto. E quella dell'umanità? Sarà rappresentata da uno strato annerito di smartphone fossilizzati nelle note in calce della geologia? O sarà una storia come quella della foresta pluviale di Daintree, in Australia, uno dei più antichi ecosistemi forestali del mondo, i cui attuali esemplari vantano un lignaggio di oltre cento milioni di anni? Per una permanenza altrettanto lunga occorre concepire uno scenario in cui ogni generazione restituisca alla biosfera tutto quello che preleva, affinché possa essere impiegato anche da chi viene dopo. Un mondo senza rifiuti né inquinamento. La transizione verso un simile sistema, definito economia circolare, dipende moltissimo dalla scienza, e in questo libro si esplorano alcune delle strade in grado di raggiungere l'obiettivo.

L'attuale stile di vita è destinato a mutare radicalmente nei prossimi decenni. Il modo preciso in cui ciò accadrà è vincolato a decisioni e azioni collettive. I materiali impiegati per creare un mondo nuovo dipenderanno dalle conoscenze e dalle tecnologie disponibili, a loro volta subordinate ai progressi di oggi e alla qualità delle scelte politiche. Conciliare le prospettive a lungo termine e i propri interessi immediati è apparentemente difficile. I sistemi naturali suggeriscono però che esiste un modo per fornire a tutti i prodotti tecnologici più avanzati, garantendo al contempo rosee prospettive alle generazioni future.

I dispositivi elettronici potranno crescere sulle pareti di casa come fanno i frutti sugli alberi, e sbarazzarsi di un apparecchio dismesso equivarrà al compostaggio di un torsolo di mela. Materiali intelligenti e nuovi processi molecolari ispirati agli organismi naturali apriranno la strada a una società più equa e sostenibile, caratterizzata da un'economia circolare iper-efficiente e guidata dall'innovazione, in grado di affrontare le molteplici sfide del cambiamento climatico, della perdita di biodiversità e della disuguaglianza, apportando così notevoli benefici a tutta l'umanità.

In questo libro gli autori espongono la visione di un futuro in cui dieci miliardi di persone siano in grado di prosperare sulla Terra all'infinito, senza esaurire le materie prime o danneggiare gli altri otto milioni di specie conviventi. Una prospettiva solo apparentemente utopistica e nemmeno così lontana nel tempo. Un mondo nuovo che forse sta già muovendo i primi passi.

La natura, tessuto della vita

La storia inizia su scala planetaria, guarda la Terra come un sistema unico che si crogiola nella luce solare, e considera al contempo gli effetti delle leggi fisiche sugli organismi viventi. La natura ha selezionato degli strumenti molto sofisticati e una serie di processi incredibilmente complessi per elaborare le risorse disponibili e per catturare e distribuire l'energia ricavandone il massimo rendimento.

In confronto, l'approccio umano è inefficiente. Anche le conquiste più straordinarie, come internet e le esplorazioni spaziali, si basano sull'energia immagazzinata nei combustibili fossili piuttosto che sullo sfruttamento dell'ingente disponibilità di radiazione solare che attraversa il pianeta. L'uso irrefrenabile di questo capitale accumulato negli eoni passati è ormai una prassi, e le scorte vengono consumate più velocemente di quanto sia possibile rimpiazzarle. In una storia di 100 milioni di anni, il petrolio può diventare una risorsa rinnovabile, a patto che la si sfrutti dandole il tempo di rigenerarsi.

Il libro della natura testimonia che anche i più squisiti processi di sintesi organica non richiedono un impiego eccessivo di energia solare: occorre dunque spostare l'attenzione sui materiali. Se fosse possibile trarne ispirazione, perfezionare i procedimenti tecnologici umani e massimizzare l'utilizzo di una fonte pressoché inesauribile, tutte le risorse naturali avrebbero buone possibilità di recupero.

Tecnologia dei materiali

L'elaborazione funzionale dell'energia è profondamente connaturata nelle molecole stesse degli organismi viventi. Imparare a imitare il loro funzionamento permetterebbe di incanalare la luce del sole direttamente nella produzione, evitando la necessità di generare elettricità, e formare sistemi complessi una molecola alla volta. Ma un cambiamento di tale portata richiede un notevole potenziamento delle conoscenze scientifiche e tecnologiche.

La stampa 3D, in cui un modello digitale guida un processo di fabbricazione additiva, è il primo passo verso l'emulazione dell'abilità della natura di incorporare informazioni nei materiali. In che modo la fabbricazione additiva può contribuire al raggiungimento della circolarità? Senza dubbio un aiuto arriverà dalle potenzialità offerte da computer e intelligenza artificiale. Oltre a ciò, sono in fase di progettazione strumenti completamente nuovi per produrre manufatti, e la biologia di sintesi promette di fornire componenti biomimetici più intelligenti, in grado di interpretare e immagazzinare dati: potrebbero essere questi i poliedrici "mattoni" necessari a sostituire gli attuali sistemi non rigenerativi.

Architettura di calcolo

Mentre si esplorano queste e altre tecnologie, occorre soffermarsi sul loro effetto combinato. L'intelligenza artificiale e l'automazione sono in grado di fornire i mezzi necessari per esplorare un vasto complesso di fattori in cui il fenomeno del "comportamento emergente" fa presagire notevoli vantaggi. Portare la storia tecnologica alla sua naturale conclusione spinge verso una dimensione in cui il calcolo stesso balza fuori dai computer per entrare nel mondo circostante. Si può ipotizzare un futuro in cui tutti i processi produttivi, dalla fabbricazione di smartphone alla costruzione di case, siano basati su un'architettura generalizzata di calcolo che utilizza blocchi chimici standard. Tali blocchi potranno essere facilmente assemblati, scomposti e riassemblati a costo quasi nullo, e i materiali di scarto generati nel ciclo di sintesi verranno dirottati verso altri processi, allo stesso modo in cui piante, animali, funghi e batteri si sono evoluti scambiandosi energia e nutrienti all'interno della rete più ampia degli ecosistemi.

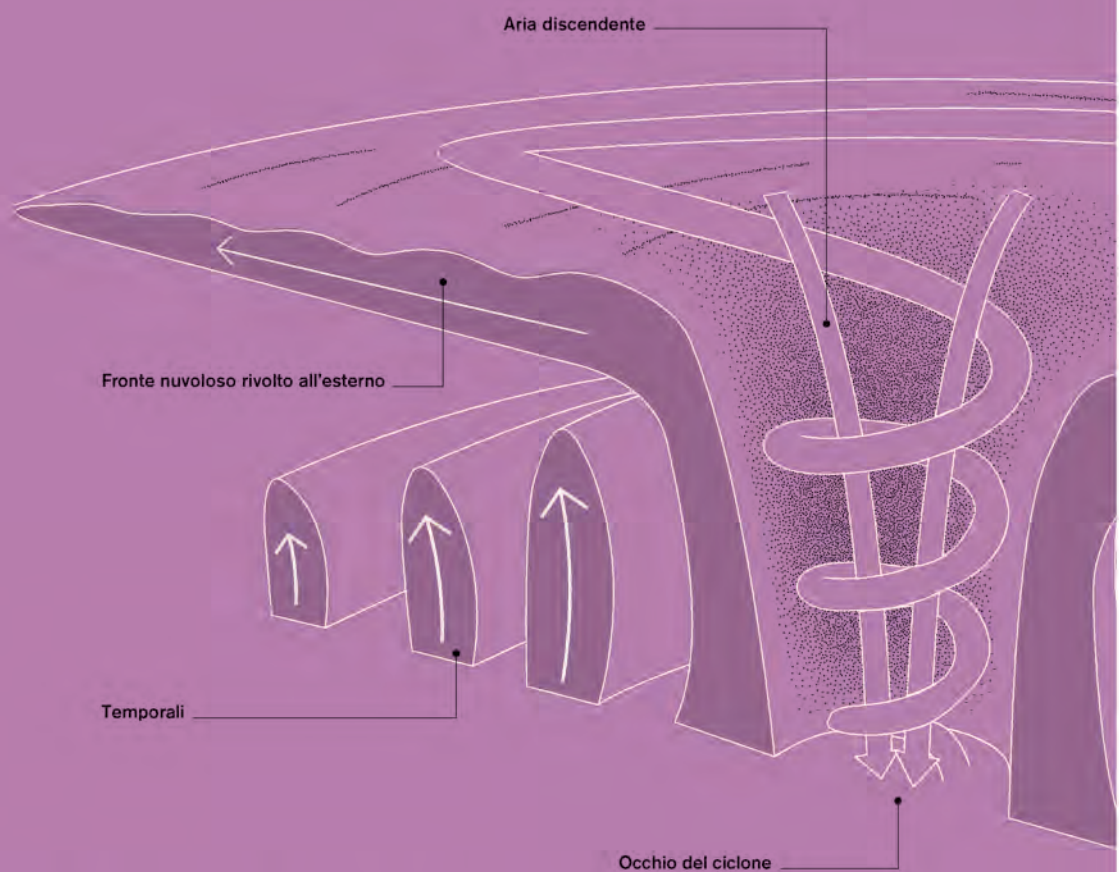
Un nuovo mondo sostenibile

Per costruire un'economia circolare è necessario che molte parti in movimento si uniscano; occorre pensare in termini di sistema, non di prodotto. Assistiamo oggi alla comparsa dei primi germogli di soluzioni tecniche innovative; è necessario coltivare questi elementi poiché sono in grado di condurre l'uomo nella prossima epoca, in cui le risorse saranno utilizzate correttamente e rese disponibili a tutti, e in cui i processi energetici, agricoli, manifatturieri e di smaltimento coesisteranno in un potente e sinergico quadro globale.

Tutti hanno un ruolo da svolgere nel processo di avanzamento verso questo futuro. I consumatori nell'optare per marchi con filiere trasparenti e sostenibili; gli investitori nello scegliere aziende con processi di produzione etici o schemi innovativi di riciclaggio dei rifiuti; gli imprenditori nel creare un mercato per materiali migliori scegliendo i fornitori in funzione del loro impegno ecologico; le ONG nel sostenere iniziative locali che decentrinò la produzione e insegnino l'arte di riparare e recuperare i beni; gli enti di finanziamento nel dar vita a iniziative per sviluppare nuove componenti, nuove procedure industriali e nuovi modelli di distribuzione; i politici nell'incanalare le risorse verso il potenziamento dell'economia circolare.

Il prossimo capitolo della storia umana sarà determinato dall'effetto combinato di tutte queste azioni. *Verso un mondo nuovo* descrive un futuro migliore per tutte le forme di vita sulla Terra, e individua un piano d'azione per realizzare tale obiettivo.

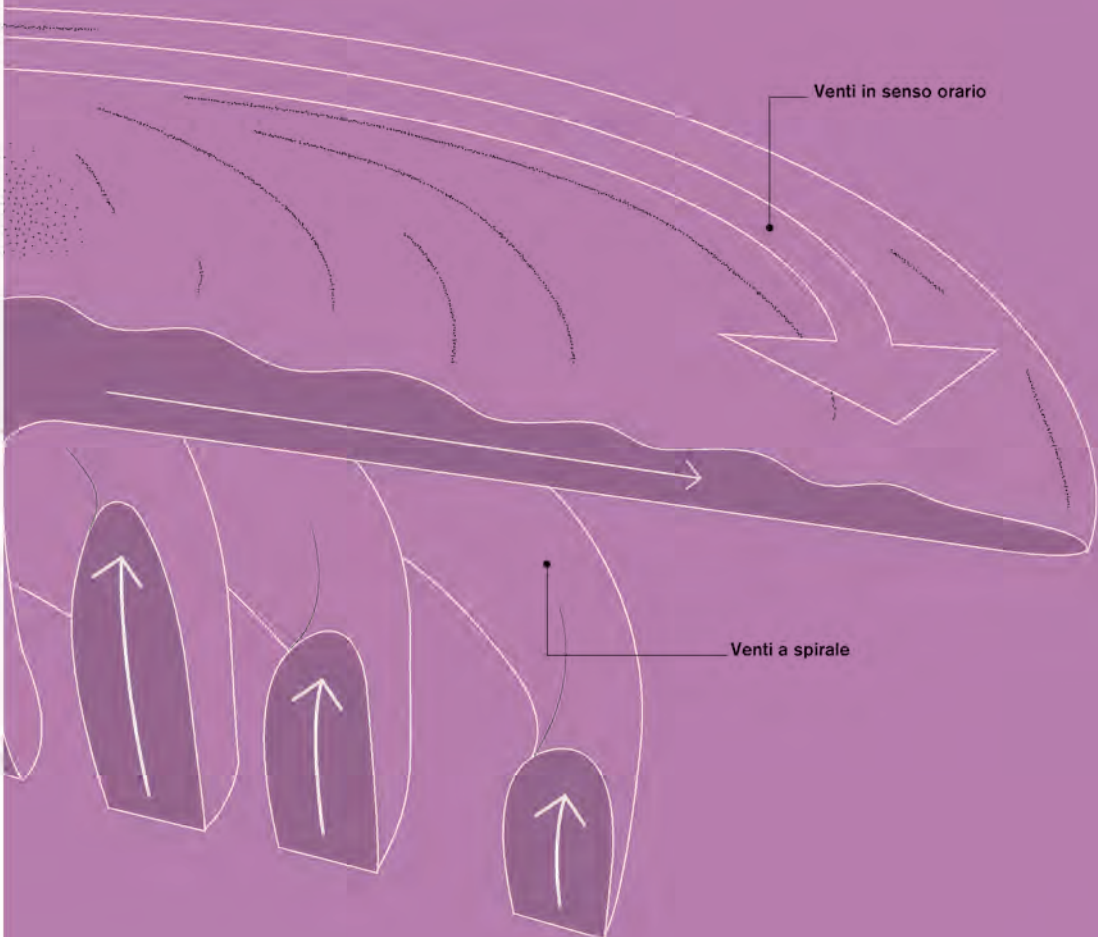
I L'energia del pianeta



Struttura di un uragano

“Il pianeta è proprio sfolgorante. Ricordo che cercavo di descriverlo a mio figlio, che all’epoca aveva sette anni. Gli dissi che il modo più semplice che mi veniva in mente era prendere una lampadina – la più luminosa che potesse immaginare – dipingerla con tutti i colori della Terra che conosceva, accenderla e rimanerne accecati. Perché di giorno, di notte, all’alba e al tramonto la Terra si illumina di tutti questi colori.”

Nicole Stott, astronauta, NASA, Marzo 2018



Tutti hanno sentito parlare di luce solare, ma l'espressione "luce terrestre" è altrettanto familiare? Ogni giorno, per tutto il giorno, un abbondante e ininterrotto flusso di radiazioni proveniente dal Sole satura la Terra di luce. In effetti crogiolarsi in questo splendore è il passatempo preferito di quasi tutti gli esseri viventi del pianeta, ma qualcuno si chiede mai dove finisce tutta questa energia mentre è sdraiato a prendere il sole? La risposta è sorprendentemente semplice: quasi tutta torna di nuovo nello spazio.

La Terra irradia la maggior parte dell'energia solare in entrata sotto forma di luce riflessa o calore, ossia radiazione infrarossa invisibile. Ogni secondo la Terra ne dissipa una quantità quasi pari a quella che la investe, come se fosse all'interno di una gigantesca cascata di luce. Il flusso energetico guida gran parte dei processi naturali presenti sulla superficie: modelli climatici, correnti oceaniche e vita organica. Tutti i colori percepiti in ogni momento nell'ambiente circostante sono prodotti dalla luce nel suo viaggio di ritorno verso lo spazio.

Usando l'intelligenza si riesce a immagazzinare l'energia solare per un po' – proprio come quando l'acqua rimane raccolta nel palmo di una mano prima di scivolare tra le dita: le forme di vita presenti sulla Terra lo fanno da circa 3,5 miliardi di anni.

Da dove prende l'energia l'uomo?

Ogni singolo sforzo umano si basa sulla riorganizzazione degli atomi attraverso l'energia. In effetti, non c'è praticamente nient'altro che si possa fare nell'universo se non trasformare la materia grazie ad essa. Se nel mondo moderno una parte deriva da fonti nucleari e geotermiche, la stragrande maggioranza proviene, direttamente o indirettamente, dalla radiazione solare. Piante e colture agricole la convertono in composti organici attraverso la fotosintesi; i pannelli fotovoltaici producono elettricità, ed è ancora la radiazione solare a mantenere altre fonti di energia rinnovabile come vento e il ciclo dell'acqua. L'energia solare preistorica, a sua volta, è stata immagazzinata in combustibili fossili come carbone, petrolio e gas naturale. I processi economici, agricoli e industriali dell'uomo si



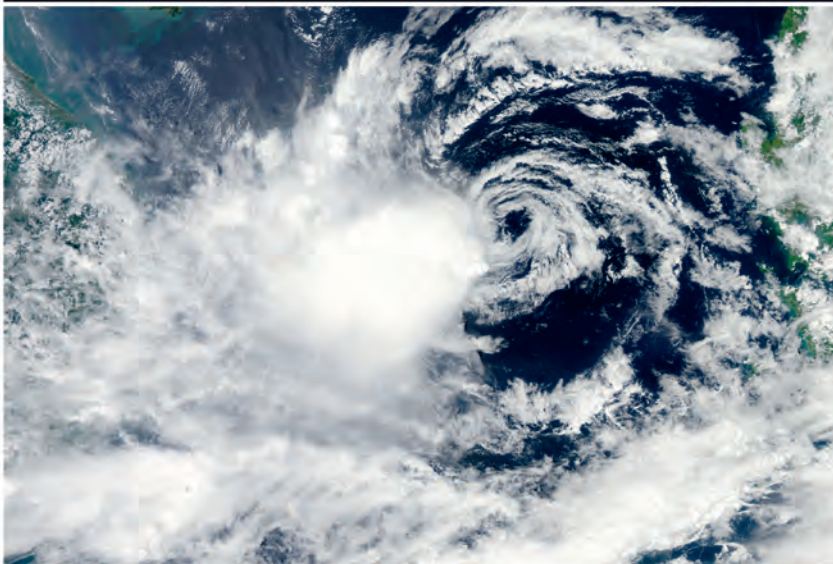
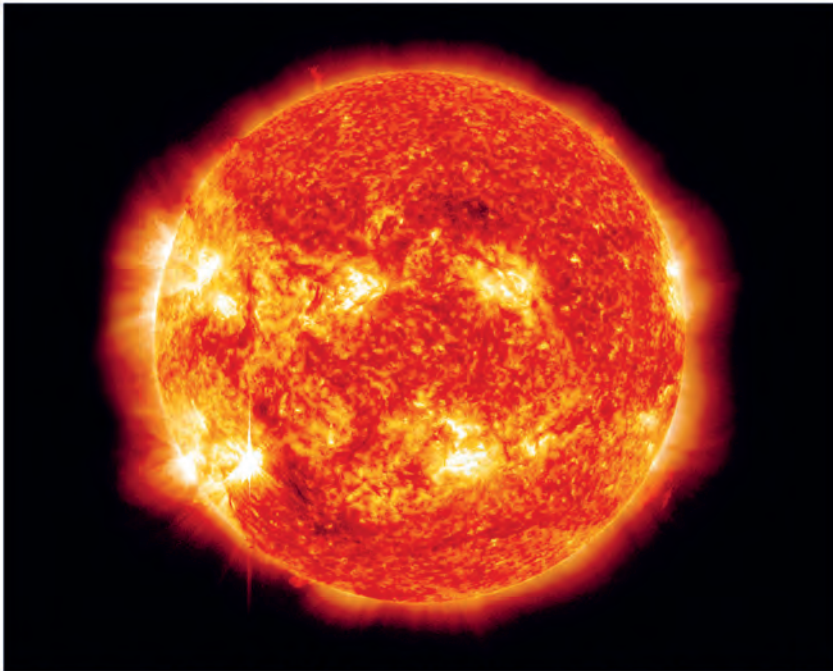
.....
Sopra: una veduta della Terra dalla Stazione Spaziale Internazionale lungo il margine dell'atmosfera. Si possono notare lo scintillio dell'atmosfera. Si possono notare lo scintillio dovuto alla rifrazione e il riflesso di un fulmine.

sono propagati con una velocità senza precedenti in tutto il pianeta sfruttando le colossali quantità di energia d'alto livello accumulate in queste riserve naturali nel corso di innumerevoli eoni, e le hanno rilasciate nell'arco di due soli secoli – un mero battito di ciglia cosmico. Rispetto alla scala del tempo geologico la massiccia espansione demografica globale è quasi istantanea, ma già l'enorme impatto della nostra specie sui sistemi naturali rivaleggia con la magnitudine dello stesso mondo organico, e l'antropizzazione è in grado di alterare il percorso della radiazione solare nel suo viaggio di ritorno verso lo spazio attraverso una varietà di meccanismi. Un risultato fenomenale, ma anche insostenibile.

Le attività umane hanno alterato i livelli naturali di gas serra nell'atmosfera, principalmente vapore acqueo (H_2O), anidride carbonica (CO_2), metano (CH_4), protossido d'azoto (N_2O) e ozono (O_3). Intorno alla Terra, questi gas formano una coltre che intrappola nell'atmosfera una parte della radiazione incidente, che altrimenti verrebbe restituita allo spazio. Senza questo intervento la temperatura sulla superficie del pianeta si aggirerebbe in media intorno ai $-19\text{ }^\circ\text{C}$, invece del valore relativamente mite di $14\text{ }^\circ\text{C}$. Tuttavia, il flusso di radiazione solare che attraversa il nostro sistema è così grande che è sufficiente modificare di poco la concentrazione di questi gas per provocare un effetto significativo. L'energia supplementare intrappolata nell'atmosfera a causa delle attività umane è sufficiente ad aumentare la temperatura dell'aria e del mare, a provocare lo scioglimento delle calotte glaciali e l'innalzamento del livello degli oceani. Inoltre, incrementa fenomeni meteorologici estremi come uragani e trombe d'aria, incendi e siccità, alluvioni e inondazioni. Gli uragani, ad esempio, si formano quando il calore dell'oceano riscalda l'aria che lo sovrasta, che sale, si raffredda e torna a scendere. Mentre scende, l'aria fredda viene di nuovo riscaldata dal calore dell'acqua, formando un sistema convettivo a ciclo continuo, che ruota a

Pagina accanto, in alto: una stella è una sfera di plasma in equilibrio precario tra il collasso gravitazionale e la pressione di radiazione generata dalle reazioni termoneucleari del nucleo. Le particelle cariche all'interno della stella generano complessi campi magnetici che ruotano e si torcono, spesso accelerando imprevedibilmente la materia verso lo spazio sotto forma di brillamenti.

Pagina accanto, in basso: se si fa roteare vigorosamente un bicchiere d'acqua e si osserva il vortice che ne risulta, si nota che maggiore è l'energia in un sistema, maggiore è quantità di moto. Lo stesso vale per la nostra atmosfera e per gli oceani; potenti correnti si formano tra le regioni più calde e quelle più fredde, dando luogo a tempeste gigantesche come quella di Gaemi del 2012, qui raffigurata.



causa della rotazione terrestre e può creare una tempesta. Più caldo è l'oceano, più energia c'è nel sistema e più potente è il fenomeno.

Limiti fisici

La crescente comprensione dell'astrofisica, unita all'esplorazione della nostra e di altre sfere di roccia che orbitano intorno al Sole, ha reso evidente – con sempre maggiore chiarezza – quanto siano preziose le condizioni della Terra per l'esistenza della vita. Soprattutto se si confronta questo piccolo pianeta verde-azzurro con gli ambienti inhospitali di altri corpi celesti del sistema solare.

Per meglio comprendere i modelli atmosferici, chimici e bio-geofisici della Terra è stata elaborata una serie di indicatori chiave, le Condizioni limite planetarie, con lo scopo di monitorare gli squilibri e intraprendere le necessarie azioni per mantenere i parametri entro un intervallo di stabilità globale. Tra queste ci sono il livello di CO₂ nell'atmosfera, il grado di acidificazione degli oceani e la riduzione dell'ozono stratosferico.

Si sa che nel corso della storia geologica si sono verificati enormi cambiamenti nei sistemi terrestri. La comprensione dell'influenza che esseri umani e altri soggetti possono avere sulle condizioni del pianeta è appena agli inizi. Miliardi di anni fa, ad esempio, la comparsa della fotosintesi ha causato il rilascio nell'atmosfera di enormi quantità di ossigeno altamente reattivo, a cui le forme di vita hanno dovuto adattarsi.

La selezione naturale tende a favorire gli organismi che reintegrano il capitale naturale del loro ecosistema. Rocce, oceani, aria e suolo rappresentano immense riserve di risorse; nel breve periodo l'uomo è riuscito a sfruttare la disponibilità di foreste, fauna ittica, territorio, acqua dolce, petrolio, carbone e altro, esaurendo il capitale naturale più velocemente di quanto potesse rigenerarsi: è ovvio che, prima o poi, dovrà affrontare le conseguenze di uno sfruttamento così smodato.

L'organizzazione internazionale Global Footprint Network ha calcolato che nel 2016 la rigenerazione delle risorse planetarie, dopo un anno di attività umane, abbia richiesto 20 mesi di tempo. Si prevede che entro il 2030 questo intervallo salirà a 24 mesi, il che significa che l'umanità avrà bisogno dell'equivalente di due pianeti per soddisfare la domanda annuale. Ma la Terra è una sola... È un po' come far quadrare il bilancio familiare: se si spende oltre le proprie possibilità, il denaro finisce e si va in rosso.

Le attività umane stanno anche compromettendo la capacità del mondo naturale di svolgere i suoi normali processi di autoregolazione, in parte sostituendo i processi della

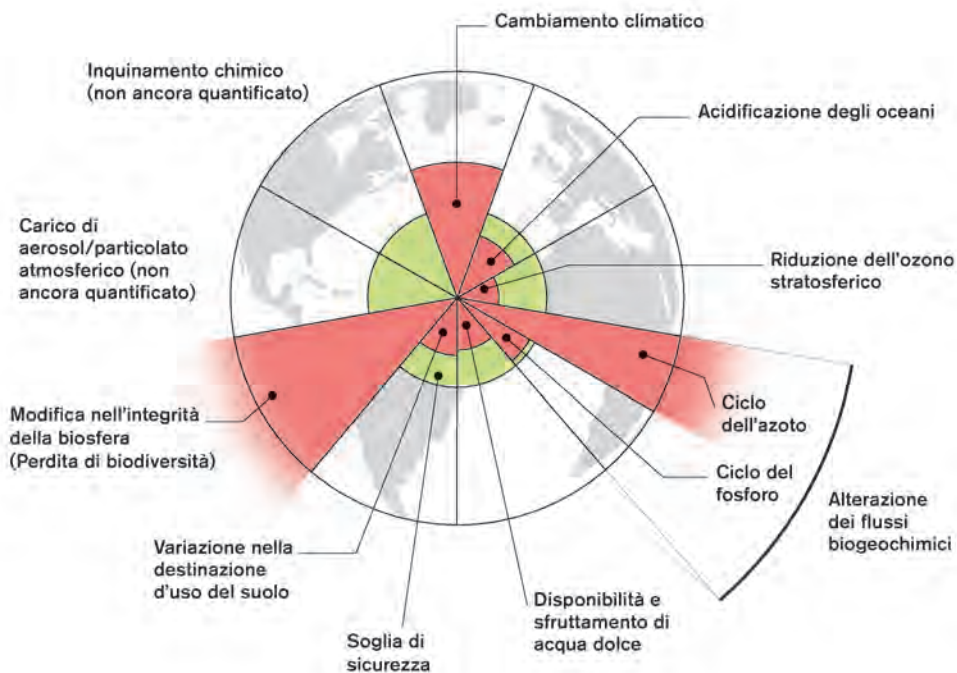
Quanta energia c'è?

La radiazione solare intercettata dalla Terra equivale a una potenza di circa 120.000 terawatt (TW), pari a 8.000 volte il fabbisogno totale da parte dell'uomo. Il numero di fotoni al secondo corrisponde a quello delle molecole presenti nell'atmosfera: un'energia sufficiente a far funzionare 80.000 miliardi di bollitori ininterrottamente. Se questa energia non venisse in gran parte riflessa nello spazio, tutto si scalderebbe molto rapidamente! Ecco perché anche piccole quantità di gas serra possono fare una così grande differenza sulla temperatura: è sufficiente che intrappolino anche una minima parte dell'irraggiamento solare – oltre a quella già trattenuta – per avere un effetto rilevante.

Di fatto, è verosimile che ogni molecola esposta sul lato soleggiato della Terra venga colpita da almeno un fotone ogni 30 minuti. Ogni collisione produce da 1 a 1.000 fotoni infrarossi e determina riarrangiamenti molecolari potenzialmente utili. Il modo in cui gli organismi biologici riescono a gestire queste modifiche a loro vantaggio viene trattato in modo più approfondito nel capitolo 2.

Si prevede che entro il 2050 la popolazione umana mondiale necessiti di una potenza di 27 TW, che lieviterà a 43 TW entro il 2100. Nel momento in cui scriviamo, i pannelli fotovoltaici ad alto rendimento hanno un'efficienza del 47% circa, il che significa che convertono meno della metà della radiazione solare incidente in elettricità utile. Teoricamente, si può sperare di raggiungere un'efficienza di captazione dell'87%; supponendo che la domanda globale di energia debba essere soddisfatta esclusivamente sotto forma di elettricità – discussione su cui torneremo – entro il 2050 basterà coprire lo 0,05% della superficie terrestre, ovvero 230.000 chilometri quadrati, per generare 27 TW. Sulla base di questi calcoli approssimativi, si deduce che una serie di campi fotovoltaici estesi quanto un terzo del Texas potrebbero alimentare tutte le attività umane anche in un lontano futuro. Oggi il Texas fornisce più o meno il 40% del petrolio greggio degli Stati Uniti, ma sfruttando l'energia solare potrebbe virtualmente provvedere a tutto il fabbisogno elettrico del mondo.

L'impatto umano sul pianeta



.....

Sopra: gli scienziati hanno identificato una serie di indicatori chiave che rappresentano l'impatto umano nei confronti dei sistemi terrestri. Questo prospetto dovrebbe aiutare i governi a stabilire obiettivi e traguardi che l'industria globale deve raggiungere per garantire che le generazioni future possano beneficiare dell'eredità di quella attuale.

biosfera con quelli umani, in parte inquinando l'ambiente e sottoponendolo a ulteriore stress. Se si riducono contemporaneamente le riserve e la capacità di rigenerarle, il pianeta non sarà più in grado di sostenerci. Occorre operare un'inversione di rotta per ridurre l'impatto dell'uomo sulla natura per rientrare nei limiti il prima possibile. Questo libro illustra una serie di soluzioni tecnologiche e scientifiche che mirano a questo obiettivo.

Combinare vecchia e nuova saggezza

Il concetto secondo cui è indispensabile rigenerare costantemente l'ambiente naturale non è né nuovo né straordinario. Nella storia esistono diversi esempi di civiltà che hanno interiorizzato appieno questo assunto vivendo per millenni in armonia con il mondo naturale, senza esaurire le risorse disponibili o la capacità di recupero degli ecosistemi, e alcune comunità moderne hanno fortunatamente conservato questa eredità culturale. Nell'incessante sviluppo di nuove tecniche di produzione e nuovi materiali, sarebbe opportuno trarre ispirazione da questi modelli per costruire società educative e solidali, che rispettino l'ambiente e che permettano all'umanità di progredire in ambito economico, tecnologico e scientifico, approfondendo al contempo i legami empatici ed etici con tutti gli altri esseri viventi.

Le culture che abbracciano la sostenibilità comprendono che tutti gli organismi sono parte dell'ecosistema. Apportare cambiamenti è normale: i castori innalzano dighe; gli uccelli costruiscono nidi; le termiti creano vasti e intricati nidi autoventilanti; gli erbivori modellano gli alberi e i lupi possono cambiare il corso dei fiumi. Nessuna creatura è però più abile dell'uomo nel modificare il proprio ambiente.

Siamo abbastanza intelligenti da vivere in modo sostenibile?

L'intelligenza si è evoluta in modo indipendente in diverse specie animali, dalle scimmie ai delfini, dai polpi ai corvi. Gli esseri umani sono abbastanza intelligenti da fabbricare razzi, centrali elettriche e organizzare interi sistemi economici e produttivi, e sufficientemente ingegnosi da inventare denaro, automobili e smartphone.

Ma se l'intelletto di specie finisce per portare il pianeta oltre i limiti del sostentamento della vita come la si conosce, non si rivelerà fallimentare come strategia evolutiva? Oltre all'intelligenza, esiste nell'uomo anche sufficiente buon senso da affrontare la sfida di uno sviluppo sostenibile per cento milioni di anni e oltre di civiltà futura? Che tipo di tecno-

logia o di saggezza aiuterà l'uomo a raggiungere questo scopo? Se questo è l'obiettivo (e perché non dovrebbe esserlo?), allora occorre decisamente superare la prospettiva antropocentrica e autoreferenziale.

Le scelte di oggi sono decisive: potremo trasformarci in una specie rancorosa e insieme piena di rimpianti, superba, arrogante e destinata all'autodistruzione, oppure in una specie giudiziosa e forte, che accetta il proprio posto nel mondo e affronta le criticità in modo costruttivo.

Che si rimanga sulla Terra, si colonizzino altri pianeti o addirittura si viaggi verso stelle lontane, il problema della sostenibilità è un requisito imposto dalla fisica, non un optional. L'uomo ha già dimostrato di poter raggiungere un notevole grado di raffinatezza tecnologica ed economica, deve solo comprendere meglio il funzionamento degli ecosistemi planetari per potersi interfacciare con essi, gestendo la complessità della natura in modo opportuno. In questo modo sarà in grado di rigenerare il capitale naturale su cui si basa l'intero regno biologico agevolando la regolazione spontanea dell'atmosfera e degli oceani. In un'economia circolare i sistemi umani e quelli naturali si possono sostenere a vicenda e tutti gli scarti vengono riciclati.

L'obiettivo è identificare un tipo di infrastruttura che consenta agli esseri umani di prendere facilmente decisioni ottimali e a breve termine, niente affatto egoistiche, operando *automaticamente* in armonia con l'ambiente geofisico e biologico e affidando un valido lascito ai propri discendenti. In questo libro verranno esaminate le pertinenti basi scientifiche e, passo dopo passo, si esploreranno le ricerche attuali in grado di sviluppare tecnologie più equilibrate e orientate a consentire a tutti di vivere in armonia con l'ambiente circostante.

Le leggi fondamentali dell'energia

Ogni volta che un fotone di luce interagisce con una molecola, questa può assorbirne l'energia e, se ciò accade, per un brevissimo istante uno dei suoi elettroni si eccita, ovvero si trova su un livello di energia più alto; come conseguenza la molecola può assumere una serie di assetti precedentemente non disponibili, ad esempio nuovi stati vibrazionali, traslazionali o rotazionali. Ogni nuovo stato offre un mezzo per restituire l'energia assorbita, e dato che questa non può essere distrutta, deve finire da qualche parte: quella dei fotoni incidenti di luce visibile può essere frammentata in centinaia di fotoni infrarossi durante i moti di vibrazione, oppure immagazzinata chimicamente in

un nuovo legame molecolare, o ancora riemessa come singolo fotone, anche se orientato in una direzione diversa da quella originaria.

Questo trasferimento di energia da corpi caldi come il Sole a corpi più freddi, come la Terra, per finire nelle gelide profondità dello spazio è un processo termodinamico, in quanto concerne la “dinamica del calore”. Il concetto secondo cui l’energia non può mai essere creata o distrutta è una conseguenza del primo principio della termodinamica e si applica sia alla luce sia alla materia.

Un singolo fotone di luce blu può contenere energia sufficiente a produrre un centinaio di fotoni nell’infrarosso durante l’interazione con una molecola, pertanto il numero di fotoni infrarossi in uscita dalla Terra supera notevolmente quello dei fotoni blu in entrata dal Sole. Ciò significa che il numero di modi possibili di disporre l’insieme di fotoni infrarossi è di gran lunga superiore a quelli in cui si dispone il singolo fotone blu, e questa è una misura del grado di indeterminazione di un sistema, o entropia. Un’analogia semplice consiste nell’immaginare una pila di monete identiche, ognuna delle quali rappresenta un quanto di energia. Poiché le monete sono indistinguibili, c’è un solo modo di ordinarle in un’unica pila, ma molti modi per organizzare svariate pile più piccole, che sommate danno lo stesso valore. Se si dovesse optare per una disposizione casuale (magari scuotendo le monete in un contenitore per poi rovesciarle su un tavolo), si avrebbero molte più probabilità di ottenere un mucchio disomogeneo, magari con varie pile distinte, piuttosto che una pila perfetta con tutte le monete disposte ordinatamente.

Allo stesso modo, dopo l’impatto tra un fotone blu e una molecola e la sua frammentazione in centinaia di fotoni infrarossi è molto improbabile che questi si ricombinino di nuovo in un singolo fotone blu. L’entropia dell’universo è aumentata in modo permanente, e questa è una conseguenza del secondo principio della termodinamica. Qualsiasi tipo di sistema tende sempre a trasformarsi aumentando il numero di possibili configurazioni a sua disposizione. Se l’entropia della luce può aumentare nel corso dell’interazione, non è detto che l’entropia della molecola subisca necessariamente una variazione. Se lo stato della molecola viene alterato, ad esempio con rottura o creazione di legami chimici, l’entropia può aumentare o diminuire. Proprio come un fiume fa girare innumerevoli volte una ruota idraulica, un flusso continuo di luce solare può riorganizzare ripetutamente la stessa molecola. Non si deve considerare solo l’energia: la variazione entropica totale della radiazione e della materia rivela quanti sono i cambiamenti molecolari possibili. La si può considerare un “budget” di entropia.

Da tutti questi dettagli emerge un quadro più ampio. L'accurato controllo spazio-temporale dell'emissione infrarossa consente agli organismi di sfruttare il flusso costante verso lo spazio per alimentare le cellule e trovare configurazioni molecolari utili. Quando la luce del sole colpisce una foglia, ad esempio, la fotosintesi intrappola l'energia incidente in nuovi legami nelle molecole di zucchero. L'energia immagazzinata nel carboidrato rimane pazientemente in attesa di essere utilizzata nei processi cellulari, e quando questo avviene cede calore e svolge uno specifico "lavoro" all'interno dell'organismo. Una parte di questa energia rimane incorporata nei tessuti e una parte si disperde nello spazio come radiazione infrarossa, aumentando a sua volta l'entropia dell'universo.

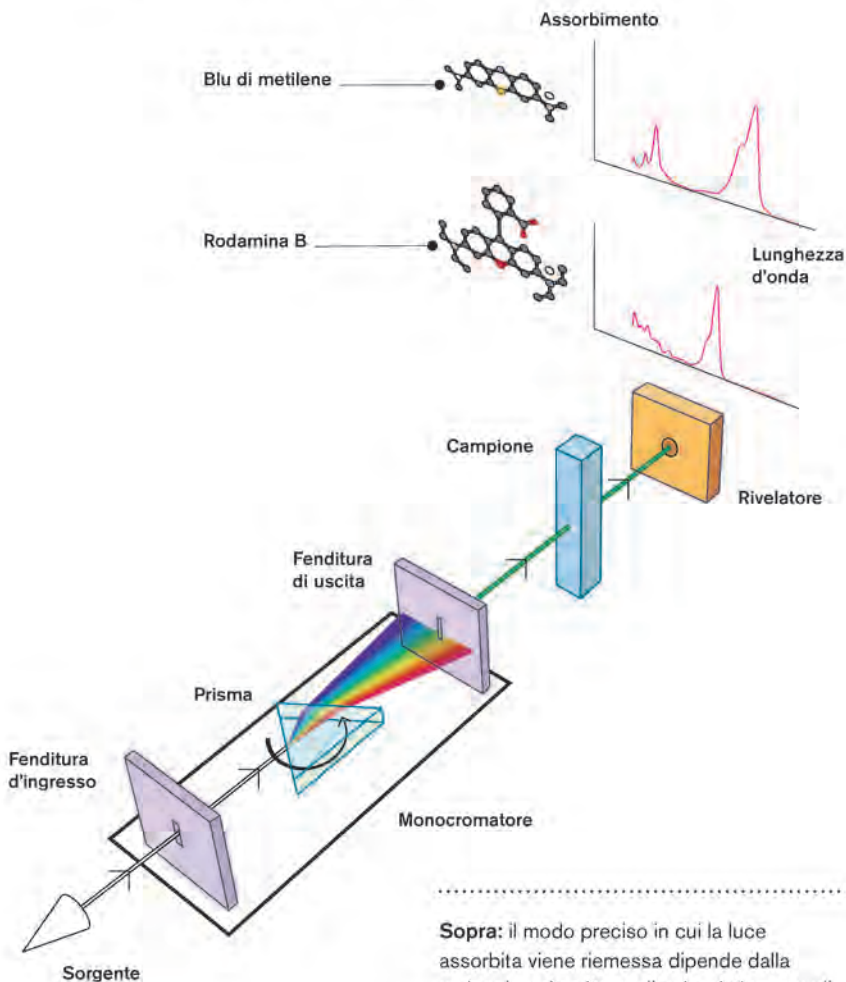
Il tempo di permanenza dell'energia solare sulla Terra può variare considerevolmente. Se un fotone colpisce una superficie riflettente e viene irradiato di nuovo nello spazio trascorre sul pianeta appena un microsecondo, ma se un organismo è in grado di immagazzinare questa energia nei legami chimici di una biomolecola questa può passare da un organismo all'altro per migliaia e persino milioni di anni, come è avvenuto nel caso di carbone o petrolio.

Materia in movimento

Una molecola eccitata dalla cascata di radiazioni solari può colpire la sua vicina, trasmettendo in parte o in toto l'energia rotazionale, vibrazionale e traslazionale acquisita. Ne consegue che la materia, anche allo stato solido, risulta costituita di molecole e atomi in movimento continuo e in collisione reciproca, e anche che onde casuali di energia attraversano ogni composto. Un po' come quando durante un concerto rock i salti e gli urti di centinaia di fan molto esaltati provocano il passaggio di onde di compressione attraverso la folla. Queste onde sono imprevedibili: si verificano ed esercitano una pressione. Se si oppone resistenza, forse la loro direzione può cambiare, ma probabilmente ciò non avviene.

In ambito fisico questo movimento casuale e turbolento è noto come moto browniano, da Robert Brown, lo scienziato che lo ha scoperto. Come nel caso dell'oceano, alcune onde sono più ampie di altre e di tanto in tanto una fluttuazione, dotata di sufficiente energia da far cambiare forma a una molecola, attraversa la materia. I polimeri che caratterizzano gli organismi viventi, come proteine, zuccheri e DNA, sono in genere catene di molecole ripetute che possono cambiare la loro distribuzione spaziale in risposta al moto browniano nell'ambiente circostante; esse fanno parte di una tipologia nota come materia soffice.

La luce riflessa rivela le proprietà dei materiali



Sopra: il modo preciso in cui la luce assorbita viene riemessa dipende dalla molecola coinvolta, e gli scienziati usano gli spettrometri per misurare la capacità di una specie chimica di assorbire radiazione di diversa lunghezza d'onda. La rotazione del prisma proietta sulla molecola colori diversi, che possono essere utilizzati per dedurre i minimi dettagli della sua struttura.

Materia soffice e materia condensata

Alcuni materiali come liquidi, polimeri, schiume e numerosi organismi viventi sono classificati come "soffici". Al contrario, la forma del metallo o del cemento rimane ostinatamente la stessa a temperatura ambiente. Il motivo per cui questi materiali sono così diversi ha a che fare con il concetto di barriera energetica.

Le barriere energetiche rappresentano la quantità di lavoro necessario per riorganizzare la materia. Un'ovvia esemplificazione è quella del Lego®: i bottoni a incastro alla sommità di ogni mattoncino tengono insieme i blocchi, e per separarli occorre spendere energia. Qualcosa di simile accade per atomi e molecole: ogni atomo è vincolato nella sua posizione da forze che lo mantengono in una particolare conformazione fino a quando non arriva un'onda browniana che lo spinge ad assumerne una nuova. Nel caso del metallo le barriere possono essere molto forti; per questo motivo è necessaria una fonte energetica ad alta intensità per renderlo plasmabile e trattabile. Nei materiali biologici come proteine o DNA, invece, esistono due generi di barriera: quella che tiene uniti gli atomi nella molecola è potente, mentre quella che controlla la geometria delle molecole e le modalità della loro reciproca associazione lo è molto meno. Ecco perché energie a bassa intensità, come radiazione solare o moto browniano, possono alterare la sostanza organica.

In effetti, le barriere energetiche che governano la struttura spaziale delle biomolecole sono calibrate sulla dimensione delle onde di moto browniano all'interno del composto stesso. La materia soffice è un composto le cui barriere sono più o meno della stessa entità delle fluttuazioni energetiche a cui normalmente è sottoposto. Anche a temperatura ambiente, non è necessario immettere una grande quantità di energia per alterare la struttura tridimensionale della materia soffice. Se la tecnologia potesse sfruttare le sue proprietà, i processi di produzione o recupero diventerebbero all'istante molto meno energivori, a patto di trovare materiali che svolgano le funzioni richieste. La realizzazione di articoli basati sulla materia soffice, in modo analogo a quanto avviene nella sintesi organica, potrebbe permettere l'impiego della radiazione solare come fonte di energia per tutte le attività umane. L'uso della materia soffice nei processi produttivi introduce nuove opportunità nell'ambito delle proprietà dei materiali e delle applicazioni tecnologiche.

Energia geotermica e nucleare

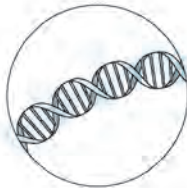
La radiazione elettromagnetica proveniente dal Sole non è l'unica fonte di energia disponibile. Una parte del nostro fabbisogno può essere coperta dall'energia nucleare e

geotermica, ambedue derivanti dalla trasformazione della massa in energia. La fusione nucleare che avviene nel Sole e i processi di fissione e decadimento radioattivo che si verificano sulla Terra rilasciano a loro volta fotoni. Il pianeta quindi trabocca di energia proveniente dall'interno e dall'esterno.

La potenza geotermica terrestre è stimata in circa 45 TW; in teoria potrebbe coprire il fabbisogno ipotizzato per il 2050, ma dal punto di vista pratico lo sfruttamento di questa

Esempi di materia soffice

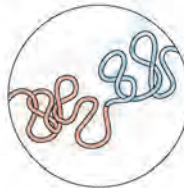
Polimeri



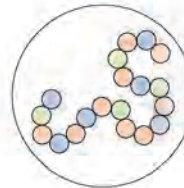
DNA



Polimeri flessibili

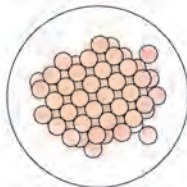


Copolimeri a blocchi

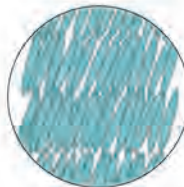


Proteine

Colloidi

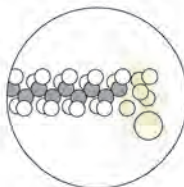


Sfere rigide



Particelle lamellari

Composti anfifilici



Tensioattivi

Sopra: in condizioni standard e a temperatura ambiente la materia soffice è facile da riconfigurare. Ne esistono vari tipi: i colloidi, ad esempio, sono sospensioni di particelle solide in un liquido, i polimeri

lunghe catene flessibili e versatili di unità più piccole e i composti anfifilici, forniti di estremità idrofile e idrofobe, si dispongono all'interfase di due diversi liquidi agevolandone la miscibilità.

risorsa è, per ora, estremamente complesso quasi ovunque. L'energia nucleare richiede superfici inferiori rispetto a qualsiasi altra forma di approvvigionamento, ma il processo di fissione genera scorie altamente radioattive il cui smaltimento, anche se non impossibile, è oltremodo difficile; lo stoccaggio sicuro delle barre di combustibile esausto e dei materiali di scarto contaminati comporta ancora enormi sfide.

Se da un lato è possibile trovare soluzioni per quantità relativamente piccole di scorie, un massiccio sfruttamento della fissione nucleare che tenga il passo con l'insaziabile domanda dell'umanità si rivelerebbe ben presto ingestibile. Raggiungere l'azzeramento delle emissioni di carbonio entro il 2050, sostituendo completamente i combustibili fossili, comporterebbe la costruzione di un reattore al giorno, a partire da oggi. È possibile aggirare questo problema e soddisfare la maggior parte del fabbisogno energetico grazie piuttosto alla fusione nucleare, un processo in grado di fornire energia abbondante, pulita e senza residui inquietanti. Ma finora questa impresa si è rivelata difficile da realizzare.

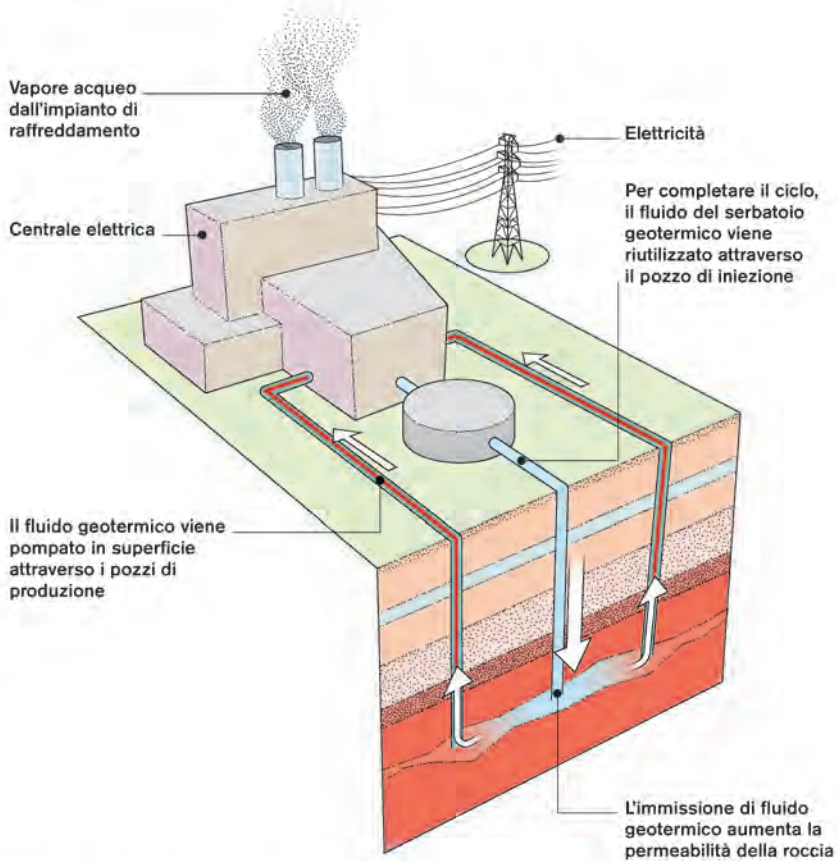
E forse è meglio così. Nell'attuale sistema economico, quantità illimitate di energia da fusione, invece di portare l'umanità a un'utopia sostenibile potrebbero accelerare la sua fine, facilitando la rapida espansione del consumismo a spese della biodiversità e degli ecosistemi naturali, soprattutto se fosse etichettata come fonte "priva di effetti collaterali". L'impiego di un'energia poco concentrata e meno intensa, come la luce solare, induce a una maggiore parsimonia. La necessità migliorare l'efficienza dei materiali stimola innovazioni tecnologiche e produttive, costringendo l'ingegno umano a padroneggiare le sottigliezze della manipolazione delle barriere molecolari; una condizione indispensabile per vivere in modo sostenibile sulla Terra o su altri pianeti.

Consumo energetico dirimpente

A prescindere dalla fonte di energia, l'attuale settore tecnologico non è così efficiente nella scelta del momento e del punto in cui riorganizzare gli atomi rispetto ai sistemi biologici, che come si vedrà nel prossimo capitolo si sono perfezionati in miliardi di anni attraverso la selezione naturale. La rivoluzione industriale è stata alimentata da combustibili ad alta resa come carbone e petrolio. Utilizzandoli per generare elettricità, essi hanno velocemente rilasciato grandi quantità di energia immagazzinata esaurendo il loro budget di entropia.

È sempre più evidente che ciò che conta non è la quantità totale di energia, ma la velocità con cui essa viene fornita a un composto allo scopo di riorganizzarne la forma. L'impasse è rappresentata dal ritmo di rilassamento vibrazionale e di riorganizzazione

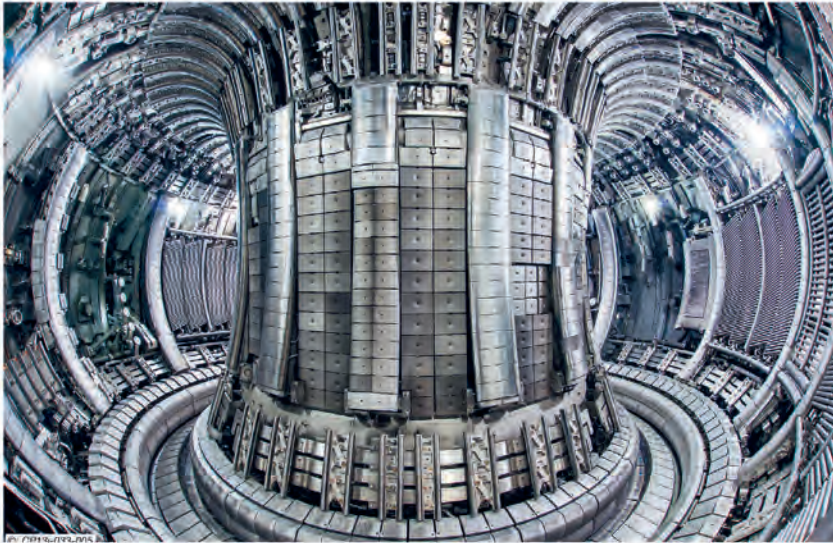
L'energia geotermica



Sopra: in linea di principio, l'energia geotermica potrebbe far fronte al fabbisogno umano, sebbene il suo sfruttamento diventi più costoso quanto più si scende in profondità, e necessiti di apposite competenze e impianti di produzione specializzati. La morfologia del sottosuolo, inoltre, non è ovunque idonea all'impiego di questa risorsa.

delle molecole utili, determinato dalla barriera energetica dello specifico materiale impiegato; a sua volta questo decreta la fonte di energia più appropriata da somministrare. Se la dose di energia applicata è troppo alta, il materiale può bruciare o esplodere. Se invece è troppo bassa, non si ottengono le modifiche volute. Il processo di apporto energetico deve essere compatibile con le proprietà del prodotto: ecco perché l'acciaio viene scaldato negli altiforni a temperature di migliaia di gradi, mentre il cioccolato viene fuso delicatamente a 40-50 gradi.

Per sottolineare quanto possa essere disomogeneo l'uso dell'energia, si può confrontare il potere distruttivo di una bomba con quanto consuma un organismo umano. Un adulto sano brucia circa 2.000 calorie al giorno, che corrispondono a 8 megajoule (MJ) – più o meno la stessa quantità di energia rilasciata dall'esplosione di otto candelotti di dinamite.



Sopra: l'interno del Joint European Torus, un reattore sperimentale a fusione presso Culham, nel Regno Unito. La fusione nucleare promette un'energia economica, abbondante e priva di effetti collaterali, ma i tentativi di sviluppare un processo stabile e

duraturo non hanno ancora avuto successo. Lo sfruttamento dell'energia di fusione senza autodisciplina è in grado di compromettere gli ecosistemi in tempi molto brevi; il suo sfruttamento assennato, invece, potrebbe rivalorizzare qualsiasi materiale.

È chiaro che il tempo impiegato nei due processi è molto diverso: invece di pochi millisecondi, occorre un giorno intero affinché 8 MJ vengano convertiti in energia dissipata nell'infrarosso e materiali di scarto. Il rilascio rapido di una simile quantità è dirompente, mentre quello lento offre agli organismi il tempo di mettere a frutto le risorse riorganizzando le molecole per l'autosostentamento, ossia per il mantenimento dei processi metabolici, di sviluppo e di movimento.

Un ciclo produttivo ben ponderato implica un equilibrio tra il tasso di cessione dell'entropia e quello dell'apporto energetico necessario per riorganizzare le molecole in strutture utili; tale bilanciamento è regolato dalle proprietà del materiale, non dalla fonte di energia. Tutti i processi produttivi si possono immaginare su una scala di consumi energetici che oscilla tra due estremi: da un lato il rilascio rapido e casuale come quello della dinamite, dall'altro la lenta e meticolosa crescita degli organismi viventi.

Al momento, invece di gestire al meglio l'entropia inevitabilmente dispersa nell'ambiente sotto forma di calore, vengono prodotti scarti insieme a un eccesso di anidride carbonica e altre emissioni in atmosfera. In questo modo il danno è quadruplice: inquinamento, controllo inadeguato dell'entropia, aumento di energia bloccata in atmosfera e riduzione della capacità di correzione dei sistemi naturali. Nella nostra epoca l'approccio poco sofisticato ai materiali è forse la più grande occasione persa per uno sviluppo economico e produttivo più sostenibile. C'è molto da guadagnare se si affronta il problema secondo quest'ottica, piuttosto che aumentare sconsideratamente il volume delle limitate risorse che vengono estratte, consumate in modo inefficace e scartate troppo in fretta.

L'economia circolare

In definitiva, l'efficienza di un'azienda dipende dall'intelligenza con cui riorganizza la materia in base all'energia di cui dispone. Se tuttavia si persevera in processi di trasformazione con modalità insostenibili per le disponibilità energetiche, i sistemi vanno incontro al collasso. Allo stesso modo, optare per un tasso di produzione di energia superiore a quello con cui è possibile riorganizzare la materia porterà ad un accumulo di entropia e di rifiuti inutilizzabili. Un approccio alternativo per ridurre l'impatto totale delle attività antropiche sul pianeta è rappresentato dall'economia circolare, ossia la gestione ecosostenibile delle risorse che coinvolge processi di simbiosi industriale per un successivo riutilizzo dei prodotti di scarto. Se il mondo non è in grado di adottare queste strategie, il rischio è di compromettere tutti i sistemi da cui l'uomo dipende per la sua sopravvivenza.



Realizzazione di un bio-smartphone

Si sa che le piante, attraverso la fotosintesi, intercettano il flusso di energia solare e, prima di restituirla all'ambiente, la impiegano utilmente per riorganizzare le loro molecole e fabbricare steli, foglie, fiori e radici. Questo tangibile miracolo suscita una domanda: è possibile imparare a coltivare i materiali nel modo in cui legno, ossa, conchiglie, seta o altro crescono nel mondo naturale? Gli esseri umani non potrebbero ideare un sistema in cui l'energia solare, senza dover generare elettricità, sia incanalata direttamente nella realizzazione di un prodotto creato in loco con "nutrienti" riciclati? Quanto sarebbe straordinario se uno smartphone potesse crescere su un albero come una mela?

In questo esperimento speculativo, distribuito lungo i capitoli del libro, si valuta il modo di sviluppare un equivalente dello smartphone ispirato alla biologia. L'ipotetico bio-smartphone viene analizzato nel contesto dei temi trattati in ogni capitolo; alla fine sarà evidente che, per quasi tutti i componenti e le funzionalità presenti in un dispositivo contemporaneo, esistono analoghi organici. Al termine di ogni capitolo si ipotizzano procedimenti attraverso cui materiali di scarto ed energia potrebbero essere utilizzati per far crescere un apparecchio con modalità che ricordano quelle di un albero che fa crescere i suoi frutti.

Ma quali sono i componenti da includere in un bio-smartphone? Se si smonta un normale telefono, i sistemi essenziali sono poco più di una manciata: una fonte di energia (batteria), una memoria a breve e lungo termine (memoria flash e RAM), un'interfaccia utente (fotocamera, schermo, pulsanti, altoparlante, microfono, vibrazione), un'interfaccia di rete (sistemi radio), un sistema di controllo per collegare i componenti (processori e software) e un involucro esterno per tenere tutto insieme. Dalla pelle di calamaro alla seta, dal DNA alla biochimica cellulare, è possibile ispirarsi alla natura per costruire ognuno di questi componenti.

Occorre anche trovare un modo per realizzare il dispositivo. Attualmente ogni parte elettronica è realizzata in un processo a sé stante, magari in aziende specializzate, e integrato in un secondo momento. In un dispositivo che "cresce" in un unico luogo, tutto deve essere prodotto e assemblato nello stesso momento: un'altra grande sfida!

Ancora più sorprendente è il fatto che la natura è in grado di creare questi componenti a partire da risorse basilari ma onnipresenti – aria, suolo, acqua e luce solare – e

che questi, al termine del loro ciclo vitale, vengono automaticamente restituiti alla biosfera, pronti per essere riutilizzati. Se fosse possibile emulare questi meccanismi, l'uomo sarebbe in grado di promuovere il progresso economico alimentando i processi produttivi grazie alla luce del sole, riciclare tutti i materiali con la stessa facilità con cui si fa il compost e riprogrammare il sistema di produzione per fabbricare in loco articoli diversi con la stessa facilità con cui si modificano le sequenze del DNA.

In questo esercizio speculativo gli autori hanno preso come esempio lo smartphone perché è uno dei dispositivi più sofisticati sul mercato; se si riuscisse a coltivare e poi a riciclare un oggetto simile, sarebbe possibile farlo con *qualsiasi cosa*, perfino con un'astronave.



Sopra: Il bio-smartphone dovrebbe emulare componenti e funzionalità di un telefono moderno, tra cui batteria e circuiti, RAM, memoria flash, schermo sensibile al tocco,

altoparlante, microfono, fotocamera, notifiche con vibrazione, comunicazione radio e involucro esterno.

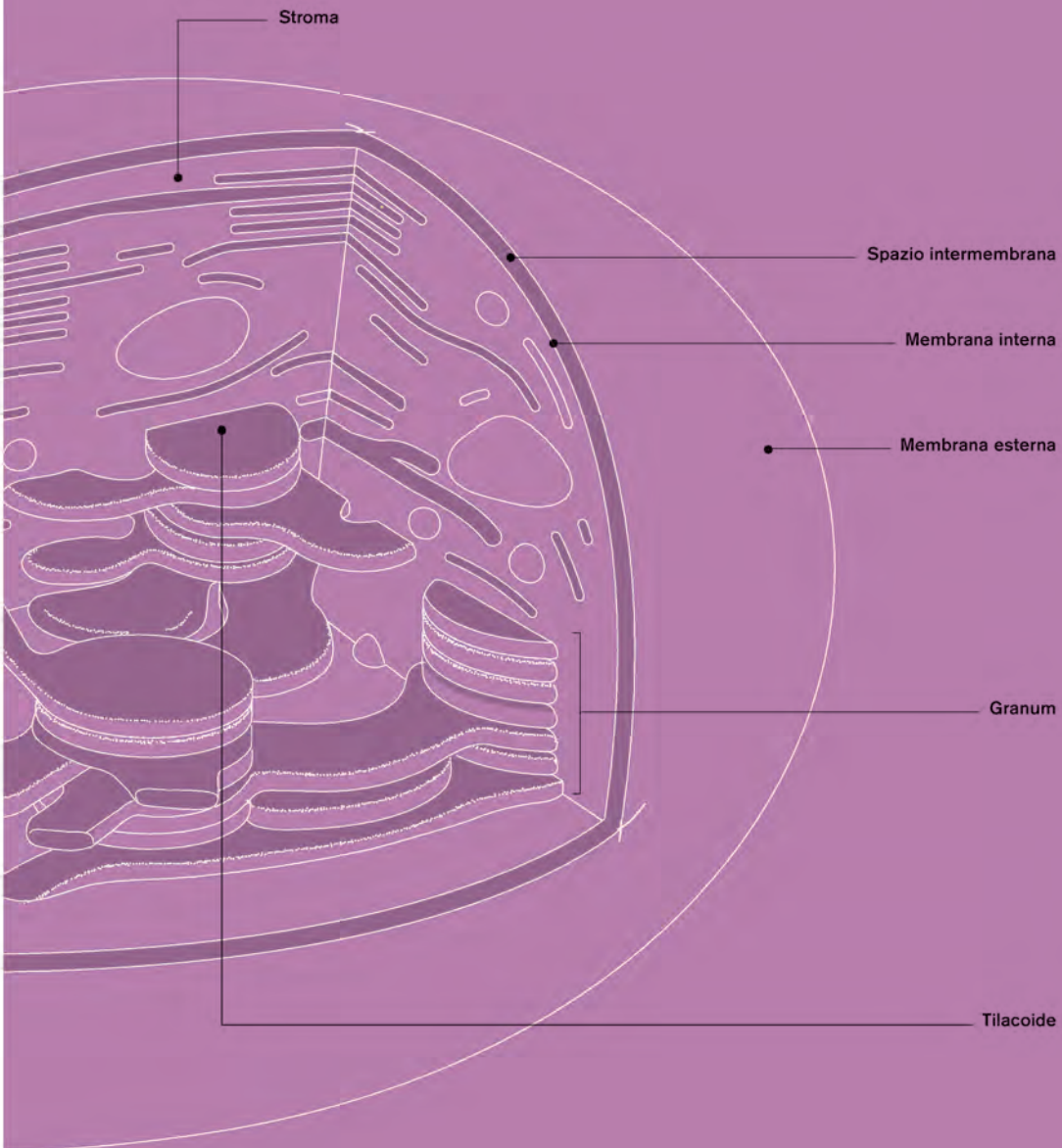
2 Il fenomeno della circolarità



Struttura del cloroplasto

“Per chi ritiene che le piccole cose non esistano, le grandi non sono tali”

José Ortega y Gasset, filosofo (1883–1955)



Dalla natura si possono trarre notevoli ispirazioni per concepire un'economia di tipo circolare. Le prime forme di vita sulla Terra sono emerse da sistemi prebiotici di cui si sa poco o nulla, probabilmente perché i loro componenti sono stati riciclati da tempo. Per quasi quattro miliardi di anni i processi connaturati a quegli organismi primordiali sono andati incontro a una continua evoluzione, poiché la selezione naturale ha ottimizzato la gestione dell'energia e dei materiali a disposizione, massimizzando l'efficienza e minimizzando gli sprechi.

Sebbene non sia mai stata l'unica alternativa possibile, i primi a migliorare il loro rendimento in termini di risorse sono stati gli organismi in grado di sfruttare la luce solare grazie alla fotosintesi. Gli ecosistemi così generati hanno sviluppato proprietà circolari perfezionando la rivalorizzazione degli scarti e il reimpiego di molecole preconfigurate, scambiabili tra un organismo e l'altro. Per rendersi conto delle sinergie coinvolte in questi processi, e quanto si discostino dai sistemi economici lineari umani, è necessario comprendere in quale modo la vita riuscisse ad autosostentarsi.

Energia dall'ambiente

Nelle fasi iniziali della storia della vita le vie metaboliche erano quelle della chemiosintesi, non della fotosintesi (ossia, traslando, batterie invece di pannelli solari). Durante la genesi del pianeta, nella crosta terrestre si era accumulata una notevole quantità di energia vincolata nei legami molecolari, da allora continuamente reintegrata attraverso processi geofisici o reazioni di fissione nucleare nelle profondità del nucleo. Le prime forme viventi si sono evolute instaurando una serie di catene di trasporto – flussi di elettroni ceduti o acquisiti – tra i composti inorganici disponibili nel substrato, come acido solfidrico, nitriti e ammoniaca; grazie all'energia liberata in queste reazioni, esse hanno potuto convertire l'anidride carbonica atmosferica in sostanza organica (zuccheri) e sostenere il loro ciclo vitale.

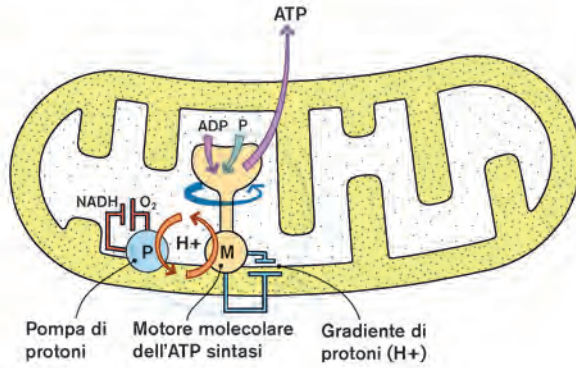
Per portare a termine il compito occorrevano particolari strumenti biochimici in grado di catturare gli elettroni e trasferirli lungo i percorsi di ossidazione (o deidrogenazione), identificabili nelle proteine. Queste sono state riconosciute come una classe di molecole versatili essenziali a tutti i processi e le funzioni vitali, dalla sintesi chimica ai segnali scambiati tra cellule. Le proteine sono costituite da polimeri (pag. 20) a loro volta costituiti da lunghe successioni di unità più semplici, gli aminoacidi.

Esistono diversi modi per disporre una catena di aminoacidi in una struttura compatta tridimensionale, ma un'unica conformazione si presenta srotolata. Per questo motivo, grazie al moto browniano, è più probabile trovare una proteina ripiegata, piuttosto che distesa come una collana. Ogni specifica modalità di riarrangiamento nello spazio è determinata dalla sequenza amminoacidica, che in diversi casi dà luogo a strutture tridimensionali prevedibili per particolari condizioni ambientali. Questa caratteristica ha reso questa classe di macromolecole una delle più poliedriche del mondo vivente, ed è anche il motivo per cui l'evoluzione è stata in grado di modulare il loro comportamento in modo così preciso.

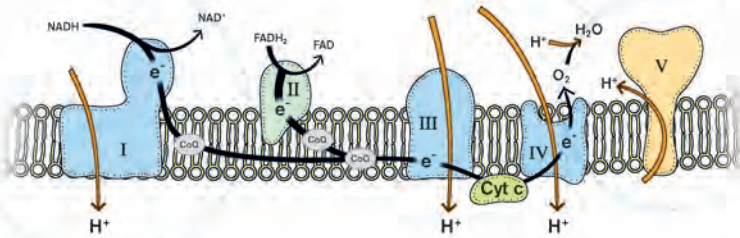
Gli enzimi, proteine specializzate, sono utilizzati da tutte le forme di vita per elaborare le sostanze presenti nell'ambiente circostante allo scopo di ricavarne nutrienti ed energia. La struttura tridimensionale di un enzima gli permette di interagire con quella di un determinato composto influenzando sulla sua conformazione. Nel primo capitolo si è parlato di barriera energetica di un materiale, definita come "resistenza" al riarrangiamento. Gli enzimi sono catalizzatori biologici; riducono l'energia di attivazione necessaria per compiere una specifica reazione chimica abbassando le barriere energetiche e rendendo più facile il riarrangiamento delle molecole interessate. Gli enzimi sono impiegati per accelerare i pro-

Un circuito elettronico in natura

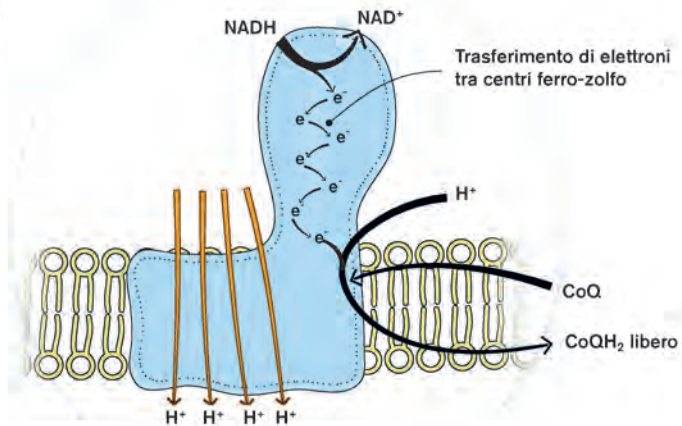
Mitocondri



Catena di trasporto degli elettroni



Complesso I



cessi chimici anche a livello domestico e industriale. Se un detersivo è “bio”, ad esempio, include lipasi e proteasi, che ne potenziano l’effetto detergente; il caglio contiene enzimi coagulanti che convertono le proteine del latte in una pasta da cui si ottiene il formaggio.

Un circuito elettronico in natura

Durante la prima fase della chemiosintesi i microrganismi ossidano i “nutrienti” (sostanze inorganiche) presenti nel loro ambiente attraverso un complesso di reazioni enzimatiche in cui avviene il trasferimento di elettroni da una specie chimica all’altra. L’energia degli elettroni è quindi immagazzinata nelle molecole di ATP (adenosintrifosfato), che rappresenta una riserva energetica universale trasportabile ovunque sia necessario per sostenere l’attività metabolica. Tale architettura standardizzata implica che i processi intracellulari siano alimentati indipendentemente dalla tipologia o dalla quantità di “nutriente” presente nell’ambiente esterno, e ogni sistema biologico noto si è adattato all’utilizzo di ATP come vettore energetico. Di fatto è possibile trapiantare le attività metaboliche di una specie nelle cellule di un’altra specie senza comprometterne la fisiologia: un vantaggio sfruttato abitualmente dall’ingegneria genetica. Grazie a questo “accumulatore” universale, molti microrganismi si sono opportunamente equipaggiati con l’equivalente chimico di un coltellino svizzero: un kit polifunzionale di enzimi che consente di ottenere un flusso di elettroni da un’ampia varietà di “combustibili” chimici disponibili nel substrato attivando l’enzima specifico e ottenendo ogni volta un determinato prodotto finale.

La capacità di ossidare un’ampia varietà di substrati ha permesso alle prime forme di vita terrestre di sopravvivere anche in ambienti estremi. Alcuni procarioti (batteri e archei, organismi unicellulari strutturalmente simili) possono colonizzare

Pagina accanto: i sistemi biologici, facendo uso di componenti nanometriche, svolgono funzioni equiparabili a quelle dei dispositivi elettronici umani. Nei mitocondri, le pompe protoniche utilizzano l’energia delle reazioni di ossidoriduzione (come in una batteria) per trasferire i protoni (H⁺) dalla matrice mitocondriale allo spazio intermembrana;

quando questi ritornano nella matrice, il motore dell’ATP-sintasi ne sfrutta il potenziale elettrochimico per generare una molecola di ATP. Nel dettaglio, è mostrato il flusso di elettroni che viaggia lungo i trasportatori all’interno dei diversi complessi multienzimatici (I-IV) che compongono la catena respiratoria.

sorgenti idrotermali sottomarine, ghiacciai, deserti, laghi ad alta concentrazione salina, profondità oceaniche, ambienti a elevatissima acidità e altri habitat ostili. Si ha notizia di batteri che si sono evoluti per sopravvivere persino in una camera bianca della NASA, digerendo i composti organici contenuti nei prodotti per la pulizia dei pavimenti, in origine destinati a eliminarli.

Dopo i due secoli trascorsi dalla comparsa delle prime materie plastiche, sono stati individuati batteri e funghi in grado di degradarne e assimilarne alcune, purtroppo non a un ritmo pari a quello con cui vengono prodotte.

Sistemi energetici compatibili

Durante il ciclo di Calvin, seconda fase della chemiosintesi, le molecole di ATP vengono impiegate nel processo di fissazione del carbonio (CO_2 atmosferica) con successiva sintesi degli zuccheri, composti organici complessi in grado di immagazzinare l'energia a lungo termine. Se diminuiscono i nutrienti presenti nel substrato, la cellula ricorre a queste riserve: dall'ossidazione di una molecola di glucosio si generano 38 molecole di ATP (con una resa netta di circa 32 ATP).

Brucciare dello zucchero in presenza di ossigeno rilascia l'energia intrappolata molto rapidamente ma, come nell'esempio del candelotto di dinamite, questo tipo di trasformazione convoglia il rilascio di entropia in modo inefficiente. Lo straordinario meccanismo della respirazione, di cui dispongono gli organismi viventi, evita lo spreco pur gestendo esattamente le stesse reazioni chimiche. Il processo avviene nella catena respiratoria, una serie di complessi multiproteici che rappresenta uno splendido esempio di bioelettronica. Il processo di estrazione dell'energia dallo zucchero immagazzinato è molto simile al primo stadio della chemiosintesi: lo si può pensare come un ottovolante di elettroni.

Lungo la catena di trasporto gli elettroni del "combustibile" passano, come testimoni subatomici di una staffetta biologica, da molecole che tendono a cederli a molecole che tendono a riceverli. A ogni passaggio, l'energia delle particelle è utilizzata per alimentare le pompe che spingono gli ioni H^+ (protoni) attraverso la membrana mitocondriale interna, il cui accumulo genera un gradiente elettrochimico che costituisce una fonte di energia libera, essendovi temporaneamente conservata gran parte di quella prodotta dalle reazioni di trasferimento di elettroni.

Alla fine della catena, l'elettrone viene consegnato all'accettore terminale - ad esempio ossigeno, nitrato o solfato - dando origine a un composto inorganico finale come

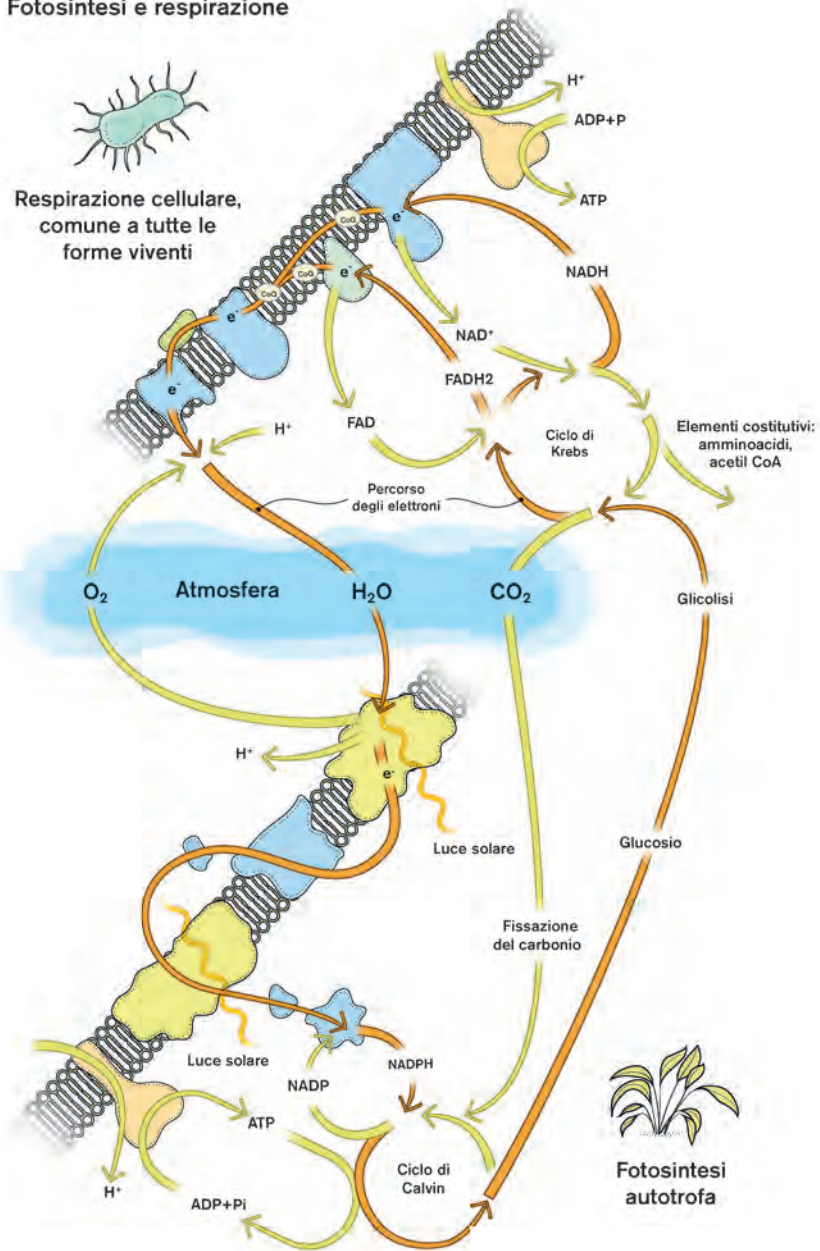
acqua, azoto o idrogeno solforato. Per riequilibrare la differenza nella concentrazione e nella distribuzione di cariche, i protoni accumulati nello spazio intermembrana tendono a ritornare verso la matrice mitocondriale, ma dato che la membrana è impermeabile alle specie ioniche, sono costretti a fluire attraverso l'apposito canale protonico di un microscopico "motore" molecolare: l'enzima ATP sintasi. La forza proton-motrice aziona una serie di torsioni e deformazioni nelle subunità dell'enzima, che inducono un gruppo fosfato (Pi) a instaurare un legame altamente energetico con l'adenosin difosfato (ADP) e a formare ATP; poiché la conversione ATP - ADP+Pi è reversibile, la reazione può avvenire più e più volte. Questo straordinario processo sposta l'energia dal combustibile originario (che sia uno zucchero o un altro composto), e la immagazzina sotto forma di ATP, il quale alimenta ogni processo cellulare scindendosi di nuovo in ADP e singolo gruppo fosfato.

In breve, per compiere cambiamenti utili mantenendo il proprio livello di ordine i sistemi viventi acquisiscono piccole quantità di energia dall'ambiente, scegliendo quando e dove dissipare minime quantità di entropia, che aumenta di poco il disordine esterno. Questo approccio è in netto contrasto con i processi antropici, che sfruttano le fonti energetiche producendo grandi quantità entropia in una volta sola.

Energia dalla luce solare

Durante le prime tappe dell'evoluzione, alcuni procarioti hanno sviluppato competenze nuove, riuscendo a sfruttare l'energia radiante con la fotosintesi. Sebbene questo processo presenti alcune varianti, tutte seguono lo stesso approccio in due fasi della chemiosintesi. Nella prima fase l'energia viene catturata da una fonte esterna - in questo caso la luce - e temporaneamente immagazzinata in ATP; in seguito l'ATP viene utilizzato per fissare il carbonio dall'atmosfera (organica) e costruire molecole in cui viene stoccata l'energia chimica. Nella prima fase un fotone colpisce il centro di reazione P680 (fotosistema II), un complesso costituito di pigmenti antenna e clorofille particolari. La clorofilla, eccitata, subisce un'ossidazione come i combustibili inorganici della chemiosintesi, ossia cede un elettrone quando torna allo stato fondamentale, che viene sostituito da un elettrone a bassa energia prelevato da una molecola d'acqua (per fotolisi dell'acqua), resettando rapidamente il fotosistema per il fotone successivo. L'elettrone perso dalla clorofilla passa nel frattempo a uno specifico accettore e quindi a una catena di trasportatori, giungendo al centro di reazione P700 (fotosistema I), in cui il pigmento,

Fotosintesi e respirazione



a sua volta eccitato da fotoni incidenti, ha ceduto elettroni e li ha trasferiti alla ferredossina, che ossidandosi riduce NADP+ in NADPH. L'energia del flusso di elettroni lungo la catena di trasporto viene utilizzata per pompare protoni all'interno della membrana tilacoïdale, e questo, insieme alla scissione delle molecole di acqua in O₂ e 4H⁺, crea un gradiente protonico utilizzato per la sintesi di ATP.

La separazione della fonte di elettroni (acqua) dalla fonte di energia (luce) conferisce alla fotosintesi un grande vantaggio rispetto alla chemiosintesi. L'ubiquità dei materiali di partenza libera gli organismi fotosintetici dalla ricerca di combustibili chimici come idrogeno solforato o ioni ferrosi (in grado di fornire sia elettroni sia energia) e, oltre a questo, da residui potenzialmente inquinanti. È straordinario che la fonte di elettroni per la fotosintesi sia anche il prodotto di scarto della respirazione – l'acqua – chiudendo così il ciclo della materia. Questo ciclo chiuso incentrato sull'acqua è il cuore della circolarità negli attuali ecosistemi.

La seconda fase della fotosintesi – il ciclo di Calvin – è simile a quella che avviene nella chemiosintesi. L'energia ricavata da ATP e NADP viene utilizzata per ridurre la CO₂ atmosferica a carbonio organico, ossia in grassi e zuccheri che costituiscono una riserva di energia a lungo termine, e sono abbastanza stabili da poter essere trasportati oltre i confini cellulari.

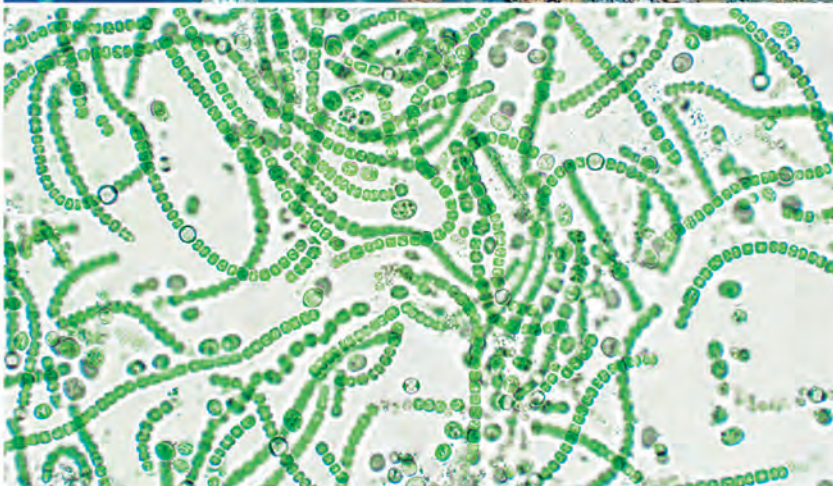
Bioelettronica

Che siano costituite da minerali, luce solare o fluidi emanati da un camino idrotermale, gli organismi viventi si sono evoluti in modo da sfruttare le fonti ambientali, sviluppando allo scopo veri e propri "circuiti bioelettronici".

Si può affermare che l'elettronica sia comparsa ben prima che gli antenati di Faraday o Tesla camminassero sulla Terra, anche se il modo di utilizzarla era e resta completamente diverso: la natura manipola i suoi circuiti su una scala di singole molecole e singoli elettroni, lungo catene biochimiche organizzate con estrema cura.

Pagina accanto: in un ecosistema ogni organismo fa parte di un circuito elettronico collegato all'ambiente circostante. Qui sono rappresentate le due fasi della fotosintesi e della respirazione. Gli elettroni dell'acqua,

passando lungo la catena di trasporto, sfruttano la radiazione solare per sintetizzare i componenti essenziali alla vita, prima di tornare di nuovo all'acqua.



Sopra, in alto: sono note comunità straordinarie e diversificate guidate da un metabolismo chemiosintetico. I camini idrotermali sul fondo dell'oceano rilasciano nutrienti chimici che, in prossimità dello sbocco, sostengono interi ecosistemi.

Sopra, in basso: dato che hanno iniziato a sfruttare l'energia solare circa 3,5 miliardi di anni fa, i cianobatteri sono stati tra i primi organismi fotosintetici presenti sulla Terra.

Le catene di trasporto degli elettroni di fotosintesi e respirazione sono circuiti molecolari; al posto dei fili, la loro elettronica è formata da una serie di sofisticate molecole non proteiche dette gruppi prostetici o cofattori, che incastonate in determinate proteine conferiscono loro proprietà aggiuntive. La specificità tridimensionale delle forme proteiche controlla le possibili connessioni tra circuiti. Alcuni cofattori coordinano uno o due atomi metallici che sono in grado di acquisire e rilasciare elettroni. Spesso sono colorati perché assorbono determinate lunghezze d'onda nel visibile riflettendone altre: l'eme, ad esempio, gruppo prostetico dell'emoglobina deputato al trasporto di ossigeno in tutto l'organismo, cambia da rosso scuro a rosso vivo quando l'atomo di ferro centrale viene ossidato; la clorofilla, gruppo prostetico in cui è coordinato un atomo di magnesio, intercetta la radiazione visibile rossa e blu, rendendo le piante verdi.

Le proteine dotate di gruppo prostetico possono auto-assemblarsi in circuiti molto più complessi, dando agli organismi la capacità di spostare elettroni lungo catene di cofattori che collegano tra loro i siti in cui avvengono reazioni chimiche attentamente controllate. In questo modo, la materia soffice (pag. 20) può essere impiegata per costruire canali di trasmissione e conduzione mediante autoassemblaggio, senza bisogno di energia ad alta intensità per conformarli in modo corretto. In sostanza, sono necessarie risorse energetiche molto modeste. Una volta padroneggiata l'elettronica molecolare, ciò che ha permesso ai cianobatteri di iniziare a raccogliere la radiazione solare circa 3,5 miliardi di anni fa è stata la capacità di rielaborare il circuito della respirazione riutilizzando alcuni degli elementi in essa coinvolti.

I mitocondri, punto di svolta dell'elettronica cellulare

Nelle cellule eucariotiche vegetali e animali la respirazione avviene nei mitocondri. Si tratta di organuli specializzati presenti nel citoplasma, dotati di una membrana esterna e di una membrana interna che circonda uno spazio di consistenza gelatinosa, la matrice, e funge da barriera selettiva per il passaggio di ioni e molecole in ingresso e in uscita. La membrana interna ospita i complessi multienzimatici deputati alla fosforilazione ossidativa e i motori molecolari necessari alla sintesi di ATP. Essa rappresenta anche una tappa importante nell'evoluzione della vita sulla Terra.

I biologi evolutivisti ritengono che le cellule eucariotiche – quelle di piante, animali, funghi, protozoi e cromisti – si siano evolute casualmente a causa di una "digestione" non completata. Secondo la teoria, un microrganismo ha cercato di fagocitare un altro;

la cellula più piccola è sfuggita al suo destino ma è rimasta intrappolata e si è adattata a vivere all'interno di quella più grande.

Fondamentalmente il protomitocondrio, più piccolo, ha trovato nuovi nutrienti e, data la sua specializzazione nel metabolismo ossidativo, ha messo a disposizione del suo ospite un maggior numero di ATP: un buon affare per entrambi i partner. Fatto importante, la cellula inglobata era dotata di un proprio DNA e poteva riprodursi insieme all'ospite passando di generazione in generazione. Nel mezzo miliardo di anni successivi, le due entità si sono evolute insieme in modo simbiotico; questa cooperazione ha aperto la porta a processi di respirazione più efficienti, permettendo agli eucarioti di prosperare e diffondersi in tutto il pianeta.

Anche i cloroplasti sono organuli delimitati da membrana e ricchi di clorofilla, e si pensa che abbiano avuto origine da un analogo processo di endosimbiosi casuale tra un batterio chemiosintetico e un ancestrale cianobatterio fotosintetico. I due processi simbiotici operano in parallelo con vantaggio reciproco: mitocondri e cloroplasti formano un sottosistema autoassemblante per la gestione dell'energia in grado di alimentare interi ecosistemi.

Nel ciclo fotosintesi-respirazione, l'elettrone parte da una molecola d'acqua e arriva a una molecola d'acqua. Il processo capta parte dell'energia elettromagnetica solare prima che venga di nuovo riflessa nello spazio e la trasforma nell'energia chimica custodita nei composti organici, dove rimane stabile per tutto il tempo necessario. Questo indica come il fenomeno della circolarità possa nascere spontaneamente da un insieme di elementi costitutivi comuni. Combustibili (input) e scarti (output) coinvolti in un processo possono essere i reciproci output e input di un altro, e l'intero ciclo duale può essere alimentato dalla luce solare. Entrambe le fasi del processo traggono vantaggio da una continuità senza soluzione, e il loro effetto combinato è responsabile dell'equilibrio dei gas - O₂, CO₂ e N₂ - che compongono l'atmosfera, il mezzo di collegamento.

Evoluzione dell'efficienza

I processi biochimici fondamentali come la fotosintesi esistono da miliardi di anni, un tempo sufficiente per permettere alla selezione naturale di individuare le soluzioni migliori e più efficienti nell'elaborazione di combustibili e scarti all'interno del bilancio energetico complessivo. Charles Darwin, il padre dell'evoluzionismo, aveva identificato quattro principi chiave per il verificarsi della selezione naturale:

1. **Competizione:** la limitazione delle risorse impedisce la sopravvivenza e la riproduzione di ogni individuo.
2. **Variabilità:** gli individui di una popolazione presentano caratteri diversi.
3. **Ereditarietà:** la prole eredita i caratteri dai genitori.
4. **Selezione non casuale:** i caratteri ereditari influenzano sopravvivenza o capacità riproduttiva.

Gli ecosistemi naturali soddisfano questi criteri; di conseguenza, in una popolazione tenderanno a diffondersi i tratti che rendono alcuni individui avvantaggiati rispetto ad altri. Nel corso del tempo, le piccole variazioni nelle popolazioni possono arrivare a modificare radicalmente le caratteristiche di una specie, o addirittura a dare origine a una specie distinta: questa è l'evoluzione. Oggi si sa che la trasmissione dei caratteri dai genitori alla prole avviene grazie al DNA, ossia al corredo di geni che controllano sviluppo, aspetto e comportamento dell'organismo di appartenenza. I genotipi che rendono un individuo idoneo al suo ambiente e favorito dal punto di vista riproduttivo (fitness) tendono a diventare più comuni. Da qui il concetto di "sopravvivenza del più adatto".

Nessun organismo è un'isola

Nessun individuo vive in modo isolato; ogni organismo fa parte di una rete. Qualsiasi habitat che ospiti una comunità ecologica insieme a componenti non biotici, come acqua e rocce, forma un ecosistema. All'interno di un determinato ambiente le specie che vedono esaurire le loro fonti di cibo finiscono per scomparire, mentre le varianti evolutive in grado di approfittare di risorse non sfruttate – come gli scarti di altri organismi – godono di un vantaggio selettivo. Nel corso del tempo, la selezione naturale riadatta le reti dei viventi in modo da favorire il successo delle specie in grado di reintegrare le risorse in modo reciproco. Il risultato è un sistema interconnesso di riciclaggio collettivo che opera in modo efficiente all'interno degli inviolabili confini energetici del pianeta.

Un ettaro di foresta pluviale tropicale ospita una quantità enorme di radici e rami, e miliardi di foglie. In un solo giorno, gli alberi pompano centinaia di migliaia di litri d'acqua all'esterno e assorbono tonnellate di anidride carbonica dall'atmosfera. In effetti, grazie alla stupefacente capacità delle foreste di elaborare la materia, l'Amazzonia produce metà delle precipitazioni che riceve e influenza i modelli meteorologici globali.

Ecosistemi dinamici

Sebbene non esistano due ecosistemi uguali – le variazioni avvengono a causa del clima, della geologia, dell'altitudine e di eventi casuali – essi sono governati da alcuni principi universali. Il primo è rappresentato dalle leggi della termodinamica (pag. 18) secondo cui (semplificando) materia ed energia non possono essere create o distrutte, e l'entropia tende ad aumentare. Altri vincoli vengono dalla stechiometria, che stabilisce in quali rapporti reagiscono le sostanze, dalla dinamica dei fluidi, dalle proprietà meccaniche dei materiali, da aerodinamica, idrodinamica e altro ancora. Ultimo ma non meno importante, è chiaro che il destino a lungo termine di un ecosistema è guidato dall'incessante selezione naturale che opera al suo interno.

I genetisti delle popolazioni pensano spesso alle specie in termini di pool genico, ovvero della somma totale di tutte le varianti di un gene (alleli) condivise da una popolazione interfertile. Nel corso del processo evolutivo queste forme modificate competono per la supremazia, ma una popolazione può custodire una serie di varianti alleliche dello stesso gene senza che nessuna prevalga sull'altra. Questo è il motivo per cui, ad esempio, i capelli umani possono avere colori diversi e il mantello dei gatti disegni differenti.

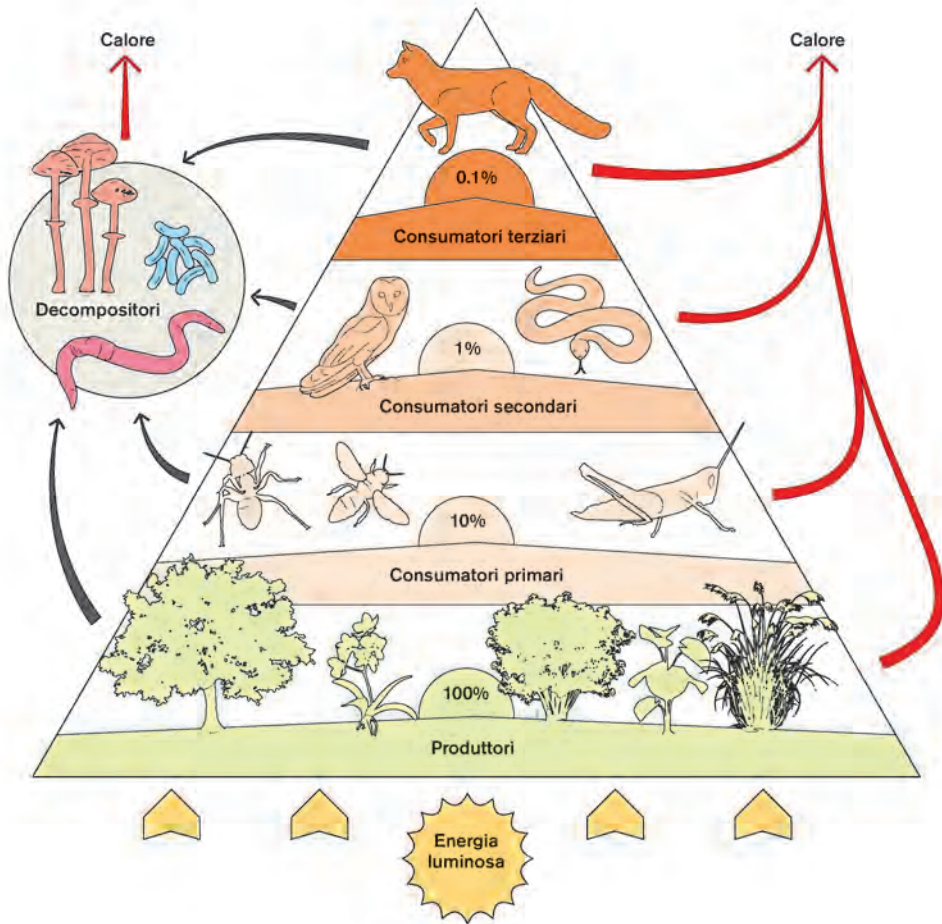
La presenza di varianti all'interno di una specie si dimostra utile quando le condizioni ambientali cambiano in modo drastico o quando un'altra popolazione si evolve o migra in un altro habitat, modificando le dinamiche dell'ecosistema. Le specie con una maggiore variabilità allelica sono avvantaggiate perché è più probabile che diano origine a fenotipi in grado di affrontare le pressioni e le alterazioni ambientali, offrendo alla selezione naturale altri percorsi da seguire.

Il successo o l'insuccesso delle varianti alleliche dipende strettamente dalle componenti presenti nell'ecosistema. Se una modifica nell'habitat, ad esempio, provoca una drastica diminuzione nel numero degli erbivori, i predatori ne risentiranno immediatamente, e saranno favoriti dall'evoluzione gli individui i cui alleli conferiscono caratteristiche morfologiche e fisiologiche che consentono loro un adattamento a fonti di cibo alternative.

Il ciclo dell'energia

A seconda della funzione svolta e delle interazioni nutrizionali lungo la catena alimentare, è possibile raggruppare gli organismi di un ecosistema in una serie di livelli trofici. Il livello più basso e di gran lunga più esteso è costituito dai produttori, che ricavano

Livelli trofici



Sopra: I produttori (organismi autotrofi) ricavano i loro nutrienti da materie prime abiotiche presenti in suolo, atmosfera e acqua. I consumatori primari (es. gli erbivori) si cibano dei produttori, i consumatori secondari (es. i carnivori) predano i consumatori primari. In alcuni ecosistemi

sono presenti consumatori terziari e quaternari, definiti anche "predatori apicali", che si nutrono di altri carnivori. La danza della materia è chiusa alla fine dai decompositori, che riducono le spoglie e i rifiuti dei precedenti organismi a molecole semplici, consentendo il loro riciclo.

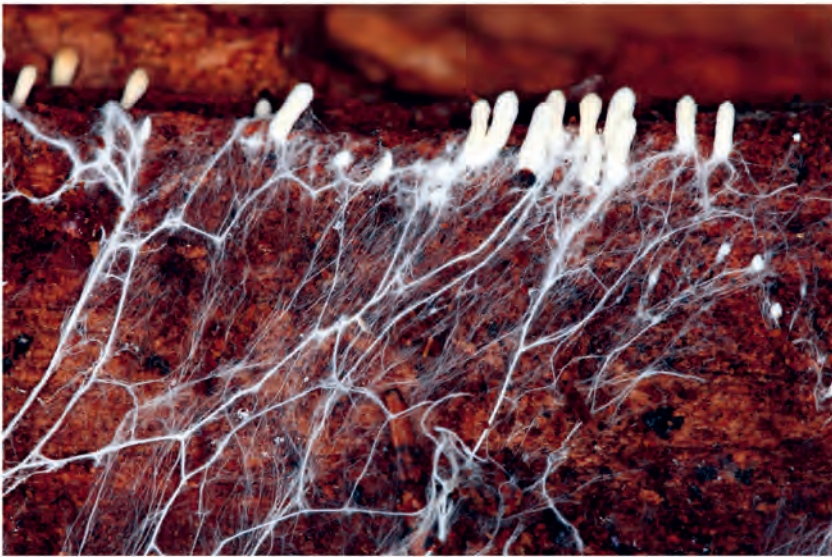
L'energia dal substrato o dall'ambiente esterno, in genere dalla luce solare. Vi sono compresi piante, alghe, fitoplancton, cianobatteri e tutti gli organismi che svolgono la fotosintesi (ma anche la chemiosintesi, se la fonte è rappresentata dall'energia chimica contenuta in composti organici o inorganici). L'energia messa a disposizione dai produttori sostiene tutto il resto. Oltre a ossigeno, acqua, anidride carbonica e luce solare, i produttori necessitano di ulteriori nutrienti chiave, tra cui azoto e fosforo; se in agricoltura vengono somministrati sotto forma di fertilizzanti, in natura devono essere reperiti autonomamente grazie a differenti strategie elaborate allo scopo.

Il 70% delle piante superiori, soprattutto legnose ma anche erbacee, è micorrizzato; ciò implica la presenza di un'associazione simbiotica tra l'apparato radicale del vegetale e il micelio di vari funghi simbiotici presenti nel terreno. Il ruolo del reticolo sotterraneo di ife fungine è molto più potente di quanto si pensasse inizialmente. Il termine "wood wide web" si riferisce all'infrastruttura incredibilmente complessa di micelio che si estende sotto boschi e foreste, permettendo ai vegetali di accedere più efficacemente ai nutrienti, di sopportare meglio gli stress idrici e termici, di interagire tramite segnali chimici, di raccogliere e scambiare informazioni, di trasmettere segnali di allarme e di condividere l'immunità a malattie o attacchi di parassiti. Le piante ricambiano questi vantaggi cedendo sostanze zuccherine ai funghi. Anche le leguminose sviluppano una relazione simbiotica con i rizobi, batteri che colonizzano le radici e sono in grado di fissare l'azoto atmosferico in un composto facilmente assimilabile.

Il secondo livello trofico identifica i consumatori primari, che hanno un regime esclusivamente vegetale (erbivori) e utilizzano l'energia immagazzinata dai produttori per sostenere le proprie funzioni biologiche. I processi digestivi scompongono il cibo in molecole che vengono assorbite dall'intestino e trasportate dal flusso sanguigno laddove è necessario. Carboidrati e grassi possono essere ossidati per sintetizzare ATP, mentre le proteine sono suddivise in aminoacidi semplici, utilizzabili per costruire nuovi composti proteici.

Per estrarre energia e nutrienti, gli erbivori (dai bovini ai conigli fino alle termiti) devono digerire la cellulosa, un polisaccaride insolubile in acqua e il principale costituente della parete cellulare esterna dei vegetali: una bella sfida che non tutti possono affrontare. Anche in questo caso è l'associazione simbiotica con comunità di microrganismi presenti nel microbiota intestinale – batteri, protozoi e funghi – che conferisce loro la capacità di scindere la cellulosa in molecole di glucosio.

Il terzo livello trofico è riservato ai consumatori secondari (carnivori), che predano i consumatori primari. Al quarto e spesso ultimo livello si trovano i predatori di consumatori secondari, che vengono definiti “apicali” poiché raramente sono a loro volta vittima di predazione. A ogni livello si riduce l’energia libera (utilizzabile), che in quello più alto non è più sufficiente per sostenere un ulteriore livello trofico. Questo è il motivo per cui la catena alimentare è in genere raffigurata come una piramide: in un ecosistema equilibrato ci sono meno erbivori che produttori, meno carnivori che erbivori e i predatori apicali sono sempre poco numerosi. La perdita di energia libera vincola la forma e la struttura degli ecosistemi e determina la “capacità di carico” di un habitat, ossia il numero di organismi che le risorse disponibili sono in grado di sostenere. Un ecosistema può superare questa capacità solo per un breve periodo, passato il quale, in assenza di variazioni nei processi metabolici, la popolazione diminuisce fino a quando la



Sopra: i funghi rappresentano una fondamentale categoria di decompositori: attraverso il reticolo di ife (micelio) che si diffonde nel terreno, essi estraggono i

nutrienti dalla materia organica in disfacimento mettendoli a disposizione delle piante. Possono inoltre diventare fonte di cibo per altri organismi della catena trofica.

catena alimentare non rientra nei limiti ambientali. Il livello trofico finale è rappresentato dai decompositori, che demoliscono rifiuti e sostanze organiche presenti nelle spoglie animali e vegetali trasformandole in composti inorganici più semplici (mineralizzazione), riutilizzabili dai produttori. In questo modo si chiude il ciclo della materia.

Sebbene il concetto di "piramide" alimentare abbia dei meriti, oggi gli studiosi preferiscono descrivere le relazioni di un ecosistema come una rete, in cui coesistono specie trofiche in grado di costruire sostanze organiche e specie trofiche che se ne nutrono, a loro volta predate o parassitate da altre ancora. All'interno di questa rete, è chiaro che alcuni componenti sono meglio collegati di altri, poiché nei "nodi" centrali le interazioni sono più numerose rispetto ai nodi marginali. I componenti centrali, noti come specie chiave, sono parte integrante del funzionamento di un ecosistema e fungono da indicatore ed emblema del suo stato di salute. La scomparsa di una specie chiave o una qualsiasi variazione della sua popolazione ha un drastico effetto a catena su tutte le dinamiche della rete trofica.

Un esempio è quello delle lontre del Pacifico, che vivono al largo della costa occidentale del Nord America predando i ricci marini e tenendone sotto controllo il numero. I ricci si nutrono di kelp gigante, una specie chiave per il suo ruolo di "polmone" planetario, scrigno di biodiversità oceanica nonché baluardo di fondali e ambienti costieri. A partire dal XVIII secolo la caccia alle lontre per la loro pelliccia, arrivata quasi a provocarne l'estinzione all'inizio del XX secolo, ha fatto esplodere la popolazione dei ricci marini, e le grandi foreste di alghe brune hanno iniziato a scomparire. Solo grazie a un attento lavoro di conservazione il numero delle lontre è tornato ad aumentare, contenendo quello dei ricci e salvando questo ecosistema unico da quello che sembrava un destino inevitabile.

Ecosistemi in equilibrio

L'energia catturata dai produttori sostiene miriadi di insetti, aracnidi, anfibi, rettili, uccelli e mammiferi. Un ettaro di foresta tropicale può ospitare milioni di formiche tagliafoglie, una specie che raccoglie enormi quantità di residui vegetali per formare speciali lettiere, all'interno dei formicai, per la coltivazione dei funghi di cui si nutrono. Altri invertebrati vivono nel suolo e nelle lettiere stesse, insieme a trilioni di microrganismi che trattano e riciclano i rifiuti. È facile meravigliarsi dell'incredibile biodiversità e complessità nell'eco-



.....

Sopra: Un crotalino brasiliano (*Bothrops jararaca*; carnivoro), un tucano toco (*Ramphastos toco*; erbivoro), una jaboticaba (*Plinia cauliflora*; produttore) e un fungo (*Aleuria aurantia*, decompositore): quattro livelli trofici in un ecosistema della foresta pluviale nel sud del Brasile.

sistema di una foresta pluviale, ma la verità è che anche il deserto o la tundra ghiacciata sono sorprendenti esempi di efficienza nell'elaborazione di energia e materiali.

Questo tipo di ecologia circolare non è tuttavia privo di fattori discriminanti: è accaduto che non solo specie, ma interi ecosistemi si siano spinti fino all'estinzione. La selezione naturale favorisce talvolta comportamenti egoistici e non collaborativi, ma nelle giuste condizioni possono emergere mutualismi che, una volta consolidati, raggiungono una certa stabilità. Allo stesso modo, la collaborazione tra i processi industriali umani è facoltativa, ma può emergere se si creano i giusti presupposti.

La circolarità è comparsa spontaneamente negli ecosistemi naturali perché i processi biochimici fondamentali che guidano la vita, ovvero la chemiosintesi, la fotosintesi e la respirazione, si sono evoluti in modo da utilizzare lo stesso gruppo di molecole in in-



Sopra: le alghe brune che costituiscono il kelp formano estese foreste sottomarine in tutto il mondo, ospitando e sostenendo centinaia di comunità biologiche. Il Marine Mammal Protection Act del 1972, seguito

da decenni di attenti programmi di tutela come quelli portati avanti dal Monterey Bay Aquarium in California (la cui foresta di kelp è ritratta nella foto), hanno contribuito a ripristinare questi delicati ecosistemi.

gresso e in uscita: anidride carbonica, acqua, ossigeno, fosfati e nitrati. Non è un caso che ognuno di questi composti abbia un proprio ciclo biogeochimico all'interno della biosfera, la cui alterazione può compromettere la stabilità delle condizioni planetarie (pag. 16). Tra i viventi, la compatibilità di molecole fondamentali come proteine, ATP e glucosio è nata da necessità chimiche, ma ha permesso agli ecosistemi di prosperare formando complesse e interconnesse reti di scambio di energia e materia.

Dal punto di vista termodinamico la continua rielaborazione e riorganizzazione dei nutrienti tra organismi ed ecosistemi e ogni processo metabolico che si svolge nelle cellule viventi porta a un aumento dell'entropia, poiché richiede una certa quantità di lavoro che riduce l'energia disponibile, in parte dissipata sotto forma di radiazione (calore). La capacità di captarla dall'ambiente (luce solare) per compensare quella persa e l'instaurazione di cicli rigenerativi che reintegrano i prodotti di scarto nella biosfera può permettere alla vita di mantenersi indefinitamente sul pianeta.

Questo non significa che ogni organismo sia sempre perfettamente integrato nel proprio habitat, né che questo sia in perfetto equilibrio. La biosfera è in continua trasformazione, oggi forse più rapidamente che mai, e la selezione del più adatto è un processo ineluttabile. Durante i periodi caratterizzati da rapidi cambiamenti gli ecosistemi lottano per trovare un nuovo equilibrio; attualmente attraversano una fase difficile, poiché sono costretti a controbilanciare le attività di otto miliardi di individui che operano in un regime di economia lineare, anziché circolare. La rapida espansione delle aree urbane e le modifiche nell'uso dei suoli hanno lasciato molte creature senza un adeguato habitat; le pratiche agricole intensive stanno togliendo nutrienti al terreno, rendendolo sterile e vulnerabile all'erosione; il cambiamento climatico ha fatto perdere ad alcune specie la sincronia con il resto della loro comunità biologica.

Come si vedrà nel prossimo capitolo, il modello economico lineare "prendi, usa e getta" non assomiglia neppure vagamente alla sofisticata gestione dell'energia che caratterizza i sistemi naturali.



Fonte di energia del bio-smartphone

La prima parte dell'esperimento speculativo sul bio-smartphone contempla uno dei componenti più importanti: la batteria. Quella più comune oggi è agli ioni di litio, una tipologia ricaricabile che immagazzina energia trasferendo ioni dal catodo, solitamente costituito da ossido di litio e cobalto, all'anodo, costituito da un composto carbonioso tipo coke, immersi in un elettrolita. In fase di carica, il catodo cede gli ioni positivi che vengono accumulati all'interno dell'anodo. Tra le batterie agli ioni di litio attualmente disponibili una delle più avanzate è il Powerwall™ della Tesla, progettata per accumulare l'energia generata dai pannelli solari e in grado di immagazzinare fino a 13,5 kWh, sufficienti per alimentare un'intera abitazione per quasi due giorni. Una recente innovazione è la batteria litio-aria, con l'elettrolita in materiale polimerico ceramico, che promette una densità di accumulo dell'energia quasi quattro volte superiore.

Sono in fase di studio anche diverse versioni di pile a biocombustibile (BFC), alternativa ispirata agli organismi viventi. Invece di immagazzinare energia immettendo ioni in un elettrodo, le BFC la stoccano nei legami chimici delle molecole, da cui prelevano direttamente elettroni grazie a percorsi enzimatici artificiali. Questi dispositivi hanno una densità di accumulo dieci volte superiore a quella di una batteria agli ioni di litio.

Le BFC presentano però alcune criticità. Gli enzimi, ad esempio, non durano a lungo, quindi le batterie ne richiedono un apporto costante. Per ovviare al problema le cellule possono essere riprogrammate in modo da agire come bio-batterie, sintetizzando in loco gli enzimi. Questo concetto è stato applicato nella pila a combustibile microbiologica (MFC). Alcuni ricercatori tedeschi hanno ingegnerizzato il batterio *Escherichia coli* per convertire la materia organica in elettricità. Il bio-smartphone potrebbe forse impiegare anche *Shewanella oneidensis*, un batterio che vegeta su differenti substrati e genera un flusso di elettroni come sottoprodotto.

Questi e altri microrganismi, come *Geobacter sulfurreducens*, hanno lunghe appendici (nanofili proteici) che gli scienziati stanno emulando per sviluppare sentieri conduttivi in grado di trasportare cariche elettriche, quindi i circuiti potrebbero essere fatti di proteine, non di metallo. La presenza di questi sentieri di conduzione non è tuttavia strettamente necessaria: il bio-smartphone potrebbe utilizzare l'energia solare per alimentare in continuo una MFC che, da anidride carbonica atmosferica e da una riserva d'acqua, proceda