

## ALLE ORIGINI DELL'ENERGIA

Senza energia non v'è lavoro (= capacità di produrre cambiamenti); senza lavoro non v'è vita. Tutto quello che un essere vivente fa richiede energia.

La prima, e fondamentale, sorgente di energia è il sole. Senza il sole mai la vita come la conosciamo avrebbe potuto sorgere e svilupparsi sulla terra. Anche tutti i combustibili fossili, dai quali la specie umana sta ricavando moltissima energia, devono la loro esistenza al sole, il quale contribuì (con anidride carbonica e acqua) a nutrire tutte quelle piante che poi, da morte, sottoterra, sono state lentamente trasformate nella materia combustibile che oggi usiamo.

Il meccanismo di base grazie al quale le piante si procurano energia è rappresentato dalla fotosintesi. Un processo di reazioni chimiche meraviglioso, che tratterò in questa sede soltanto in relazione a un dettaglio cruciale. Un dettaglio che ritroviamo anche nel meccanismo grazie al quale le cellule animali sfruttano l'energia contenuta negli alimenti.

Proprio il fatto che una modalità del tutto analoga stia alla base del processo di immagazzinamento dell'energia in tutte le cellule del mondo vivente mi spinge a contemplare tale straordinario processo biochimico, e mi induce a raccontarvelo.

Il tutto funziona in un modo che ricorda una turbina, tanto che lo chiamerò il "principio della turbina". Tale principio opera grazie alla presenza di una membrana che divide uno spazio intracellulare in due settori: nella membrana sta incastonata la "turbina", che la attraversa da parte a parte.

Facciamo però un passo indietro e partiamo da una nozione fondamentale. In tutto il mondo vivente l'energia viene utilizzata tramite una sorta di batteria ricaricabile, rappresentata dal complesso ATP (Adenosine Tri Phosphate)/ADP (Adenosine Di Phosphate). Si tratta di una speciale macromolecola organica composta da una base azotata (chiamata adenina), da uno zucchero (il ribosio) e da tre oppure due gruppi fosforici (tre o due molecole di acido fosforico). Essa può cambiare forma: quando perde una molecola di acido fosforico (così che da avere tre gruppi fosforici passa ad averne due, e da ATP diviene ADP) rilascia energia; invece, per riacquisire il gruppo fosforico perduto (e da ADP ridiventare ATP) ha bisogno di energia.

Il complesso ATP/ADP è la batteria universale dei sistemi viventi, il suo meccanismo di funzionamento è l'unico attraverso il quale tutti gli esseri viventi (piante inclusive) utilizzano l'energia per tutti i loro processi vitali. L'energia del sole, al pari dell'energia derivante dagli alimenti, per poter essere sfruttata deve passare attraverso tale batteria. Il complesso ATP/ADP è la "moneta" universale con cui gli esseri viventi "acquistano" la capacità di produrre lavoro, vale a dire di svolgere tutte le loro funzioni vitali. Non ci sono altre forme, non ci sono altri mediatori. Una barretta di cioccolato per darci forza deve diventare (= consentire di produrre) ATP; la radiazione solare per far crescere le piante deve diventare (= consentire di produrre) ATP.

La reazione chimica che fa passare l'ATP a ADP - rompendo il legame con un gruppo fosfato (P) e rilasciando energia - si chiama idrolisi, ed avviene spontaneamente per mezzo dell'acqua. Tale reazione fa parte di quelle chiamate esoergoniche perché (al contrario di quelle endoergoniche) avviene con emissione di energia. Ciò accade quando un sistema perde ordine: uno stato ordinato è più energetico di uno disordinato (come misura del disordine si usa una grandezza detta entropia). Una molecola che collega tre gruppi fosfato è più ordinata e più energetica di una che ne lega soltanto due. Essa contiene una forma di energia potenziale, chiamata energia chimica, che può essere liberata dalla reazione chimica di idrolisi. Siccome l'energia né si crea né si distrugge, l'equazione è: 'sistema ordinato' (ATP) = 'sistema meno ordinato' (ADP + P) + 'energia utilizzabile per compiere lavoro' (chiamata energia libera). Si noti che un

processo che si verifica spontaneamente deve sempre aumentare l'entropia dell'universo (seconda legge della termodinamica)<sup>1</sup>.

Torniamo al nostro complesso molecolare. La batteria una volta scaricata (vale a dire una volta idrolizzato l'ATP in ADP) è ricaricabile, e tale ricarica riducendo l'entropia del sistema ovviamente richiede energia. La ricarica è ciò che facciamo quando ci nutriamo: il cibo che consumiamo è l'alimentatore della nostra batteria ad ATP, consentendo di aggiungere una molecola di acido fosforico all'ADP, e quindi di rigenerare ATP da ADP. Tale processo si chiama fosforilazione. Una cellula muscolare in attività ricicla tutto l'ATP in essa contenuto in meno di un minuto. Tale ricambio significa il consumo e la rigenerazione di 10 milioni di molecole di ATP al secondo per cellula. Il tutto avviene in organelli della cellula chiamati mitocondri, e nel complesso questo processo prende il nome di respirazione cellulare: si parte da un composto organico (per esempio un carboidrato) + ossigeno e si ottiene anidride carbonica + acqua + energia.

Si noti che lo sfruttamento dell'energia solare da parte delle piante è indiretto: con l'aiuto della radiazione solare le piante costruiscono sostanze organiche che poi ossidano (= demoliscono) per produrre energia come tutti gli altri esseri viventi. Le piante infatti, tramite la fotosintesi, producono ATP da ADP + fosfato inorganico (c.d. fase luminosa della fotosintesi). Trasformano l'energia elettromagnetica (quella derivante dal sole) in energia chimica di legame (l'energia insita nel legame che unisce il secondo al terzo gruppo fosforico nell'ATP). Con l'ATP così prodotto le piante si riforniscono dell'energia necessaria per sintetizzare sostanze organiche (principalmente carboidrati: amido e saccarosio) partendo da acqua e anidride carbonica e rilasciando ossigeno (c.d. fase oscura della fotosintesi): l'esatto inverso della respirazione cellulare. Tutto ciò avviene in organelli della cellula vegetale chiamati cloroplasti (esattamente: l'amido viene sintetizzato nei cloroplasti; il saccarosio fuori dagli stessi, nel citoplasma cellulare). Tali sostanze organiche, poi, vengono utilizzate per costruire le varie parti della pianta oppure vengono demolite per produrre energia (cioè altro ATP), come accade in tutti gli esseri viventi. Tale demolizione avviene sempre e soltanto nei mitocondri. Anche le cellule vegetali, pertanto, possiedono i loro bravi mitocondri che svolgono la respirazione cellulare, con ciò fornendo energia per lo svolgimento di tutte le altre attività dell'organismo: quelle chimiche (per esempio la sintesi di proteine), quelle di trasporto (per esempio il passaggio di sostanze attraverso la membrana cellulare), quelle di risposta agli stimoli esterni.

Dunque i protagonisti della vicenda sono due organelli della cellula: cloroplasti e mitocondri. Sono loro i produttori di ATP: i primi sfruttando l'energia solare; i secondi sfruttando l'energia derivante dalla demolizione (= ossidazione, tramite l'ossigeno) di sostanze organiche.

Quanto avviene nei cloroplasti e nei mitocondri per produrre ATP è molto complesso e non può essere trattato in questa sede nella sua globalità. Concentriamoci sul momento finale, quello della produzione di ATP. Entra in gioco il principio della turbina, che opera sostanzialmente allo stesso modo in entrambi gli organelli.

Il segreto sta nel creare un gradiente (cioè una differenza) di concentrazione di protoni, che altro non sono che ioni H<sup>+</sup>, ovvero atomi di idrogeno privati dell'elettrone; cosa che si ottiene separando due ambienti con una membrana (non permeabile ai protoni) e concentrando molti protoni da un lato della membrana, e pochi protoni nell'ambiente sul lato opposto. Se in qualche punto della membrana si creano dei forellini attraversabili dai protoni, questi per il processo fisico chiamato diffusione si sposteranno dall'ambiente con maggiore concentrazione di protoni a quello con minore

---

<sup>1</sup> In rete si trovano molte belle immagini della struttura del complesso ATP/ADP, così come della struttura e del funzionamento dell'enzima costruttore dell'ATP, l'ATPsintasi, di cui parlo più avanti nel testo.

concentrazione, fino a quando non sarà stato raggiunto uno stato di equilibrio, in cui la concentrazione di protoni sarà la stessa in entrambi gli ambienti.

Se in quei forellini si inserisce la turbina “protonica” il gioco è fatto: il flusso di protoni farà operare il meccanismo della turbina e quel meccanismo creerà l’energia per legare un altro gruppo fosfato all’ADP, trasformandolo in ATP.

Questa turbina esiste, è un enzima e si chiama ATPsintasi (già il nome è indicativo della funzione: sintetizzare ATP), ed è la stessa (a parte dettagli qui non rilevanti) sia nei cloroplasti che nei mitocondri.

Dunque: la complessa fase iniziale della fotosintesi, quella luminosa (nei cloroplasti), e la complessa fase della demolizione dei carboidrati (nei mitocondri), servono “soltanto” a creare il gradiente di protoni. Ci vuole infatti molta energia per spostare i protoni contro il loro gradiente, vale dire per concentrarli da un solo lato della membrana. È come portare sull’alto della montagna tutta l’acqua che poi, scendendo, farà girare i meccanismi della centrale idroelettrica (e infatti chi porta lassù tutta l’acqua? Non certo l’uomo, bensì il sole, che con le sue radiazioni alimenta il ciclo dell’acqua). Tale energia dà vita a un meccanismo complesso, chiamato “catena di trasporto degli elettroni”, presente nella membrana, che pompa protoni attraverso la membrana stessa, concentrandoli nello spazio cellulare a loro destinato. In parallelo, gli elettroni si muovono tramite una serie di trasportatori chimici progressivamente più elettronegativi. Da ove vengono tali protoni (ioni H<sup>+</sup>) ed elettroni? Nei mitocondri vengono estratti dalle molecole degli alimenti, mentre nei cloroplasti vengono estratti dall’acqua.

Bene, siamo giunti ad avere la desideratissima differenza di concentrazione dei protoni al di qua e al di là della membrana all’interno del cloroplasto e del mitocondrio. Cosa che vi farà subito intuire come questi due organelli al loro interno formino dei comparti divisi da membrane (sui quali non mi dilungo). È però importante soffermarsi ad ammirare il ruolo delle membrane nel mondo biologico: la loro “invenzione” ha costituito uno dei passaggi fondamentali per l’evoluzione della vita sulla terra. La membrana cellulare consente la nascita del vivente come distinto dal non vivente, e permette tutta una serie di separazioni spaziali, e funzionali, che risulteranno indispensabili nel corso dell’evoluzione. Si pensi che anche il funzionamento dei neuroni, e quindi del nostro pensiero, si fonda su un meccanismo di gradienti di concentrazione di ioni (in quel caso ioni sodio e potassio) ai due lati di una membrana (quella citoplasmatica del neurone), con conseguente passaggio di ioni da un lato all’altro della membrana stessa e generazione di una corrente elettrica. Non posso addentrarmi sull’argomento ma è importante accennarvi per mostrare la vastità stupefacente di quel che la natura è stata capace di fare avendo a disposizione “soltanto” una membrana.

Torniamo ai nostri cloroplasti e mitocondri. Nelle loro membrane sono inserite le ATPsintasi, che sono enzimi costituiti da proteine. Vediamo qualche dettaglio.

Il processo che conduce tramite l’enzima alla sintesi di ATP viene chiamato chemiosmosi. L’ATPsintasi è un complesso enzimatico costituito da subunità. I protoni si spostano all’interno dell’enzima fino ad arrivare ad un rotore e a causarne la rotazione in un modo che si traduce nella rotazione di un altro rotore collegato al primo e infine nella sintesi dell’ATP da ADP e fosfato inorganico. Quindi il flusso di protoni ha lo stesso significato funzionale di una corrente d’acqua che fa girare la ruota di un mulino.

Il dettaglio di tutto il meccanismo è complesso: se ne trovano in rete molte descrizioni (ivi compresa quella di Wikipedia), e a queste rinvio.

Una precisazione: nei batteri, che sono organismi unicellulari molto semplici e privi di mitocondri e cloroplasti, la produzione di ATP avviene lo stesso, ed in modo analogo. I due compartimenti separati da membrana vengono però creati dentro e fuori la cellula: i protoni vengono accumulati sulla superficie esterna della membrana cellulare e poi, seguendo il gradiente, rientrano tramite i canali formati dalle ATPsintasi.

L'ATPsintasi è uno degli enzimi più conservati del mondo vivente, cosa che non può stupire perché rappresenta uno dei cardini della vita sulla terra. La sua comparsa è avvenuta con ogni probabilità molto presto nella storia della vita, in organismi molto semplici e primitivi e, data la sua enorme importanza, l'enzima è rimasto immutato all'interno di tutte le cellule viventi.

Qui si impone una riflessione. Tutti noi esseri viventi funzioniamo, per quanto riguarda l'utilizzo dell'energia, allo stesso modo. Questa uniformità riguarda anche altri aspetti fondamentali della biochimica, penso alla struttura delle proteine, e alla struttura e al funzionamento del DNA e dell'RNA. Penso a quello straordinario composto che è l'adenina, protagonista non solo dell'ATP, ma anche del DNA, dove rappresenta (insieme alla timina, alla guanina e alla citosina) una delle quattro basi azotate la cui combinazione dà luogo al "codice della vita".

Questo ci rammenta che deriviamo tutti, se non proprio da un solo progenitore comune, da una comunità, da un conglomerato, di cellule primitive affini l'una con l'altra, le quali poi si sono evolute secondo diverse linee, ma conservando molti e fondamentali elementi in comune a livello biochimico.

Questo collegamento della specie umana con tutti gli altri esseri viventi può dare forza all'idea che la nostra specie, pur con la grande complessità del suo cervello, si ponga in una linea di continuità con tutto il resto del vivente, e non costituisca un fenomeno radicalmente diverso, in ambito biologico, sotto nessun punto di vista. Se così stessero le cose, sarebbe arduo rinvenire una ragione o un argomento per il quale la nostra specie debba occupare un posto particolare o sia caratterizzata da un'unicità di destino o di scopo diversi da quelli di tutte le altre specie viventi. Lo so, questo è un terreno minato! Prima di saltare in aria ne esco rapidamente, chiarendo che la mia vuole soltanto essere una sintetica suggestione: certezze non possono esserci ed è bene diffidare di chi le sbandieri.

Seconda e ultima riflessione, anch'essa estremamente sintetica. Ho esordito fornendo una definizione classica di energia, e fingendo di esserne soddisfatto. Invece non lo sono per nulla. Quella definizione mi pare che non spieghi alcunché, e sia soltanto un modo per riferirsi alla stessa cosa con parole diverse. Il punto è che quello di energia è un concetto primitivo, vale a dire non definibile e quindi comprensibile soltanto a livello intuitivo (si tratta di una posizione sulla quale molti concordano, non tutti, naturalmente).

Tanto ciò è vero che dell'energia si studiano (= si misurano) le sue molteplici e variegate trasformazioni, all'insegna dei principi per cui:

(i) l'energia può essere trasferita o trasformata, ma non può essere né creata né distrutta;

(ii) il trasferimento o la trasformazione dell'energia porta all'aumento del disordine dell'universo (è quindi inevitabile la tendenza verso il disordine, e quindi verso la minima energia, dell'universo nel suo complesso).

Trasferimenti e trasformazioni di energia sono anche quelli sopra descritti relativamente alla ricarica e allo sfruttamento del sistema ATP/ADP.

Quel che però continuiamo a non sapere (per lo meno per quanto mi riguarda, e su questo sono in buona compagnia) è che cosa sia davvero questa energia, e se quando misuriamo le sue varie trasformazioni stiamo parlando dello stesso fenomeno o di fenomeni diversi. Per dirla col fisico e premio nobel Richard Feynman "*la fisica moderna misura l'energia, sa che si conserva, ma non ha nessuna idea di che cosa sia*".

L'importante è rendersi conto che alla capacità umana di misurare la natura, e di manipolarla, può non corrispondere un'equivalente capacità di comprenderne l'essenza.

Lorenzo Scarpelli

Articolo pubblicato, con piccole variazioni, in Pegaso, n. 216, maggio-agosto 2023