



CENTRO INTERNAZIONALE DI STUDI ROSMINIANI  
SIMPOSI ROSMINIANI

Quindicesimo Corso dei "Simposi Rosminiani":

*Uomini, animali o macchine?*

*Scienze, filosofia e teologia per un "nuovo umanesimo"*

Stresa, Colle Rosmini, 27-30 agosto 2014



## *Chi inventò la ruota?*

### *Le curiose scoperte delle biologia molecolare*

CARLO CIROTTO

[La presente bozza di relazione deve ancora essere rivista e corretta dall'Autore per gli Atti. NdR].

È bene che presenti sin dall'inizio le mie competenze in modo che sappiate già in partenza quale sarà il taglio che darò alla mia relazione. Sono un biologo che durante la sua carriera ha studiato prevalentemente alcuni aspetti molecolari del differenziamento embrionale.

Tratterò quindi il tema del simposio dalla prospettiva del biologo.

#### *La sorprendente scoperta di Brown*

In un giorno di giugno dell'anno 1827 Robert Brown, botanico scozzese, iniziò a lavorare ad un progetto di ricerca piuttosto ambizioso per quel tempo. Voleva rispondere alle domande che, peraltro, ogni botanico di allora si poneva: «Cosa sono le particelle di polline? Dove vanno? Che ruolo svolgono? Come fanno a diffondere il messaggio della vita da una pianta all'altra?».

Brown e i botanici suoi contemporanei sapevano che i granellini di polline sono essenziali nella riproduzione delle piante ma ciò che ad essi sfuggiva è come facessero a portare la scintilla capace di creare nuova vita.

In quel giorno di giugno prese subito di petto il problema mettendo sotto la lente del microscopio



una goccia d'acqua in cui erano sospesi granuli di polline di una pianta nord americana, divenuta poi famosa proprio per quell'esperimento, la *Clarkia pulchella*. Ciò che vide lo lasciò sconcertato e insieme infastidito. Si aspettava di vedere una sospensione calma e immobile di particelle e, invece «ne ho osservate una moltitudine» lasciò scritto «in moto evidentissimo». Si rese immediatamente conto che, in quelle condizioni, lo studio dei granuli di polline non sarebbe stato così semplice come sperava. Non stavano mai fermi! Si muovevano in ogni direzione, anzi non si limitavano a muoversi: danzavano. Saltavano su e giù, zigzagavano avanti e indietro, vorticavano come in balia di un invisibile ciclone microscopico. Non avevano, insomma, alcuna intenzione di starsene fermi e di lasciarsi osservare con la dovuta calma dal povero botanico!

Quando sopraggiunse l'autunno Brown si rese conto di aver mancato gli scopi della sua ricerca. Quei mesi di osservazioni non gli avevano insegnato nulla di nuovo sulla riproduzione delle piante e si trovò a concludere, deluso, che ciò che aveva visto al microscopio non aveva niente a che fare con la vita.

Aveva ragione. Ma, come vedremo, aveva anche torto.

Quei granuli mobili di polline, osservati con tanta meticolosità, stavano per rivoluzionare ciò che a quei tempi si sapeva della materia e oggi continuano a rivoluzionare ciò che sappiamo della vita.

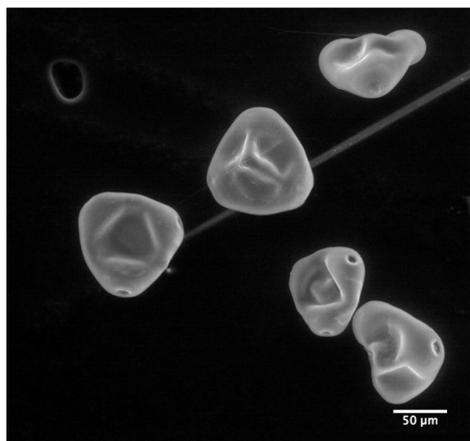


Robert Brown

## *Il Mondo di mezzo*

Avrete di sicuro notato che le librerie e le biblioteche abbondano di libri sul mondo degli atomi, sugli strani fenomeni che coinvolgono elettroni e nuclei, quark, superstringhe, incertezza quantistica e tante altre stranezze del mondo subatomico. Avrete anche notato che sono altrettanto numerosi i testi sull'universo: galassie, big bang, buchi neri e altre diavolerie cosmologiche.

C'è, insomma, abbondanza di notizie sul mondo dell'infinitamente piccolo e sul mondo dell'infinitamente grande mentre è un fatto che gli oggetti di dimensioni intermedie, gli abitanti del "mondo di mezzo", per dirla con Mark Haw, hanno richiamato ben poca attenzione in passato e continuano a riceverne relativamente poca ancora oggi. Peccato! Perché ciò che succede agli oggetti di questa grandezza, a questa scala della realtà, riguarda da vicino tutti noi: determina ciò che siamo e il modo in cui funzionano i nostri corpi. Si tratta di quegli oggetti le cui dimensioni sono comprese tra, circa, 1 millesimo di millimetro e 10 millesimi di millimetro. Cioè tra un centesimo e un decimo dello spessore di un capello umano.



I pollini di Brown

Le stesse dimensioni dei pollini di Brown.

Nell'universo molti oggetti importanti appartengono al mondo di mezzo: le cellule, i virus, le gocce di grasso sospese in acqua che formano il latte, le ingegnose molecole dotate di testa e coda che formano il sapone ma anche quelle molecole che vengono di solito definite 'giganti' e sono alla base della vita come il DNA e le proteine.

Il mondo che si trova nel mezzo, insomma, è tanto importante ed interessante quanto i mondi che si trovano alle estremità. Molti scienziati oggi lavorano per capire cosa vi succede. Non parlano di "mondo di mezzo". Preferiscono chiamare "mesoscopici" i fenomeni che osservano. Il prefisso "meso" si-

gnifica intermedio: a metà strada, appunto, tra le dimensioni microscopiche dei quark e degli atomi e il mondo macroscopico di sabbia, ciottoli, esseri umani, case, pianeti e galassie.

Anch'io, oggi, mi interesserò di questi oggetti. Gli oggetti di un universo che, con Mark Haw, mi piace continuare a chiamare "mondo di mezzo". Oggetti caratterizzati tutti da dimensioni simili a quelle dei pollini di Brown e tutti, rigorosamente accomunati da quella stessa caratteristica che sconcertò tanto Brown: l'agitazione incessante ed inevitabile.

### *Le radici della vita sono nel mondo di mezzo*

Gli organi del nostro corpo - lo sappiamo bene tutti - sono organizzati in tessuti. A loro volta i tessuti sono fatti da cellule, compartimenti pieni d'acqua e di tanti altri materiali, delimitati da pareti membranose. Questa separazione è vitale per formare ambienti controllati localmente, dove possano svolgersi in modo ordinato i processi necessari al buon funzionamento globale dell'essere vivente. La cellula è una sorta di città-Stato, che la parete di membrana protegge dal turbinio del mondo esterno. Come le mura delle antiche città medioevali, la membrana tiene fuori le entità indesiderate e fa entrare quelle importanti.

Chi sono i cittadini della città-cellula? In primis c'è l'acqua, in cui sono disciolti ioni e sali, calcio, magnesio, zinco, potassio e altre piccole sostanze che svolgono un ruolo chiave nel controllo dell'attività cellulare. Ma ci sono anche molte molecole più grandi e complesse, composte in genere da migliaia di atomi. Non per nulla dette "giganti", esse includono, ad esempio, le proteine, il DNA e il suo cugino l'RNA, gli zuccheri complessi, e così via. Le dimensioni di questi giganti vanno da qualche milionesimo di millimetro a un millesimo di millimetro. In altre parole la cellula è piena di oggetti sospesi in acqua che hanno le dimensioni tipiche del mondo di mezzo. All'interno della cellula, quindi, il moto browniano è dovunque e l'agitazione irrefrenabile che ne deriva ha conseguenze enormi e ineluttabili sui meccanismi basilari della vita.

Desidero proporre alla vostra attenzione una classe particolare di molecole giganti, le proteine. Esse svolgono la maggior parte delle operazioni indispensabili alla vita: sono motori che trasportano sostanze chimiche, enzimi che rendono possibili le reazioni biochimiche, strutture sopramolecolari che copiano il DNA, pompe che controllano il traffico in entrata e in uscita dalla cellula, e così via. A leggere le descrizioni che ne fanno i libri di testo e a guardare le immagini disegnate si ha la tentazione di chiamarle "macchine", macchine in miniatura. Ma, come vedremo tra breve, si tratta di macchine del tutto speciali. Non sono tranquille molecole "platoniche" ma, per dirla con il biochimico Gregorio Weber, «bestie chimiche che scalzano e urlano». Ed è proprio in questa agitazione del mondo di mezzo, che risiede la differenza sottile, ma fondamentale, tra le macchine della vita (che chiamerò anche biomacchine) e le macchine macroscopiche a noi più familiari.



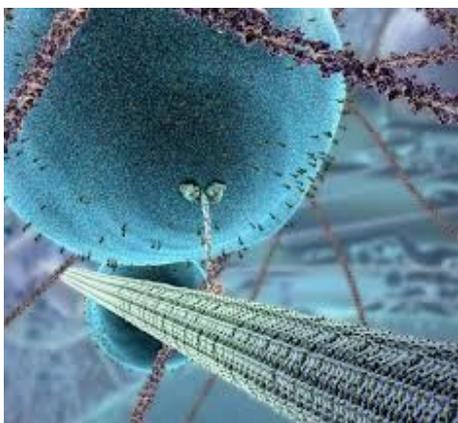
la proteina umana

### *Due passi avanti e uno indietro*

Fino a poco più di una decina di anni fa, il movimento delle biomacchine era conosciuto per via indiretta, studiando soprattutto il loro comportamento chimico. Le descrizioni che ne derivavano erano sia approssimate perché molti aspetti non potevano proprio essere indagati sia, soprattutto, "macchinistiche", conseguenza diretta della natura statistica dell'impostazione dell'indagine.

È stata però introdotta, in tempi relativamente recenti, una nuova metodica, molto sofisticata, che permette lo studio diretto del comportamento delle singole molecole giganti del mondo di mezzo. Si tratta della tecnica delle «pinzette ottiche». Rende possibile osservare direttamente ogni singola macromolecola e anche modificarla in modo mirato così da evidenziare il cambiamento delle proprietà che ne consegue. Tale possibilità di osservare direttamente ogni singola macromolecola ha portato ad una scoperta assai interessante: ogni molecola del mondo di mezzo si comporta in modo più o meno diverso dalle altre. È un individuo a sé stante.

Mi spiego. Uno dei principi cardine della chimica è che le molecole costruite in base alla stessa ricetta sono identiche. Questo è senz'altro vero per quelle piccole: una molecola di anidride carbonica, ad esempio, è indistinguibile da ogni altra e tutte hanno lo stesso identico comportamento. Ma l'uso delle pinzette ottiche ha dimostrato che nel mondo di mezzo le cose vanno in maniera assai diversa: le macro molecole, anche se sono costituite dagli stessi tipi di atomi, non si possono considerare identiche. In un qualsiasi istante, a causa del bombardamento continuo delle molecole circostanti, è probabile che la precisa struttura spaziale di una data molecola gigante sia differente da quella delle sue vicine. Una ripiegatura in più qui, un avvolgimento in più là, si traducono in variazioni anche rilevanti del comportamento di ogni molecola.



Chinesina che procede su un tubulo

Una delle prime proteine studiate in dettaglio con le pinzette ottiche è stata la molecola detta chinesina, che è un po' il "camion" della cellula e che ci servirà a dar corpo a quanto finora detto.

La cellula non è una specie di sacca impermeabile riempita a casaccio di un'accozzaglia di molecole giganti (proteine, DNA, enzimi e altre diavolerie del mondo di mezzo). È molto più di questo: la cellula è organizzata.

Pensate alla cucina di un ristorante affollato: se il personale si mettesse a pulire verdure, cuocere bistecche, sfornare il pane, tagliare fette di torta, condire l'insalata, tenere la contabilità e lavare i piatti nello stesso posto il risultato sarebbe un disastro.

Ci sarebbero verdure nel dolce, schizzi di risciacquatura dei piatti nel condimento dell'insalata e foglie di lattuga tra i moduli della dichiarazione dei redditi. Se invece la cucina è organizzata, con piastre di cottura da una parte, lavandini da un'altra, aree di preparazione da un'altra ancora, e l'amministratore al piano di sopra in ufficio con i libri contabili, è più probabile che il ristorante funzioni con efficienza.

Analogamente nella cellula tutto si svolge al posto appropriato i nutrienti sono assorbiti e i rifiuti estromessi attraverso canali appositi nella membrana; le nuove proteine sono prodotte in speciali strutture dette ribosomi; il DNA è letto e copiato nel nucleo cellulare.

Per avere attività così ben organizzate, alla cellula serve un sistema di trasporto. I nutrienti, una volta attraversata la membrana, vanno portati nei posti giusti; per produrre nuove proteine nei ribosomi serve materiale grezzo da prelevare altrove; e quelle proteine nuove di zecca devono poi essere trasportate nel loro nuovo posto di lavoro. E siccome la cellula e i suoi abitanti si trovano nel mondo di mezzo, è lì che l'infrastruttura di trasporto deve funzionare, con tutta l'interferenza casuale che ormai siamo abituati ad aspettarci.

Ora, una rete di trasporto ha due parti essenziali: veicoli e binari. Consideriamo prima i veicoli. Tra i principali trasportatori di carichi nella cellula c'è la "chinesina", che come tutte le proteine ha qualità strutturali specifiche per il compito che deve svolgere. Una estremità si lega con particolare facilità a molte altre molecole: è qui che si aggancia il carico. All'altra estremità ci sono due parti, che potremmo

chiamare “piedi” che fanno da motore del veicolo.

L'altro componente del sistema di trasporto, l'insieme dei binari, è un fascio di tubuli, o meglio microtubuli, composti da un'altra proteina, “la tubulina”. Questi microtubuli formano un insieme di percorsi lungo i quali le chinesine si spostano portando il loro carico dove serve.

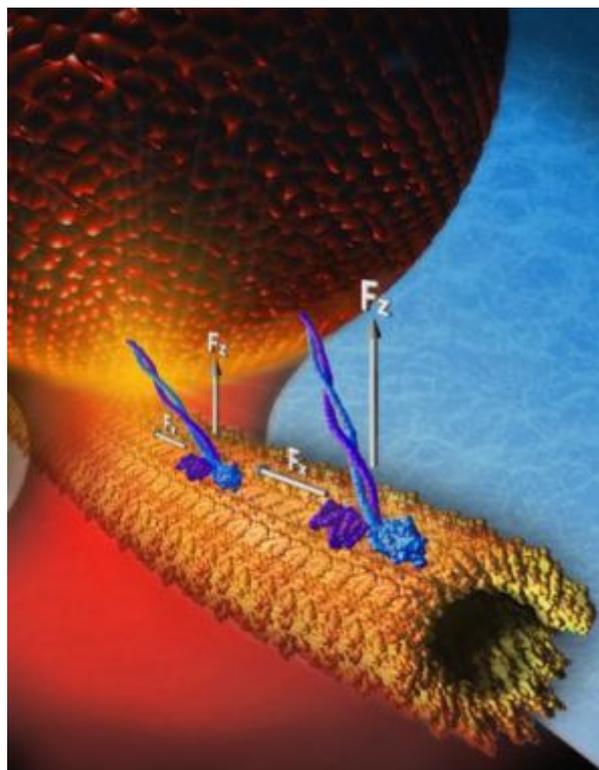
La sequenza di immagini che vi sto proiettando è di stampo essenzialmente meccanicistico perché ricavata in gran parte da esperimenti di tipo chimico, antecedenti all'invenzione delle pinzette ottiche. Filmato<sup>1</sup> che ho sperimentato essere efficace come primo approccio didattico all'argomento ma che a noi oggi sarà utile per l'approfondimento critico che ci avviamo a fare.

In queste immagini la chinesina appare come un mezzo di locomozione bipede, come un uomo che si muova lungo un percorso trasportando un carico sulle spalle. E, proprio come un uomo, la chinesina ha bisogno di energia da trasformare in lavoro utile. L'energia è quella contenuta nelle “molecole-carburante” dell'ATP, che si aggirano per la cellula come minuscoli distributori ambulanti di benzina. Una chinesina agganciata al binario di tubulina afferra una molecola di ATP che passa lì accanto e vi si lega. La formazione del legame provoca un cambiamento della forma, quindi del modo in cui la molecola è agganciata al binario e di fatto fornisce l'energia che le permette di sollevare un piede per poi spostarlo in avanti. Con questi spostamenti il piede esaurisce l'energia e si riaggancia alla tubulina un passo più in là lungo l'impalcatura. Poi il ciclo si ripete, questa volta con l'altro piede. È così che, a passi strascicati, alimentato dall'ATP, il camion chinesina procede gradualmente verso la propria destinazione.

La tecnica delle pinzette ottiche ha reso possibile esperimenti di tipo nuovo in cui è possibile osservare singole molecole proteiche come la chinesina mentre si muovono e addirittura rallentarne il cammino caricandole con sferette di vetro di vario peso. Questi esperimenti hanno dimostrato che c'è una seria lacuna nella descrizione meccanicistica proposta dal filmato (e dai libri di testo).

Prima di tutto, essendo una proteina di dimensioni ragguardevoli, la chinesina è un abitante del mondo di mezzo e, come tale, è preda di una inevitabile, continua agitazione dovuta agli urti delle molecole vicine, che la descrizione “chimica” ignora totalmente. Avviene allora che il piede della chinesina, appena si solleva, sia sbalottato dalle collisioni con le molecole d'acqua circostanti e non può che reagire ondeggiando qua e là in un moto browniano. Il moto browniano, lo ricordo, è un tipico esempio di moto “casuale”. Ciò significa che il piede, una volta sollevato, dovrebbe avere le stesse probabilità di fare un passo in avanti oppure all'indietro. Il camion sembra condannato a vagare a caso avanti e indietro lungo il binario, anziché dirigersi nella direzione voluta.

Questa, a ben vedere, è la differenza che c'è tra le macchine della nostra industria e le biomacchine: le parti mobili dei motori delle auto sono oggetti grandi, macroscopici, e non devono fare i conti con lo sbalottamento casuale; possono essere fatti in modo da muoversi in una direzione sola. Al contrario, le



Chinesina e tubulina

1. Il filmato intitolato: The inner life of a cell e reperibile in internet su YouTube; la versione presentata è quella curata dall'[Università di Harvard](http://www.harvard.edu).

parti mobili delle biomacchine sono schiave di fluttuazioni continue, sono infettate dalla casualità. Questo dovrebbe rendere impossibili le biomacchine e quindi la vita. Eppure la vita c'è e le sue macchine funzionano! Perché?

L'indicazione che viene da molti esperimenti fatti con le pinzette ottiche è chiara: la vita non ha superato la difficoltà dell'agitazione perenne fermandola (cosa tra l'altro impossibile) ma ha trovato il modo di sfruttarla a proprio vantaggio. Come? Nello "sbilanciare il gioco", cioè nel trasformare la pura "casualità" del moto browniano, che non ha direzioni preferenziali, in una "probabilità" che pende a proprio favore. Tale trasformazione è operata dall'interazione preferenziale della chinesina con la tubulina.

Mi spiego. Quando il piede è alzato, è soggetto soltanto al moto browniano casuale. Ha cioè le stesse probabilità di dirigersi in avanti, all'indietro o verso tutte le direzioni intermedie. Ma, tra le tante possibili, c'è una direzione di moto che fa incontrare il piede con la tubulina del microtubulo e fa sì che si stabilisca un legame abbastanza stabile tra di loro a motivo della reciproca affinità chimica. Con ulteriori considerazioni, in tutto simili a queste, si spiega anche il "senso unico" del moto della chinesina.

Il gioco rimane comunque statistico. Ad ogni passo, infatti, i piedi mobili della proteina sono sempre soggetti ai capricci della casualità; possono persino non incontrare affatto la tubulina a cui legarsi. Lo dimostrano gli esperimenti con le pinzette ottiche di Karel Svoboda: la chinesina a volte fa passi indietro, a volte addirittura si stacca dal microtubulo andando "fuori strada". Ma se si media su un periodo di tempo abbastanza lungo o su un numero sufficiente di cicli, diventa evidente che il suo funzionamento nel complesso ha un verso ben preciso.

Ciò che ho detto per l'interazione della chinesina con la tubulina è vero anche per l'interazione di ogni biomacchina con le altre biomacchine cellulari. Istante per istante la casualità del moto browniano le obbliga ad esperire tutti tentativi di interazione possibili, ad esplorare cioè in continuazione lo spazio circostante. Nel suo complesso, il sistema deriva da questo comportamento una straordinaria plasticità e un'unità altrettanto profonda. Questo continuo "tastare il terreno" fa sì che ogni componente del sistema sia in grado di adeguare la sua struttura e di conseguenza il suo comportamento allo stato globale del sistema.

Che differenza abissale con le macchine del nostro macro-mondo fatte di pezzi rigidi, che svolgono la loro funzione indipendentemente da tutto il resto!

No. La nostra realtà biologica di uomini, al pari di quella degli altri organismi viventi, non somiglia né per struttura né per funzionamento ad una macchina, se per "macchina" intendiamo il frutto della nostra macro-industria meccanica.

Credo così di aver risposto alla seconda delle due domande contenute nel titolo del simposio odierno. L'uomo, sotto il profilo bio-molecolare, non è una macchina.

### *E l'uomo, è un animale?*

Per certi aspetti lo è di certo, ma per altri decisamente no. Essendo il genere *Homo* il frutto di un processo evolutivo che lo ha visto emergere, in tempi relativamente recenti, da un ceppo di primati – australopitecine vissute ed estinte in Africa alcuni milioni di anni fa – c'è da attendersi che parecchi dei caratteri biologici e psicologici tipici del regno animale siano presenti anche nell'uomo. Non tutto il patrimonio delle facoltà umane, però, lo ritroviamo negli animali. Ad esempio, la capacità di utilizzare strumenti per fabbricarne altri è tipica esclusivamente della nostra specie ed è il segno tangibile che nell'uomo c'è un qualcosa che gli animali non hanno. A questo qualcosa siamo soliti dare il nome di "mente", capace di astrazione, autoconsapevole e fonte di un comportamento intenzionale e libero.

Il primo rappresentante del genere *Homo*, l'*Homo habilis*, ha lasciato le tracce della sua capacità di

manipolazione intenzionale in utensili litici ottenuti da ciottoli di fiume, cercati, scelti, trasportati e infine scheggiati con colpi secchi di altre pietre. Strumenti ottenuti adoperando intelligentemente altri strumenti. A ben guardare, si tratta dello stesso principio che sottostà alla costruzione di qualsiasi macchina meccanica del nostro mondo di mezzo, anche le più sofisticate e moderne. Non è un caso che la produzione di utensili di pietra sia chiamata "industria" litica.

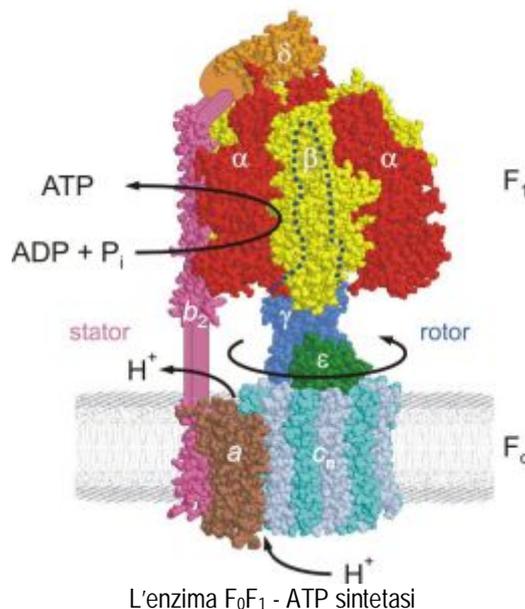
E siamo di nuovo alle macchine. Questa volta però non alle biomacchine microscopiche del mondo di mezzo, ma a quelle del mondo macroscopico, frutto diretto dell'intelligenza umana. E poiché non c'è bisogno, credo, di approfondimenti particolari per capire le peculiarità delle macchine del nostro mondo – tanta è la dimestichezza che tutti abbiamo con esse – possiamo passare senz'altro a fare un'operazione di confronto tra ciò che abbiamo appreso sulle biomacchine del micromondo e ciò che sappiamo sulle macchine del nostro macromondo.

A differenza del percorso seguito nella prima parte della mia relazione, quando abbiamo focalizzato l'attenzione sulla diversità che esiste tra il funzionamento delle biomacchine del mondo di mezzo e quello delle macchine del nostro mondo macroscopico, l'invito è ora a focalizzare l'attenzione sui processi di formazione di questi due tipi di macchine.

In questa nuova operazione saremo facilitati se confronteremo un elemento fondamentale delle nostre macchine meccaniche, che è la ruota con la corrispettiva struttura ruotante (una "bioruota") presente in una biomacchina che è di importanza capitale per la vita delle cellule e nostra.

### *Una bioruota fantastica*

Non solo l'interno della cellula pullula di macromolecole di importanza vitale, anche la membrana ne è ricchissima. Alcune di esse, ad esempio, fungono da pompe per risucchiare sostanze nutrienti dall'esterno, altre sono, invece, dispositivi di eliminazione dei rifiuti tramite i quali la cellula si sbarazza di detriti o di veleni. Una di queste biomacchine è particolarmente importante ed interessante. Si tratta di un enzima multifunzione, il cui nome è « $F_0F_1$  - ATP sintetasi». Agisce in due modi: quando l'ATP (ricordate le molecole - riserva energetica della cellula, le pompe microscopiche di benzina che forniscono energia a ogni processo?) abbonda funziona da pompa per far passare i nutrienti attraverso la membrana; quando non c'è abbastanza ATP nella cellula, funziona al contrario, sintetizzandone altro. Questa biomacchina è quindi di cruciale importanza nel metabolismo della cellula, in quanto regola il flusso e l'utilizzo di energia da parte della cellula<sup>2</sup>.



Nel 1997 un gruppo di ricerca giapponese, quello di Masasuke Yoshida, ha osservato per primo, con la tecnica delle pinzette ottiche, una biomacchina  $F_0F_1$  - ATP sintetasi in funzione, constatando che si tratta di una specie di motore rotante. L'ATP alimenta la rotazione di una parte della proteina all'interno di un "cilindro" formato dal resto della molecola, e ciò permette il pompaggio di ioni attraverso la

2. Il relatore ha presentato un filmato di una particolare macro-cellula il mitocondrio in cui è presente l'enzima APT. Il filmato è intitolato: Powering the cell: Mitochondria, anch'esso presente in internet su YouTube, anch'esso a cura dell'[Università di Harvard](http://www.harvard.edu).

membrana cellulare.

Il gruppo giapponese ha incollato su una lastra di vetro le estremità di alcune molecole di questo motore e alle estremità opposte ha attaccato filamenti di una proteina, l'actina, fluorescenti e abbastanza grandi da essere visibili al microscopio. Quando si forniva ATP i minuscoli filamenti cominciavano a ruotare come una giostra, compiendo fino a 4 giri al secondo. Coerentemente con il comportamento di tutte le biomacchine, spesso i ricercatori hanno visto i rotori esitare nella rotazione: si fermavano, aspettavano, ripartivano e a volte addirittura invertivano la rotazione. Si trattava di un vero biomotore irrequieto!

La complessità delle molecole biologiche e della loro organizzazione nella cellula è tale che ogni ipotesi che intenda spiegare la comparsa della vita sulla terra si scontra con difficoltà non piccole legate alla necessità di giustificare l'elevatissimo livello di ordine e la conseguente, bassissima probabilità della sua comparsa. Su di un fatto, comunque, non si possono nutrire dubbi: in qualunque modo il processo sia avvenuto – sulla terra o in qualche altro luogo dello spazio –, molecole organiche semplici devono aver interagito per cui dal successivo assemblaggio è sorta la vita cellulare. La riproduzione, poi, ha fissato e moltiplicato gli eventi, seppur rarissimi, risultati vantaggiosi per la sopravvivenza della cellula.

Gli organismi mono o pluri-cellulari che hanno invaso la terra e tutta la loro complessità interna, allora, possono ben essere la conseguenza di eventi di per sé decisamente improbabili. A ragione Dawkins intitolò una sua opera del 2003: «Alla conquista del monte improbabile»!

### *L'uomo, fonte di sistemi più alti*

Gli uomini, fin dalla loro comparsa, hanno proseguito la scalata di questo monte avvalendosi però di un nuovo equipaggiamento: una modalità conoscitiva intelligente e razionale che li rende, secondo una efficace definizione di Lonergan, «una fonte di sistemi più alti». È questo l'aspetto dell'uomo che meglio soddisfa la nostra trattazione: l'essere sistema e, al contempo, generatore prolifico di nuovi sistemi.

E torniamo alla ruota. Prima di conoscere i risultati della ricerca del gruppo giapponese, tutti eravamo fermamente convinti che la ruota fosse un'invenzione esclusiva della mente umana. Ora sappiamo che non è così. Abbiamo visto all'opera una splendida ruota del mondo di mezzo. Non è stato l'uomo il primo ad aver inventato la ruota! Miliardi di anni prima di lui, uno stratosferico numero di tentativi operati dagli abitanti del mondo di mezzo ha avuto come risultato la costruzione del mulino molecolare ad ATP.

Miliardi di anni dopo si affacciò alla mente umana l'idea di fabbricare un oggetto simile, da inserire nel suo macromondo, modellando grossi materiali inanimati allo scopo di spostare più facilmente carichi pesanti fino ad allora trascinati con grande fatica. Nel mondo delle realtà macroscopiche nasceva così un oggetto, del tutto nuovo per quel mondo – ma, come s'è appena visto, non nuovo in assoluto – dovuto esclusivamente alla capacità umana di inventare nuovi sistemi. Sistemi *artificiali* talmente improbabili che per ciechi meccanismi naturali non sarebbero mai giunti all'esistenza.

Dopo aver inventato la ruota, poi, l'uomo si fece anche carico di moltiplicarne e diffonderne gli esemplari, instaurando al riguardo una vera tradizione culturale. Invenzioni successive la resero più agile, più maneggevole, tanto da poter essere inserita in sistemi complessi ... come le pompe, che ripropongono, nel mondo macro, le stesse funzioni che le biopompe non hanno mai smesso di esercitare in quello di mezzo.

La scalata al monte improbabile della ruota, dopo essere iniziata in maniera inconsapevole, e probabilmente assai travagliata, nel mondo di mezzo delle cellule, è proseguita inarrestabile come frutto della mente umana.

Come è stato per la ruota, così tanti altri sistemi sono stati introdotti dall'uomo nel suo mondo macroscopico. Alcuni, come la ruota stessa, erano stati già costruiti dalla natura e diffusi nel mondo di mezzo, altri sono assolutamente inediti. Grazie poi alle nuove acquisizioni della chemio- e della bioinformatica e alle tecniche d'avanguardia dell'ingegneria genetica, la capacità umana di produrre nuovi sistemi sta interessando sempre più estesamente anche il mondo submicroscopico, invaso anch'esso da oggetti nuovi che il gioco spontaneo della mutazione-selezione non ha avuto il tempo, o l'occasione, di fissare. Grazie al proprio intelletto, l'uomo è oggi in grado di orientare al proprio benessere e alla propria crescita tanto le realtà inanimate che quelle biologiche, tanto quelle macroscopiche che quelle microscopiche e submicroscopiche, promuovendo un'infinità di modifiche, manipolazioni e riorganizzazioni.

Nessun animale sarebbe minimamente capace di fare tutto ciò.