

L'ALBA DELLA VITA: I "MANGIATORI" DI LUCE

Renato Fani

Università degli Studi di Firenze (<renato.fani@unifi.it>)

Abstract

In the beginning our planet was a lifeless and inhospitable place; nevertheless, a few hundred millions of years later the Earth was full of microscopic living beings. These primordial microorganisms that appeared in the "primordial soup" were similar to present-day bacteria and were the only living beings on Earth for at least two billion years. Some of them became able to utilize the light and energy from the primitive Sun to synthesize the compounds required for their survival. Later on, some microorganisms (cyanobacteria) developed oxygenic photosynthesis; in this way the molecular oxygen accumulated in the atmosphere creating the ozone layer. This allowed the first organisms to colonize the dry lands and the further appearance of more complex living forms.

Keywords: last universal common ancestor, origin of life, photosynthesis, primordial soup

Introduzione

Tutti gli organismi viventi presenti oggi sul nostro Pianeta appartengono ad uno dei tre grandi domini, così come Carl Woese li ha definiti più di venti anni fa: i Batteri, gli Archei e gli Eucarioti (Woese, Kandler, Wheelis 1990, 4576-4579). I batteri e gli archei, nel loro insieme, costituiscono i procarioti e sono costituiti da una unica entità, un'unica cellula; gli eucarioti possono invece essere unicellulari o pluricellulari.

La Terra odierna pullula di disparate forme di Vita, molto diverse tra di loro e che interagiscono in un equilibrio dinamico. Per quanto diversi tra loro, *tutti gli esseri viventi condividono alcune caratteristiche*. Una di queste è la molecola "magica", il DNA (acronimo per Acido Desossiribonucleico) in cui è immagazzinata l'informazione genetica di ogni organismo vivente. Una parte di questa informazione genetica codifica particolari molecole, gli enzimi, la cui funzione è cruciale per la sopravvi-

venza delle cellule. Le cellule odierne, anche le più semplici sono in realtà entità estremamente complesse costituite da una miriade di molecole che devono *agire ed interagire* in modo concertato in modo da assicurare la sopravvivenza e la riproduzione delle singole cellule e degli organismi multicellulari. In ogni momento della vita della cellula miliardi e miliardi di molecole sono trasformate in molecole differenti attraverso reazioni chimiche che sono accelerate (catalizzate) dagli enzimi, molti dei quali rappresentati da proteine.

Sebbene questi enzimi, muovendosi all'interno delle cellule incontrino, durante il loro caotico viaggio, una pleora di molecole diverse, in realtà possono legarsi in modo specifico solamente ad alcune di esse. Una volta incontrate queste molecole (che rappresentano il substrato), l'enzima può trasformarle in altre (differenti) molecole, che rappresentano il prodotto della reazione. Gli enzimi sono perciò assolutamente indispensabili alla vita delle cellule poiché accelerano enormemente la velocità con cui le reazioni chimiche avvengono; in caso contrario, le reazioni avverrebbero molto più lentamente con una velocità non compatibile con la Vita.

Possiamo quindi immaginarci la cellula come una entità "viscosa" all'interno della quale in ogni momento della sua vita miliardi di molecole di substrato vengono trasformate in miliardi di prodotti grazie a miliardi di enzimi.

L'insieme di queste reazioni che avvengono in modo apparentemente casuale e disordinato viene detto *metabolismo*, che possiamo schematizzare come una entità circolare nel senso che alcune molecole possono essere distrutte (catabolismo) per ottenere l'energia ed i "mattoni" che sono richiesti per costruire altre differenti molecole (anabolismo). È perciò evidente come all'interno della cellula esista un equilibrio dinamico tra le reazioni cataboliche che producono energia e le reazioni anaboliche che utilizzano l'energia per la costruzione di molecole complesse. Il metabolismo delle cellule e degli organismi attuali è perciò estremamente complesso ed è il risultato di miliardi di anni di evoluzione molecolare e cellulare. Se partiamo dal presupposto che gli organismi e le cellule odierne si siano originati da entità primordiali molto più semplici la cui comparsa all'alba della Vita sia databile più o meno quattro miliardi di anni fa, possiamo ragionevolmente immaginare che anche il loro metabolismo fosse molto meno complicato. Se questo è vero dobbiamo chiederci *perché* e in che modo le cellule primordiali possano essersi evolute nel tempo dando origine ad organismi sempre più complessi. Quali siano state cioè le forze in gioco e quali siano stati i meccanismi con cui queste forze hanno permesso l'evoluzione dei sistemi viventi primitivi.

Non meno importante è capire quale sia stato il ruolo dell'energia e della luce in questo incredibile ed affascinante puzzle.

1. *L'alba della Vita: il percorso storico*

Per poter rispondere alle domande poste nel paragrafo precedente, dobbiamo cercare di capire quali fossero le condizioni della terra primitiva; in altre parole dobbiamo addentrarci nel tempo profondo e capire l'origine della Vita sulla Terra.

L'esigenza di dare una spiegazione ai fenomeni della natura e all'origine della vita è una costante nell'esperienza conoscitiva dell'uomo. Non appena il pensiero dell'uomo è stato in grado di estendersi ad argomentazioni astratte è spontaneamente emersa la domanda sulle origini dell'uomo e della realtà che lo circonda. Come sono nati la terra, gli astri, l'universo? Come ha preso forma l'uomo? Quando si è originata la vita? Qual è il principio di tutte le cose?

I filosofi Greci che vissero prima di Socrate tentarono di spiegare l'origine delle cose formulando ipotesi a partire dalle proprie conoscenze scientifiche: per Talete il principio primo dell'universo, l'*archè*, doveva essere cercato nell'Acqua, in quanto elemento presente in tutte le sostanze. Per Pitagora, invece, il principio è nel Numero, poiché sono proprio le leggi numeriche a determinare non solo l'anno, le stagioni, i mesi, ma anche i cicli dello sviluppo biologico e i diversi fenomeni della vita. Eraclito fa corrispondere l'*archè* al Fuoco, inteso come fonte di perenne trasformazione delle cose, energia che nel suo mutamento dà origine al caldo, dirigendosi verso l'alto, e al freddo, dirigendosi verso il basso, mentre Democrito arriva a spiegare l'origine del cosmo attraverso la teoria dell'atomismo. L'essenza dell'universo è l'atomo e la vita nasce dall'incontro casuale degli atomi che si aggregano secondo vortici che pongono al centro quelli più pesanti e in periferia quelli più leggeri.

Più tardi, nel IV secolo a.C., per spiegare l'origine del mondo, Platone introdurrà il concetto di Iperurano, un luogo metafisico dove si collocano, eterne, tutte le idee e le forme ideali delle cose: la realtà quindi non è altro che una copia imperfetta.

Successivamente, Aristotele, raccogliendo le idee formulate dai filosofi che lo precedettero, tra cui Empedocle, propose che la vita potesse generarsi spontaneamente per l'esistenza di un "principio attivo" insito nella materia non vivente ("principio passivo"). Il fango, per esempio, è materia inerte ma contiene un "principio attivo" immateriale che ha la predisposizione a organizzare la materia in qualcosa di vivo, come un verme, una mosca, una rana. La *generazione spontanea* (*generatio aequivoca*), così viene chiamata questa ipotesi sull'origine della vita, degli insetti, dei molluschi, dei piccoli vertebrati e perfino, in alcuni casi, dell'uomo, fu accettata come un fatto indiscusso per secoli, fino al Seicento. Fu sostenuta anche da autorevoli pensatori, come Newton, Cartesio e Bacone, con alcune semplificazioni tra cui la credenza che le oche nascessero da alcuni abeti a contatto con le acque dell'oceano: il cosiddetto "albero delle oche". Fu solamente verso la

fine del Seicento, grazie all'opera di Francesco Redi, che il problema della generazione spontanea fu affrontato con metodo sperimentale, metodo introdotto nella fisica da Galileo Galilei, contemporaneo di Redi. Redi decise di eseguire una serie di esperimenti per verificare la credenza che la terra potesse "produrre (oltre le piante, che spontaneamente senza seme si presuppone nascono) certi altri piccoli animaletti ancora: cioè a dire le mosche, le vespe, le cicale, i ragni, le formiche, gli scorpioni e gli altri bacherazzoli terrestri, ed aerei, che da' Greci έντομα ξῶα, e da' latini *insecta animalia* furono chiamati" (Redi 1668, 9).

Fu così che Redi impostò l'esperimento che fa parte integrante della storia delle Scienze, un esperimento che consisteva nel far marcire delle carni sia in vasi la cui apertura era coperta da un velo (affinché l'aria vi potesse entrare liberamente) saldamente legato, sia in vasi lasciati completamente aperti. Il risultato fu che le mosche nascevano in gran numero nei vasi lasciati scoperti, nei quali le mosche stesse potevano deporre sulla carne le uova da cui poi si sviluppavano gli insetti completi. Al contrario, Redi non osservò mai lo sviluppo di mosche dalle carni contenute nei vasi che erano stati accuratamente coperti.

L'esperimento di Redi, nella sua apparente semplicità, dimostrò per la prima volta nella storia dell'Umanità che un organismo vivente deriva da un organismo vivente pre-esistente e, pertanto, la sua opera *Esperienze intorno alla generazione degli insetti* può essere considerata a buon diritto una sorta di *sidereus nuncius* delle scienze biologiche.

Successivamente, il problema della generazione spontanea si spostò di volta in volta a livelli di organizzazione sempre più semplici grazie all'invenzione del microscopio. Fu così che nel Settecento Lazzaro Spallanzani esclude che i Protozoi ciliati, che pullulano nelle acque stagnanti, potessero generarsi spontaneamente dagli infusi di fieno. Sottoponendo le infusioni di fieno ed i recipienti che le contengono alla temperatura dell'acqua bollente, egli dimostrò che rimangono sterili. Quindi, anche i ciliati nascono da germi preesistenti, distrutti dal calore.

Un secolo più tardi Louis Pasteur, con esperimenti analoghi a quelli di Spallanzani, cioè "sterilizzando" il brodo e i recipienti con il calore, dimostrò che anche i batteri (all'epoca gli organismi più semplici conosciuti) si originavano da altri batteri.

Tutta questa serie di evidenze sperimentali poneva il problema dell'origine della vita in modo sempre più pressante. Se, infatti, ogni organismo vivente, dal più grande al più piccolo, deriva da un organismo simile pre-esistente, *dove, come e quando* ha origine questa lunga catena che lega tra loro gli organismi viventi? Il periodo (la seconda metà dell'Ottocento) in cui visse Pasteur era particolarmente fecondo dal punto di vista intellettuale e scientifico. Non va dimenticato che in quegli anni Mendel (1866) dava vita alla Genetica e Darwin pubblicava nel 1859 *On the Origin of Species by Means of Natural Selection* che tanto impatto avrà

sulla società scientifica e non. Ed è proprio Darwin il primo ad avanzare l'ipotesi che tutte le specie si siano originate da un unico progenitore comune. Secondo Darwin la vita era iniziata quando alcune sostanze attivate dal calore, dalla luce o da scariche elettriche cominciarono a reagire generando composti organici di complessità crescente. Darwin aveva anche suggerito che attualmente non sarebbe stato più possibile osservare questo fenomeno, perché un qualsiasi organismo primitivo sarebbe stato rapidamente distrutto o sopraffatto da quelli più evoluti. Successivamente Haeckel (1866), un sostenitore delle idee di Darwin, ipotizzò che i primi esseri viventi fossero microrganismi autotrofi, capaci di fissare la CO_2 , abbondante nell'atmosfera primitiva. Da questi microrganismi si sarebbero evoluti i primi eterotrofi, per perdita della capacità fotosintetica.

2. Il "brodo primordiale"

Ma fu soltanto durante i primi anni del Novecento che venne elaborata la teoria sull'Origine della Vita che ha il maggior credito nell'ambito scientifico, una teoria che proponeva che la Vita si fosse originata spontaneamente sulla terra in un lontano passato, quella del "brodo primordiale".

Se partiamo da questo presupposto, dobbiamo assumere che la comparsa dei primi esseri viventi sulla terra sia il risultato di una evoluzione cosmica e chimica.

L'ipotesi comunemente accettata sull'origine del sistema solare è quella "nebulare". In base a questa ipotesi il sistema solare si è formato circa 5 miliardi di anni fa da una nube di polveri, gas e ghiacci. La maggior parte della materia, soprattutto idrogeno ed elio, ma anche ferro, silicio ed altri elementi abbondanti nelle rocce, ed elementi caratteristici dei composti organici, come ossigeno, carbonio e azoto, si concentrò nel proto-sole che si trovava al centro di un disco roteante, all'interno del quale si formarono anche dei vortici che divennero centri di concentrazione minori, da cui in seguito si originarono i proto-pianeti. Al momento della formazione della terra primordiale, il vento solare, molto intenso nelle prime fasi di vita del proto-sole, e il calore prodotto dalle reazioni di fusione nucleare all'interno del proto-sole, allontanarono dalla Terra la sua atmosfera primitiva, costituita da idrogeno ed elio. La Terra quindi, nei suoi primi momenti di "vita", doveva apparire come la nostra Luna o come Mercurio, senza atmosfera e piena di crateri provocati dall'impatto con le comete ed i meteoriti. Successivamente, in seguito a numerose forze esogene ed endogene, si formò l'atmosfera primitiva che permise la comparsa delle prime forme di Vita.

Secondo alcuni ricercatori l'atmosfera primitiva sarebbe stata riducente, composta da una miscela di $\text{CH}_4 + \text{N}_2$ oppure $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ oppure $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2$. Studi più recenti indicherebbero invece che l'atmosfera

della Terra primitiva era neutra, composta da una miscela di $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Per quanto non esistano evidenze geologiche che confermino l'uno o l'altro scenario, tutte le ipotesi concordano con l'idea che l'ossigeno molecolare non fosse presente nell'atmosfera primitiva. La mancanza di ossigeno molecolare nell'atmosfera impedisce la formazione dello strato di ozono; conseguentemente i raggi ultravioletti provenienti dal Sole primitivo, non essendo filtrati da uno strato di ozono, si abbattevano sulla superficie terrestre con una energia molto elevata provocando la sterilizzazione della superficie stessa ed impedendo di fatto la comparsa di esseri viventi in quella sede. È plausibile perciò che i primi esseri viventi siano comparsi in ambienti acquosi dove i raggi ultravioletti perdevano parte della loro energia grazie all'impatto con le molecole di acqua.

Ma quando si è originata la Vita? I dati disponibili suggeriscono che le prime forme viventi fossero già presenti 3,86 miliardi di anni fa e, secondo alcune ipotesi, esistevano probabilmente già 4,2 miliardi di anni fa e per circa 3 miliardi di anni la vita si è diversificata in forme che erano tutte procariotiche: batteri e archei.

L'ipotesi del "brodo primordiale" fu proposta verso la metà degli anni Venti del XX secolo da Aleksandr Ivanovič Oparin (1894-1980), chimico e biologo russo, e rappresenta un esempio paradigmatico di quanto potente sia l'immaginazione umana. Secondo Oparin la Terra di circa 4 miliardi di anni fa era molto diversa da quella attuale (Oparin 1938). Era un pianeta ad alto contenuto energetico (energia endogena ed esogena), con un'atmosfera primitiva caratterizzata dall'assenza di ossigeno e fortemente riducente (favorevole alla combinazione di molecole diverse) e non ossidante, come lo è oggi, allorché la presenza di grandi quantità di ossigeno libero rende instabili le molecole organiche obbligando i viventi ad un loro continuo rinnovamento. Secondo Oparin, l'atmosfera primordiale era ricca di metano, ammoniaca, acqua, composti che reagivano facilmente tra loro sotto l'azione del calore terrestre, dei fulmini, degli ultravioletti della radiazione solare non ancora schermata dalla fascia di ozono. Dalle reazioni si formavano composti del carbonio come formaldeide, urea, amminoacidi che venivano trasportati dalle piogge nei mari andando a costituire il così detto "brodo caldo primigenio". In questa soluzione calda alcune molecole avevano una tendenza superiore alle altre ad associarsi in complessi più grandi. Dal brodo primordiale si sarebbero originate, in milioni di anni, le prime forme di vita, gli *eubionti*, batteri eterotrofi anaerobi.

Una conferma sperimentale della teoria di Oparin è stata ottenuta nel 1953 da Stanley L. Miller. Miller ricreò con un'apparecchiatura sperimentale le condizioni dell'atmosfera e del brodo primordiale. In un pallone di vetro aggiunse metano, ammoniaca, vapore acqueo e idrogeno (*l'atmosfera primitiva*) e lo sottopose a scariche elettriche, che dovevano svolgere la funzione dei fulmini e delle radiazioni. In un secondo pallone di vetro aggiunse acqua (*l'oceano primordiale*) e lo riscaldò generando vapore acqueo, che

circolava nell'apparecchiatura. I prodotti idrosolubili delle reazioni atmosferiche si sarebbero così sciolti nell'oceano. E infatti in pochi giorni l'acqua si riempì di una sostanza rossastra che era ricca di aminoacidi. Con questo esperimento Miller dimostrò che era possibile ottenere composti organici per sintesi abiotica, spiegando anche come questi si erano formati. Questi composti si sarebbero potuti accumulare in corpi idrici, pozze di acqua in evaporazione, ad esempio le pozze di marea, come aveva ipotizzato anche Darwin, producendo il brodo primordiale.

Possiamo quindi immaginare come il brodo primordiale possa essersi trasformato con la comparsa delle prime forme di Vita, in una sorta di *mondo di esseri viventi galleggianti* molto diversi dalle cellule attuali e che possiamo immaginare come bolle di sapone con un metabolismo limitato e contenenti molecole assorbite direttamente dal brodo primordiale in cui stavano galleggiando. Queste cellule fluttuanti erano capaci di "dividersi", "fondersi" ed interagire tra loro in una sorta di "promiscuità" cellulare che permetteva loro anche di condividere le loro abilità metaboliche, scambiandosi vicendevolmente il proprio materiale genetico (trasferimento genetico orizzontale).

Ma se questo scenario è corretto, per quale motivo le cellule primitive, che potevano ottenere tutte le sostanze nutritive necessarie al loro sostentamento direttamente dall'ambiente esterno, sono cambiate? Quale forza ha spinto ad un cambiamento così drammatico ma al tempo stesso così importante per l'evoluzione dei sistemi viventi? La risposta a questo quesito è piuttosto intuitiva; è infatti facilmente immaginabile come l'aumento della quantità di cellule primitive abbia provocato una diminuzione progressiva dei composti organici presenti nel brodo primordiale ed essenziali alla sopravvivenza delle cellule stesse. Questi composti organici sarebbero risultati in una concentrazione progressivamente sempre minore, da limitare la crescita dei viventi. La diminuzione delle sostanze nutritive avrebbe quindi imposto una pressione selettiva sempre maggiore che avrebbe favorito la sopravvivenza *solamente* di quelle cellule che erano divenute capaci di sintetizzare (biosintetizzare) da sole le molecole, originariamente presenti in grande quantità nel brodo primordiale, che via via venivano a mancare.

La comparsa delle vie biosintetiche di base ha rappresentato perciò uno dei più importanti eventi dell'evoluzione precoce della vita, poiché ha permesso alle prime cellule di divenire sempre meno dipendenti dalle sorgenti esogene dei composti vitali che si erano accumulati nell'ambiente primordiale per sintesi prebiotica.

3. *La Luce e l'Evoluzione dei primi organismi viventi*

Tuttavia, come abbiamo visto all'inizio, affinché le reazioni di sintesi possano avvenire è necessario l'apporto di energia; conseguentemente, anche le cellule primitive avevano la necessità di attingere ad una o più sor-

genti di energia per poter costruire le sostanze necessarie alla loro sopravvivenza e che stavano progressivamente diminuendo nell'ambiente esterno.

Se "qualcosa" non fosse successo, non si sarebbe verificato il cambiamento che ha permesso l'evoluzione dei sistemi viventi. Come per magia, in qualche momento e in qualche luogo della Terra primitiva, compare una molecola, una molecola complessa, la batterio-clorofilla, capace di interagire con la luce. La luce non gode più della libertà primigenia; i fotoni vengono catturati dalle molecole di batterio-clorofilla e la loro energia utilizzata per costruire le molecole necessarie alla sopravvivenza e alla moltiplicazione dei primi esseri viventi. Questi batteri, originariamente eterotrofi, diventano *autotrofi*, "mangiatori di luce" capaci di costruire molecole attraverso una fotosintesi clorofilliana che, tuttavia, non è la fotosintesi che produce ossigeno, è una fotosintesi diversa, che utilizza substrati diversi.

La possibilità di utilizzare questa fonte di energia di fatto quasi inesauribile e sempre disponibile, permette alle cellule primordiali di svincolarsi sempre di più dall'ambiente esterno per l'ottenimento delle sostanze nutritive. L'evoluzione si fa più rapida ed i microrganismi evolvono ed acquisiscono sempre maggiore autonomia e capacità sintetizzanti, fino ad arrivare a quello stadio che viene definito l'ultimo progenitore (antenato) comune.

4. La comparsa di LUCA, l'ultimo progenitore comune

L'idea che tutti gli organismi viventi presenti attualmente sulla Terra siano i discendenti di un singolo antenato comune si è delineata presto nel pensiero biologico, parallelamente al concetto di *evoluzione biologica*. La teoria di Darwin e Wallace sottintende, infatti, che tutte le forme di vita possano essersi evolute a partire da un singolo progenitore, un'entità che attualmente è definita LUCA (acronimo per Last Universal Common Ancestor), l'ultimo progenitore comune universale. Per molto tempo niente poteva essere ipotizzato sulla sua natura e sulle sue caratteristiche; si riteneva solamente che esso fosse un'entità semplice, spesso paragonata ad un procariote. Ma negli ultimi venti anni è stato possibile iniziare a capire quale potesse essere la sua "intelaiatura" genetica e metabolica. Secondo la visione corrente, LUCA non era una entità totipotente; in altre parole non può essere considerato una cellula (o un insieme di cellule) molto complessa capace di svolgere tutte le funzioni richieste per la sopravvivenza e la moltiplicazione nell'ambiente primordiale. Secondo Carl Woese, infatti, l'esistenza di un progenitore totipotente non è plausibile in quanto non è possibile spiegare come esso possa aver raggiunto una tale complessità in breve tempo (poco meno di un miliardo di anni). Il progenitore totipotente presenta inoltre alcune caratteristiche che non sono presenti in alcun organismo attualmente vivente e che dovrebbero essere state ereditate verticalmente.

Woese propone un modello diverso di evoluzione primordiale. La dinamica evolutiva primordiale è paragonata al processo di rinaturazione fisica del DNA. Il processo di rinaturazione inizia a una temperatura sufficientemente elevata da permettere alle due eliche delle molecole di DNA di separarsi; la temperatura inizia quindi a scendere e si raggiunge uno stato quasi-stabile in cui varie combinazioni degli elementi si formano, si dissociano e si formano in combinazioni diverse. Solo le strutture più stabili permangono, cioè *crystallizzano*. Quando la temperatura scende ancora, anche strutture meno stabili cristallizzano, mentre quelle preesistenti divengono più complesse. Secondo questo modello (detto modello dell'*annealing genetico*) Woese definisce il concetto di *temperatura evolutiva* (Woese 1998, 6854-6859) come una misura del livello di mutazione e di trasferimento genetico orizzontale. Nei primi stadi dell'evoluzione della vita la temperatura genetica era elevata e il trasferimento genetico orizzontale, e non l'eredità verticale, era la modalità di evoluzione delle entità primordiali. Anche il tasso di mutazione era elevato. Solo in una seconda fase dell'evoluzione la temperatura genetica è diminuita e gli organismi hanno iniziato ad evolvere mediante i meccanismi dell'eredità verticale (*duplicazione e mutazione*).

Secondo Woese il processo cellulare che guida l'evoluzione degli organismi primordiali è la *traduzione*, la sintesi delle proteine. Il macchinario traduzionale delle cellule primordiali era molto più semplice di quello attuale e quindi molto meno accurato. Errori di riconoscimento dei codoni e di scivolamento nella fase di lettura erano frequenti e di conseguenza potevano evolvere solamente proteine piccole. Le entità primordiali nelle quali il macchinario traduzionale non si era ancora evoluto ad un livello tale da permettere la sintesi di proteine di tipo moderno sono definite *progenoti*. L'incapacità di sintetizzare proteine moderne limitava severamente sia la natura sia le possibilità evolutive dei progenoti: essi non potevano aver sviluppato un genoma moderno né meccanismi di riparazione. Il genoma dei progenoti era organizzato in numerosi piccoli mini-cromosomi ciascuno presente in copie multiple (*ridondanza genetica*). Ciascun cromosoma era organizzato in maniera *operonica*: raccoglieva cioè tutti i geni implicati in uno stesso processo. L'organizzazione operonica dei cromosomi era selettivamente avvantaggiata sia da una segregazione cromosomica puramente casuale durante la replicazione che dagli eventi di trasferimento genico orizzontale; non c'è, infatti, alcun vantaggio ad ereditare una parte soltanto di una nuova via metabolica. I cromosomi erano semi-autonomi, nel senso che assomigliavano più ad elementi genetici mobili che non ai moderni cromosomi. La divisione cellulare avveniva nel modo più elementare possibile per semplice strozzamento della cellula in due metà. La dimensione ridotta dei cromosomi era indispensabile a causa dell'elevato tasso di mutazione in quanto aumentava la probabilità che essi potessero essere replicati senza un ec-

cessivo numero di mutazioni. Il genoma era lineare in quanto rendeva i processi di replicazione e la trascrizione topologicamente più semplici e non era quindi richiesta la presenza di enzimi come le DNA-topoisomerasi. La molteplicità di copie di ciascun cromosoma garantiva che se una copia di un gene era inattivata per mutazione la funzione era ugualmente assicurata dalle altre copie.

La limitatezza del genoma imponeva che i progenoti fossero molto semplici dal punto di vista metabolico. Tuttavia differenti progenoti potevano possedere differenti abilità metaboliche. La *totipotenza* non era quindi una caratteristica dei singoli progenoti, ma della intera *comunità genetica dei progenoti*. Il fatto poi che ogni innovazione potesse essere facilmente dispersa nella popolazione per trasferimento orizzontale ampliava enormemente le possibilità evolutive di questa comunità. Questa comunità di progenoti può essere vista come un moderno *consorzio* microbico, in cui le cellule interagiscono non solo geneticamente ma anche metabolicamente. In questo senso, non è la singola cellula, ma la comunità dei progenoti nel suo insieme che sopravvive ed evolve.

È questa *comunità di progenoti*, e non uno specifico organismo, secondo Woese, *l'ultimo progenitore comune* (Woese 1998, 6854-6859).

Nel momento in cui la temperatura evolutiva ha iniziato a diminuire lentamente, i progenoti hanno iniziato ad evolversi e, grazie all'affinarsi del processo traduzionale, sono comparse strutture con complessità sempre maggiore e sempre più integrate tra loro. Più un sub-sistema diveniva complesso, tanto più difficilmente elementi estranei risultavano compatibili con esso. Questo sub-sistema non poteva quindi essere più scambiato per trasferimento orizzontale e cristallizzava, iniziando ad evolversi esclusivamente per eredità verticale. Secondo questo modello, i vari sub-sistemi cellulari si sono cristallizzati a differenti stadi evolutivi. La traduzione è stato tra i primi, se non il primo, sub-sistema cellulare a cristallizzare; si tratta, infatti, di un macchinario complesso i cui componenti chiave tendono ad essere universali. Il fatto che non tutti i componenti dell'apparato traduzionale siano *universali* indica che questo meccanismo ha continuato a perfezionarsi dopo lo stadio dell'ultimo progenitore comune, dopo che il suo *core* si era cristallizzato.

5. I Cianobatteri e la fotosintesi ossigenica

Per quanto l'ultimo progenitore comune e le comunità microbiche che ne derivarono fossero capaci di eseguire la fotosintesi, tuttavia la mancanza dell'ossigeno molecolare nell'atmosfera e, di conseguenza, la mancanza di uno strato di ozono impedisce alle forme viventi di "uscire" dagli ambienti acquosi. La superficie terrestre è quindi ancora assolutamente sterile e continuerà ad esserlo per un lungo periodo di tempo, più o meno due miliardi di anni, mentre stagni, fiumi, oceani e laghi pullulano di forme di vita microscopiche in continua evoluzione.

Ma noi, come la grande maggioranza degli organismi viventi attuali, non saremmo qui a raccontare questa "storia" se non si fosse verificato un *salto evolutivo* di straordinaria qualità ed importanza. Questo salto avviene più o meno due miliardi-due miliardi e mezzo di anni fa, quando in alcune delle forme microscopiche presenti nell'ambiente acquoso si verifica una modificazione grazie alla quale queste cellule, i *cianobatteri* ancestrali, utilizzano l'acqua come donatrice di elettroni. In questa nuova configurazione, la fotosintesi clorofilliana produce ossigeno molecolare. Questa nuova molecola, la cui concentrazione aumenta progressivamente nell'atmosfera cambia radicalmente le condizioni del Pianeta e, paradossalmente, rappresenta il primo, vero "inquinante" nella storia della Terra. Tutti gli organismi che a quell'epoca vivevano sulla Terra o meglio, negli ambienti acquosi, erano infatti *anaerobi*, organismi cioè abituati a vivere in assenza di ossigeno molecolare per i quali questa molecola rappresentava un "veleno". Conseguentemente, la sua comparsa e l'aumento della sua concentrazione nell'atmosfera devono aver provocato enormi sconvolgimenti nelle comunità microbiche dell'epoca. Certamente molti di questi organismi non sopravvissero alla presenza dell'ossigeno molecolare, altri si rifugiarono in zone, nicchie ecologiche in cui l'ossigeno molecolare non poteva penetrare, altri ancora si adattarono alla sua presenza ed iniziarono ad utilizzarlo, mediante il processo di respirazione cellulare per ricavare energia.

Ma l'aumento della concentrazione dell'ossigeno molecolare nell'atmosfera ebbe anche un altro straordinario impatto; la comparsa dell'ossigeno molecolare permette la formazione dell'ozono, una molecola che ha la capacità di assorbire una buona parte dell'energia delle radiazioni ultraviolette che arrivano dal Sole. Con il passare del tempo iniziò a formarsi nell'atmosfera uno strato di ozono, una sorta di strato protettivo che permise ai batteri ancestrali di uscire dall'ambiente acquoso e di avventurarsi sulle terre emerse. Fu così che in un periodo di tempo relativamente breve anche la superficie terrestre fu colonizzata dai microrganismi.

Nelle fasi successive dell'evoluzione dei viventi, grazie a processi di endosimbiosi, questi microrganismi dettero origine ai progenitori delle cellule eucariotiche dalle quali si svilupparono gli animali e, successivamente, le piante. La comparsa di questi nuovi "mangiatori di luce" provocò un ulteriore aumento della concentrazione di ossigeno nell'atmosfera e cambiò radicalmente l'aspetto del nostro pianeta con tutte le forme di vita così come noi le conosciamo. La luce, quindi, ha avuto ed ha ancora un ruolo cruciale per i Viventi ed il suo utilizzo da parte dei microrganismi prima e degli organismi superiori dopo ha permesso di modificare gli esseri viventi e con essi anche il nostro pianeta, la Terra, il cui nome secondo Arthur C. Clarke è inappropriato per la grande quantità di acqua presente in esso ("How inappropriate to call this planet Earth when it is quite clearly Ocean", in Henderson-Sellers 1983, 191).

Riferimenti bibliografici

- Darwin Charles (1859), *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*, London, John Murray.
- Haeckel Ernst (1866), *Generelle Morphologie der Organismen*, Berlin, Verlag von Georg Reimer.
- Henderson-Sellers Ann (1983), "The Chemical Composition and Climatology of the Earth's Early Atmosphere", in Cyril Ponnampereuma (ed.), *Cosmochemistry and the Origin of Life*, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute held at Maratea (Italy, June 1-12, 1981), 175-212.
- Mendel Gregor (1866), "Versuche über Pflanzen-Hybriden", *Verhandlungen des Naturforschenden Vereines in Brünn*, 4, 3-47.
- Oparin Alexander Ivanovič (1938), *The Origin of Life*, New York, McMillan Publishing.
- Redi Francesco (1668), *Esperienze intorno alla generazione degli insetti fatte da Francesco Redi Accademico della Crusca e da lui scritte in una lettera all' Illustrissimo Signor Carlo Dati*, in Firenze, all' insegna della Stella, <https://it.wikisource.org/wiki/Esperienze_intorno_alla_generazione_degl%27insetti> (11/2016).
- Woese Carl (1998), "The Universal Ancestor", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 95, 12, 6854-6859.
- Woese Carl, Kandler Otto, Wheelis M.L. (1990), "Towards a Natural System of Organisms: Proposal for the Domains Archaea, Bacteria, and Eucarya", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 87, 12, 4576-4579.

