

Il mistero della vita: concatenazioni e sorprese

Relazione tenuta dal Prof. Paolo Tortora il 18 febbraio 2020 al Convegno della Facoltà Teologica dell’Italia Settentrionale

1. I termini del problema

L’idea che gli esseri viventi siano dotati di caratteristiche peculiari, tali da distinguerli dal resto del mondo fisico viene da sempre e in tutte le culture riconosciuta come un dato di evidenza. Ciò nondimeno, è solo verso la fine del XIX secolo che si arriva a porre in termini realmente scientifici il problema dell’origine del vivente come entità dotata di proprietà peculiari e distinte da quelle del non vivente, dopo una “marcia di avvicinamento” durata secoli; si arriva cioè ad escludere la teoria della *generazione spontanea*, vale a dire la possibilità che gli organismi viventi possano originarsi nell’arco di ore o di giorni da materia non vivente come il fango o carcasse in putrefazione.

La credenza nella generazione spontanea fu dapprima confutata dal medico Francesco Redi nella seconda metà del XVII secolo. In seguito, il naturalista e sacerdote Lazzaro Spallanzani, nella seconda metà del XVIII secolo, realizzò le prime esperienze che ne escludevano la possibilità anche per forme di vita microbiche. Ma solo nella seconda metà dell’800 la teoria fu definitivamente confutata grazie ai famosi esperimenti di Louis Pasteur, che dimostrò l’impossibilità di formazione spontanea di microrganismi in terreni di coltura posti nei matracci a collo d’oca di sua invenzione. Questi consentivano scambio d’aria tra interno ed esterno ma bloccavano l’entrata di agenti contaminanti, come spore e batteri. In queste condizioni, nei terreni previamente sterilizzati i microrganismi non si sviluppavano mai.

Alla fine di questo lungo percorso, il problema dell’origine della vita si poneva finalmente a partire da presupposti correttamente scientifici che possono essere così formulati: *“Nessun organismo vivente, neppure il più elementare, si può generare in tempi brevi e nelle condizioni chimico-fisiche attuali del nostro pianeta”*.

A partire da questo principio, negli ultimi cento anni l’investigazione scientifica ha affrontato il problema collocandolo all’interno dei due poli entro i quali il processo si è sviluppato: 1) quali sono i tempi e quale l’ambiente fisico in cui compare la vita (il punto di partenza); 2) qual è la natura del fenomeno vita (il punto di arrivo).

È quindi evidente che il problema dell’origine della vita chiama in causa l’interrogativo circa la natura stessa della vita, che è ben lungi dall’essere pienamente chiarito, come documenteremo ben presto. Questo è uno degli ostacoli sostanziali che rendono problematica la possibilità di arrivare con facilità a chiarirne pienamente le modalità della comparsa. Ma esiste anche un ostacolo metodologico, consistente nel fatto che si tratta di investigare un fenomeno accaduto nel passato. In questa prospettiva non basta la conoscenza degli scenari chimico-fisici della Terra primordiale nei quali la vita si è sviluppata, come abbiamo accennato; ma l’aspetto più problematico è che il processo, che viene definito con il termine *abiogenesi*, vale a dire la formazione del primo, elementare organismo vivente da una raccolta di composti organici ma non viventi, non ha lasciato alcuna traccia diretta di sé. In altre parole conosciamo (nei limiti che abbiamo indicato) il punto di arrivo, il primo elementare organismo unicellulare; conosciamo anche con buona approssimazione il punto di partenza (gli ingredienti chimici da cui si è originata la vita), ma ci manca quasi per intero la conoscenza delle fasi intermedie del processo. In linea con queste osservazioni, e come non è difficile immaginare, nessuno è riuscito fino ad oggi ad assemblare in laboratorio anche il più semplice degli organismi a partire da ingredienti chimici.

2. Cosa sappiamo in merito alla natura degli esseri viventi e ai meccanismi che ne governano le funzioni

Date queste premesse, ci introdurremo nel problema tentando di definire gli aspetti essenziali che caratterizzano tutti gli organismi, anche i più semplici. È opportuno precisare, innanzitutto, che la straordinaria complessità della vita è resa possibile a livello molecolare dalla chimica dei composti del carbonio (così è definita la chimica organica), l'unico elemento che possa garantire l'esistenza di molecole della necessaria complessità e di dimensioni praticamente illimitate. Naturalmente altri elementi si combinano con il carbonio (primi fra tutti idrogeno, ossigeno, azoto) e altri ancora sono indispensabili per le funzioni biologiche ma ciò nulla toglie al ruolo primario del carbonio.

Tuttavia la complessità degli organismi non è puramente riconducibile al fatto che essi consistono di molti componenti molecolari, a loro volta complessi e di grandi dimensioni. L'aspetto più caratteristico è piuttosto che ogni parte del macchinario chimico di cui essi consistono è coordinato con gli altri in vista della *cooperazione verso un obiettivo*, che nei termini più basilari può essere ricondotto a due elementi fondamentali:

- 1) il mantenimento di un ambiente interno, quello dell'organismo, chimicamente e fisicamente distinto da quello esterno, una condizione che viene attuata a spese di fonti di energia estratte dall'ambiente;
- 2) la capacità di riprodursi, cioè di formare copie dell'organismo identiche o molto simili a quelle del progenitore.

La cooperazione verso un obiettivo implica che ogni componente del sistema sia progettato per interagire con gli altri in una rete sofisticata e complessa di azioni reciproche. Pertanto, l'intento di arrivare a cogliere in uno specifico elemento materiale l'aspetto essenziale di un sistema vivente è metodologicamente inappropriato e comunque non ha mai sortito alcun risultato.

Ciò non di meno, il primo preliminare approccio per una adeguata comprensione del fenomeno dell'abiogenesi richiede evidentemente di definire le proprietà fondamentali dei sistemi viventi, per quanto ad oggi ci è possibile. Sarà dunque di questo che ci occuperemo innanzitutto. Dunque, anche i più semplici organismi unicellulari presentano quattro essenziali componenti:

- a - Un deposito di informazione che contenga il *progetto* per la costruzione dell'organismo e che possa essere replicato in maniera quasi invariante: di norma il *l'acido desossiribonucleico (DNA)*, chimicamente una varietà di *acido nucleico*.
- b - I componenti del macchinario per il funzionamento dell'organismo (un ampio repertorio di *proteine*).
- c - Una rete di reazioni chimiche che opera per l'ottenimento di energia e per la fabbricazione delle molecole necessarie per le differenti funzioni (*metabolismo*).
- d- Un sistema di *confinamento* dell'organismo per delimitarlo dall'ambiente. Esso è garantito dalla *membrana cellulare*, costituita da molecole di natura prevalentemente lipidica, che grazie alle loro proprietà si associano spontaneamente tra loro generando la membrana medesima, un involucro continuo che racchiude la cellula intera. Il sistema di confinamento garantisce un diversa composizione dell'ambiente intracellulare rispetto a quello esterno: questa differenziazione documenta il fatto che ciascun organismo possiede una *individualità*.

Nel caso delle proteine i blocchi di costruzione sono gli *amminoacidi* (Fig. 1). Essi presentano la stessa struttura base, di cui ciascuno rappresenta una "variazione sul tema". Le proteine contengono un repertorio di 20 diversi amminoacidi, che si assemblano uno di seguito all'altro a dare polimeri lineari. Generalmente, le proteine hanno una lunghezza compresa tra poche decine e parecchie centinaia di amminoacidi, e dopo la loro sintesi si ripiegano formando strutture di norma globulari, cioè rivotate a gomito. La sequenza in amminoacidi definisce l'*individualità*, la struttura tridimensionale e

quindi la funzione di una proteina. L'insieme delle proteine costituisce il vero macchinario cellulare, in quanto esse si fanno carico di tutte o quasi le funzioni biologiche.

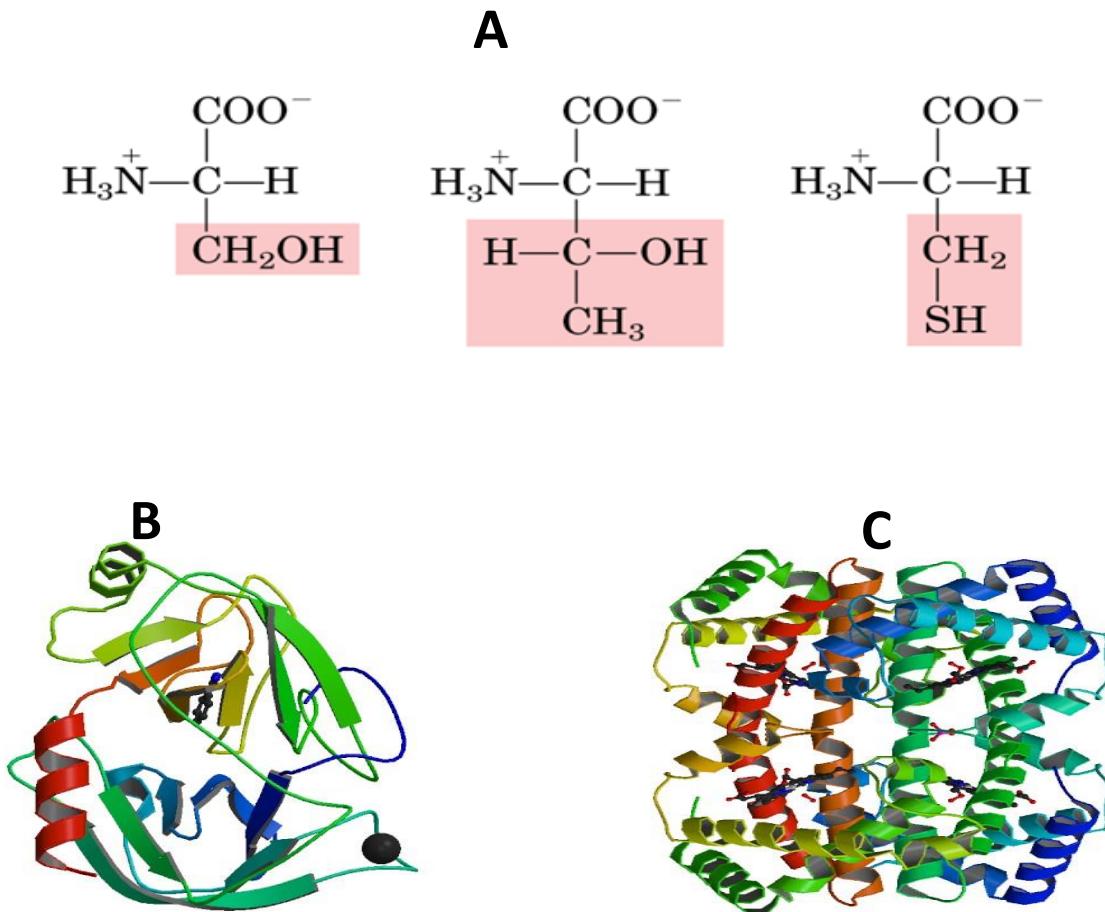


Figura 1. (A) Alcuni dei 20 aminoacidi che compongono le proteine. Tutti presentano la stessa struttura base, e si differenziano per quella parte di molecola denominata catena laterale (mostrata su sfondo più scuro). Le proteine sono polimeri lineari derivanti dall'assemblaggio di aminoacidi. Una volta sintetizzate, esse si riavvolgono generando strutture globulari alle quali sono associate le funzioni biologiche. A titolo esemplificativo vengono mostrate le strutture tridimensionali di due proteine: la tripsina (B), capace di degradare le proteine nell'intestino, e l'emoglobina (C), ben noto trasportatore di ossigeno dai polmoni ai tessuti.

Gli acidi nucleici sono anch'essi polimeri filiformi. Il loro ruolo principale è l'immagazzinamento dell'informazione per la produzione delle proteine, una funzione che, come già accennato, è sostenuta specificamente dal DNA. I blocchi di costruzione del DNA sono i *nucleotidi*, formati da una molecola di fosfato legato a un particolare zucchero, il desossiribosio, a sua volta associato a una base azotata, come mostrato in Fig. 2. Nel DNA esistono quattro diversi tipi di nucleotide, che si differenziano per contenere ciascuno una diversa base azotata: adenina (abbreviata con A), timina (T), guanina (G) e citosina (C). Al contrario, la sequenza di molecole di zucchero e fosfato associati insieme forma la parte invariante del DNA, a livello della quale si realizza la connessione tra i nucleotidi adiacenti. È quindi

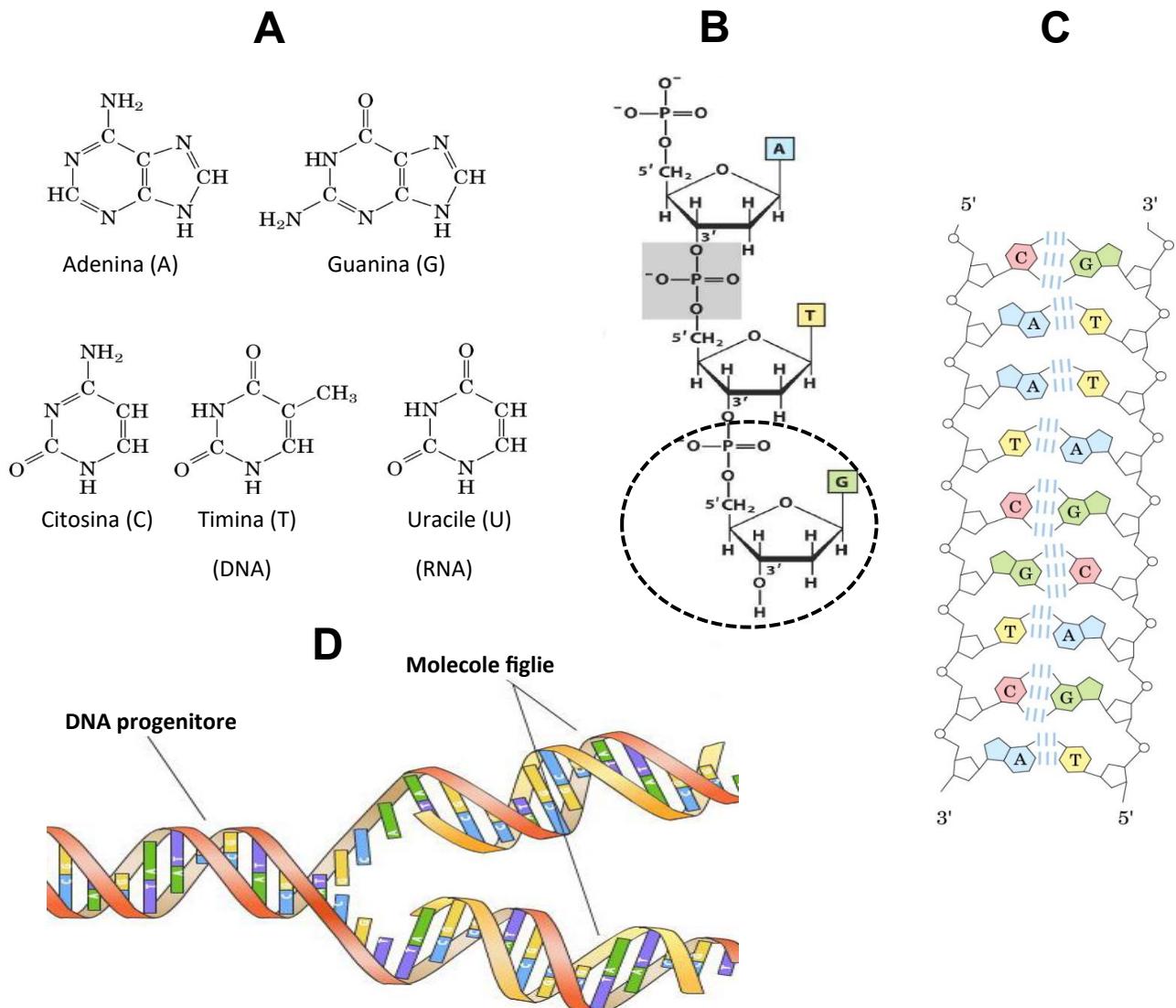


Figura 2. Le caratteristiche fondamentali degli acidi nucleici. (A) Le basi azotate che compaiono nell'acido deossiribonucleico (DNA) sono adenina (A), guanina (G), citosina (C) e timina (T); nell'acido ribonucleico (RNA) adenina, guanina, citosina e uracile (U). (B) Le basi sono associate a una struttura portante lineare, che deriva dall'assemblaggio di unità di zucchero (il ribosio nell'RNA e il desossiribosio, mostrato in figura, nel DNA) e di fosfato (in figura su sfondo grigio). La struttura derivante dall'associazione di una base con uno zucchero e un fosfato è detto *nucleotide* (in figura incluso nel cerchio tratteggiato). Il contenuto *informativo* di un acido nucleico consiste evidentemente nella sequenza in basi (nella figura: ATG). (C) Mentre l'RNA si presenta di norma come singolo filamento, il DNA consiste di due filamenti che si riavvolgono l'uno sull'altro (la ben nota "doppia elica"). Inoltre, i due filamenti sono *complementari* quanto a sequenza in basi, poiché queste si appaiano in modo tale che ogni base presente su un filamento formi un legame con una base prospiciente situata sul filamento opposto, come mostrato in figura. Le regole dell'appaiamento sono molto semplici: A si appaia con T; G si appaia on C. Da queste semplici regole costruttive deriva la complementarietà dei due filamenti; ciò significa in sostanza che dalla sequenza in basi di uno è immediatamente ricavabile quella dell'altro. (D) La complementarietà dell'appaiamento è alla base dei meccanismi di duplicazione del DNA. Infatti, come mostrato in figura, all'atto della duplicazione ogni filamento funge da stampo per la sintesi di un nuovo filamento e ciò porta alla sintesi di due molecole identiche tra loro e al DNA progenitore.

evidente che la parte variabile del DNA è data dalla sequenza in basi, che infatti specifica l'informazione in esso contenuta: si tratta in sostanza di un alfabeto a quattro lettere. Il DNA ha inoltre la ben nota struttura elicoidale, costituita da due filamenti che si riavvolgono uno sull'altro. L'aspetto più rilevante

di tale appaiamento è che i due filamenti hanno sequenze *complementari*; ciò significa che le basi si associano in modo tale per cui una A di un filamento si appaia mediante legami chimici deboli con una T sull'altro filamento; una G su un filamento si appaia con una C. La struttura del DNA ha immediatamente suggerito ai suoi scopritori, Watson e Crick, la sua modalità di replicazione: su ognuno dei due filamenti può essere infatti assemblato un filamento complementare, costruendo così due molecole a doppio filamento identiche all'originale (Fig. 2).

Un *gene* è uno specifico tratto di DNA che codifica una data proteina; esso cioè contiene l'informazione necessaria per costruirla, anche se negli organismi pluricellulari più complessi una frazione cospicua del DNA non codifica proteine. L'insieme del DNA, codificante e non codificante, è detto *genoma*. I genomi dei vari organismi possono notevolmente variare in dimensione: per esempio, il genoma umano consiste di circa 3 miliardi di paia di basi, quello dei microorganismi è generalmente di pochi milioni.

Un altro acido nucleico, l'*RNA* (*acido ribonucleico*) è chimicamente molto simile ma non identico al DNA, in quanto al posto del desossiribosio del DNA presenta il ribosio, di struttura simile; presenta inoltre uracile al posto della timina (Fig. 2). L'RNA esiste inoltre per lo più in forma di singola elica, cioè senza tratti appaiati. In un processo detto *trascrizione*, un filamento di un gene, cioè un tratto di DNA che codifica una proteina, viene copiato generando una molecola di RNA complementare, chiamata RNA messaggero o mRNA. Essa ha un ruolo fondamentale nella produzione di proteine codificate dai rispettivi geni. L'RNA viene utilizzato per sintetizzare una proteina in un processo che richiede un complesso apparato molecolare. Tale processo è detto *traduzione* in quanto consiste nella decodificazione dell'informazione contenuta nell'RNA e quindi ultimamente nel gene. È evidente che un tale sistema di codificazione, detto *codice genetico*, prevede una corrispondenza tra sequenza di basi nel DNA (o nell'RNA) e sequenza di aminoacidi nella corrispondente proteina. *Tale corrispondenza prevede che ogni aminoacido sia codificato da una o più sequenze di tre basi* detta tripletta (Tab. 1). In sintesi, si verifica un *flusso di informazione* secondo lo schema delineato in Fig. 3, vale a dire nella direzione DNA → RNA → proteine.

Anche in base a questa sintetica descrizione emerge la complessità degli organismi, anche dei più elementari. Come già abbiamo accennato, tale complessità si fonda su una sofisticata rete di interazioni, così che invariabilmente le funzioni vengono attuate mediante la cooperazione tra molte diverse componenti molecolari. Ciò pone già a questo livello una difficoltà considerevole a chi volesse comprendere i meccanismi dell'origine della vita, perché *il problema non può essere affrontato considerando l'origine e l'evoluzione di ogni singola parte* (o classe di molecole) indipendentemente dalle altre. Lo stesso flusso dell'informazione genetica che abbiamo appena illustrato, documenta nel modo forse più rappresentativo questo aspetto chiave del problema (Fig. 3). Un organismo, insieme di parti ordinate alla attuazione di un repertorio di funzioni, deve contenere l'informazione necessaria per la sua stessa costruzione, ma deve anche contenere i "componenti" che garantiscono l'attuazione di tali funzioni. Come abbiamo visto, l'informazione è contenuta principalmente nel DNA e le funzioni sono a carico delle proteine. Ora, il DNA ha bisogno di proteine per la sua replicazione, per la sua trascrizione e per la sua traduzione. Il DNA sarebbe quindi silente in assenza di proteine. Ma un organismo composto solo di proteine non potrebbe esistere, perché mancherebbe un deposito stabile dell'informazione, e quindi la possibilità di trasmettere l'informazione medesima alla discendenza. Il problema qui menzionato è la riproposizione a livello molecolare dell'antico problema "dell'uovo e della gallina". Nella fattispecie il DNA rappresenta l'uovo (il progetto codificato ma non ancora attuato), e la gallina si può identificare con l'insieme delle proteine (il progetto attuato). Di nuovo, in questa esemplificazione di centrale importanza non solo emerge con evidenza che le singole parti da sole non possono sostenere

un sistema autoreplicantesi, ma anche, come conseguenza, che non è facilmente concepibile la genesi di un sistema vivente che funzioni con un repertorio incompleto di *macromolecole* (un termine che si applica a proteine acidi nucleici, in quanto composti dall’assemblaggio di molecole più semplici, rispettivamente amminoacidi e nucleotidi).

Tabella 1. Il codice genetico universale. Esso stabilisce la corrispondenza tra la sequenza in basi di un RNA utilizzato per la sintesi di una proteina e la sequenza in amminoacidi della proteina corrispondente. Gli RNA che codificano proteine sono detti messaggeri (o mRNA), e ciascuno di essi viene sintetizzato a livello di un determinato tratto di DNA, detto gene, che funge da stampo: di conseguenza gli mRNA hanno una sequenza identica a quella di uno dei due filamenti del gene codificante e complementare a quella dell’altro filamento, salvo il fatto che nel DNA compare la timina (T) al posto dell’uracile (U). La corrispondenza tra amminoacidi (indicati in figura mediante la simbologia a tre lettere) e basi prevede che un determinato amminoacido venga codificato da una o più sequenze di tre basi, dette triplette o codoni. Per esempio, La sequenza UUU codifica fenilalanina (Phe); la sequenza ACG codifica treonina (Thr). Con la lettera t. vengono identificate le triplette di terminazione, vale a dire quelle in corrispondenza delle quali termina la sintesi della proteina.

Prima posizione	Seconda posizione				Terza posizione
	U	C	A	G	
U	Phe	Ser	Tyr	Cys	U
	Phe	Ser	Tyr	Cys	C
	Leu	Ser	t.	t.	A
	Leu	Ser	t.	Trp	G
C	Leu	Pro	His	Arg	U
	Leu	Pro	His	Arg	C
	Leu	Pro	Gln	Arg	A
	Leu	Pro	Gln	Arg	G
A	Ile	Thr	Asn	Ser	U
	Ile	Thr	Asn	Ser	C
	Ile	Thr	Lys	Arg	A
	Met	Thr	Lys	Arg	G
G	Val	Ala	Asp	Gly	U
	Val	Ala	Asp	Gly	C
	Val	Ala	Glu	Gly	A
	Val	Ala	Glu	Gly	G

Un’altra impressionante esemplificazione del ruolo centrale delle interazioni delle parti nell’attuazione delle funzioni vitali è dato dall’intrico delle reazioni che negli organismi rendono possibile il metabolismo (Fig. 4).

Sulla base di queste considerazioni emergono altre due caratteristiche che impongono una netta differenza qualitativa tra vivente e non vivente:

1) l’*irriducibilità*. Ciò significa che, come è già emerso dalle considerazioni esposte, un organismo è ben più e altro che la sommatoria delle singole parti e quindi *la sua natura non può essere compresa semplicemente analizzando le parti che lo compongono*. Un ulteriore esempio, molto esplicativo al riguardo, è suggerito di nuovo dalle proprietà del DNA. Si potrebbe caratterizzare un tratto di DNA

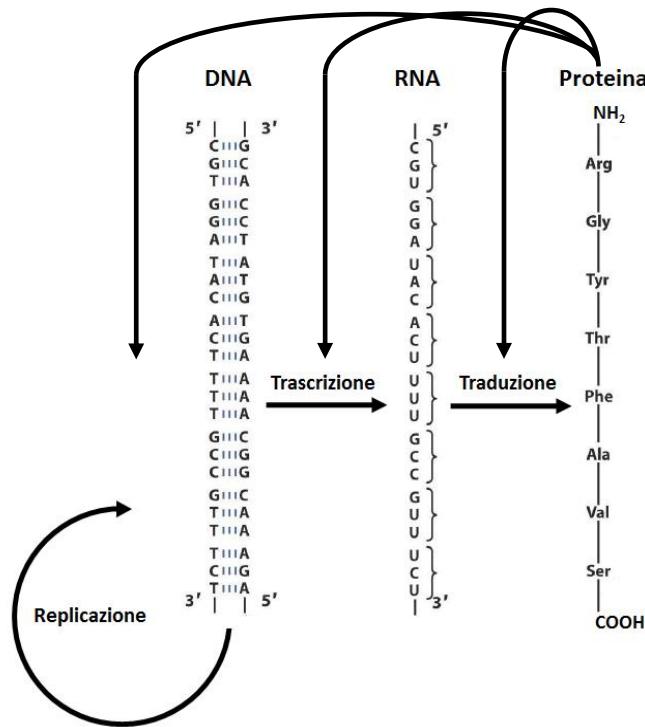


Fig. 3. Il flusso dell'informazione genetica da DNA a proteine. L'informazione codificata nel DNA viene trascritta nell'altro acido nucleico, l'RNA, che usa lo stesso linguaggio del DNA, vale a dire le stesse basi, con l'eccezione dell'uracile al posto della timina. L'informazione trascritta nell'RNA viene convertita (tradotta) in sequenze amminoacidiche, che formano le proteine. La figura evidenzia anche che nessuna di queste componenti di centrale importanza nei sistemi viventi (acidi nucleici e proteine) potrebbe espletare le sue funzioni senza le altre, in quanto-trascrizione, traduzione e replicazione sono funzioni sostenute da proteine.

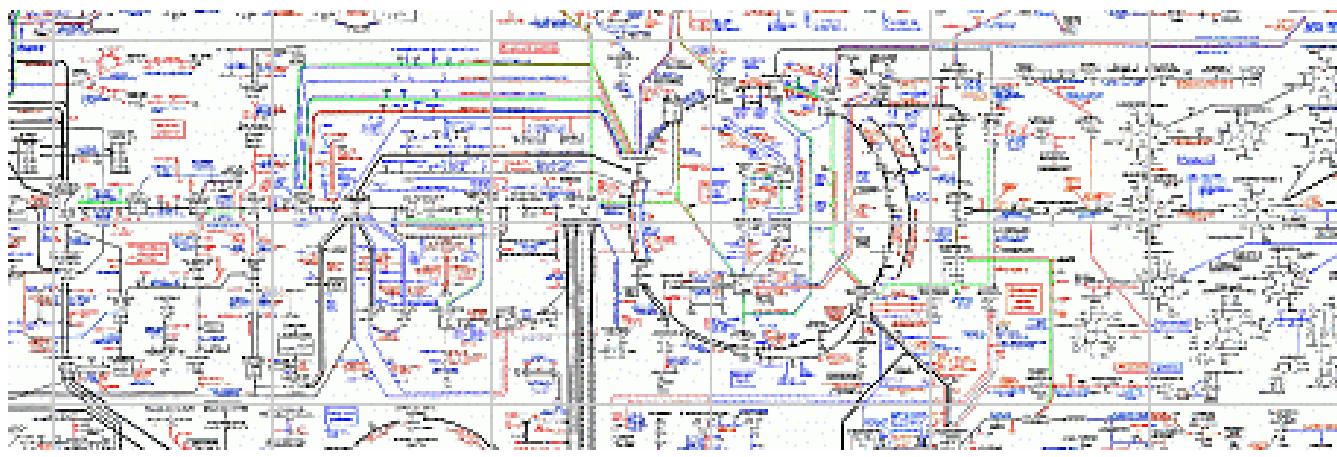


Fig. 4. La complessità del metabolismo. Nella figura è mostrata la fotografia di una piccola parte di un poster che presenta le vie metaboliche note. L'impressione è quella di un groviglio inestricabile di trasformazioni, anche se in realtà si tratta di un insieme di eventi rigorosamente controllati e predisposti per rifornire gli organismi di tutti gli ingredienti chimici necessari per la vita.

codificante una proteina, vale a dire un gene, in termini chimico-fisici, descrivendone ad esempio la massa molecolare, la reattività, la solubilità in acqua e via dicendo. Tutte queste sono proprietà reali del gene, che quindi meritano di essere indagate, tanto più che *i sistemi viventi sono pienamente*

soggetti a tali leggi. Ma se ci si limitasse a questo, si perderebbe di vista la sua caratteristica essenziale, che è la sua capacità di contenere un'informazione che codifica, con una specifica sequenza di basi, la corrispondente sequenza di amminoacidi di una proteina. Un gene ha quindi in un certo senso un *significato*, che tuttavia è estrinseco alla molecola stessa, in quanto consiste nella sequenza della proteina da esso codificata, la quale può essere ricavata in base al codice genetico. Ma la chiave del codice genetico è contenuta nelle cellule o negli organismi, e non nel gene medesimo.

2) *l'individualità.* Tale proprietà è una prerogativa unica dei sistemi biologici. Se anche ci limitassimo agli organismi più semplici, quelli unicellulari, l'individualità potrebbe essere riconducibile al fatto che essi, come già accennato, sono nettamente delimitati dal mondo esterno da una membrana; dal fatto che il loro ambiente interno è diverso da quello esterno, oppure anche dal fatto che, riproducendosi, essi formano due cellule di norma uguali al progenitore in termini di caratteristiche esteriori e genetiche. Ma l'aspetto più profondo di tale proprietà è che non si può disaggregare o scomporre una cellula in più parti senza perderne l'aspetto essenziale, appunto la sua stessa individualità. Se infatti rompessimo una cellula in due parti non otterremmo due cellule, ma semplicemente una raccolta di componenti molecolari che potrebbero probabilmente attuare qualche funzione ma non possiederebbero più l'interezza delle funzioni e delle proprietà della cellula originale. In breve: *nessuna delle parti che compone una cellula è "vivente" in se stessa.*

Il concetto che i sistemi viventi, sebbene pienamente soggetti alla leggi della chimica e della fisica, siano di più ed altro che non la sommatoria di un repertorio sia pur numeroso e complesso di componenti molecolari è stato espresso in modo icastico dal biologo molecolare Erwin Chargaff: "L'analisi delle parti che compongono un organismo vivente comporta, salvo poche eccezioni, il venir meno dell'elemento essenziale della vita stessa."

Queste considerazioni hanno una stretta attinenza con le problematiche legate all'abiogenesi. In primo luogo, questo quadro si accorda con quanto accennavamo in precedenza, vale a dire che *il processo non ha lasciato dietro di sé alcuna forma intermedia*: in altre parole, nessuno ha mai isolato entità che rappresentino, per così dire, una forma di transizione dal non vivente al vivente. Nel corso dell'abiogenesi, il "non vivente" avrebbe potuto essere una raccolta di macromolecole di diversa complessità, mentre viventi erano i primordiali, più elementari organismi unicellulari. Plausibilmente, nel corso dell'evoluzione molecolare devono essere comparse forme intermedie, ma con ogni evidenza deve essersi trattato di forme incapaci di permanere stabilmente, e che di conseguenza sono rapidamente scomparse. In secondo luogo, *le ipotesi che i ricercatori hanno proposto al fine di chiarire i meccanismi dell'abiogenesi, normalmente hanno preso in considerazione un elemento per volta*; per esempio, alcuni ricercatori hanno tentato di chiarire l'origine dell'informazione genetica, altri delle proteine, altri ancora delle reti metaboliche. È infatti al di fuori della portata di chiunque, almeno al presente, formulare un modello di abiogenesi che dia conto della genesi in un unico processo di tutte le componenti di un sistema vivente.

Gli elementi fin qui presentati evidenziano il radicale salto qualitativo che esiste tra le forme di vita anche più elementari e tutto ciò che le ha precedute, che abbiamo definito chimica prebiotica. In questa prospettiva è anzi un elemento di primaria importanza il fatto che *tutti gli organismi viventi presentano, a livello molecolare, un grado di complessità non molto differente*. Anche se in termini macroscopici chiunque è in grado di notare un diverso livello di complessità tra i diversi organismi, le componenti molecolari indispensabili a sostenere le funzioni essenziali sono molto simili quanto a numero, logica e meccanismo di funzionamento in ciascuno di essi. In altre parole, l'organismo più elementare non è molto diverso da quello più complesso se lo si considera a livello molecolare, l'unico che conti in vista della comprensione dell'abiogenesi.

3. L'abiogenesi e le ipotesi interpretative del processo

Per porre le basi per una comprensione del processo che ha generato le prime forme di vita sul nostro pianeta, è evidentemente essenziale la conoscenza delle caratteristiche chimico-fisiche dell'ambiente e della scala dei tempi entro cui il processo si è sviluppato. Daremo qui una succinta descrizione delle conoscenze oggi disponibili a questo riguardo. Oggi abbiamo potuto determinare in modo notevolmente preciso l'età della Terra e gli stadi che essa ha attraversato nel corso della sua evoluzione. Soprattutto grazie a tecniche di radiodatazione delle rocce, è stato possibile stabilire che la solidificazione delle rocce più antiche risale a 4,5-4,6 miliardi di anni fa. In realtà, devono essere passati alcune centinaia di milioni di anni prima che la Terra diventasse abitabile anche solo da organismi elementari. Essa era infatti inizialmente troppo calda, bombardata da asteroidi e priva di acqua. Abbiamo testimonianze di vita batterica che risalgono a circa 3,5 miliardi di anni fa: si tratta delle *stromatoliti*, strutture sedimentarie dovute alla fossilizzazione su scala macroscopica di organismi microbici fotosintetici che erano già presenti a quell'epoca in forma massiva. Data la loro ampia diffusione già a quell'epoca, è del tutto plausibile che i primi organismi fossero comparsi alcune centinaia di milioni di anni prima. Queste osservazioni hanno portato a una conclusione di considerevole importanza: *con ogni probabilità, il processo che ha portato alla formazione dei primi organismi ha avuto una durata estremamente ristretta, almeno se rapportata a quella complessiva della vita del nostro pianeta.*

Se viene universalmente accettato che l'acqua si è accumulata sulla Terra in epoche molto precoci dopo il raffreddamento della crosta terrestre, non è chiarissimo quale fosse la composizione dell'atmosfera. Si tratta di un fattore critico per l'abiogenesi, dato che è proprio dall'atmosfera che sarebbero stati estratti i composti necessari alla costruzione delle molecole biologiche. Secondo le ipotesi più accreditate alcuni decenni fa, l'atmosfera sarebbe stata composta principalmente di idrogeno, ammoniaca, metano e naturalmente vapor d'acqua (come nei pianeti esterni gassosi del sistema solare). In realtà, a tale ipotesi è stato obiettato che l'irradiazione solare avrebbe dovuto distruggere questi composti, data la relativa vicinanza al Sole del nostro pianeta. L'ipotesi proposta in alternativa e oggi più generalmente accettata, è che i composti prevalenti nell'atmosfera fossero azoto ed anidride carbonica. Tuttavia gli assertori della prima ipotesi controbattono che ammoniaca e metano avrebbero potuto permanere stabilmente nell'atmosfera primitiva nonostante l'irradiazione solare, grazie all'effetto di schermatura delle polveri vulcaniche, sicuramente abbondanti in quell'epoca. Se ci soffermiamo su questo aspetto del problema è perché la composizione dell'atmosfera è di centrale importanza in relazione alla comprensione dei meccanismi dell'abiogenesi: infatti azoto e anidride carbonica sono molto più stabili di ammoniaca e metano e molto meno propensi a reagire formando molecole complesse.

Per documentare quanto sia importante la conoscenza della composizione dell'atmosfera ai fini della comprensione dei meccanismi dell'abiogenesi citeremo l'esperimento effettuato nel 1953 dal biochimico statunitense Stanley Miller (1930-2007), il primo ad aver tentato di riprodurre il processo dell'abiogenesi in un sistema ricostruito in laboratorio. Partendo dall'ipotesi di lavoro che la vita si fosse formata in un ambiente in cui era presente elettricità atmosferica (quindi una fonte di energia, che è indispensabile per il processo), un oceano primitivo e la presenza di ammoniaca, metano e idrogeno, fece circolare tra due bocce una miscela di questi composti. In una boccia due elettrodi generavano scariche elettriche; nell'altra era presente una raccolta d'acqua che si voleva riproducesse l'oceano

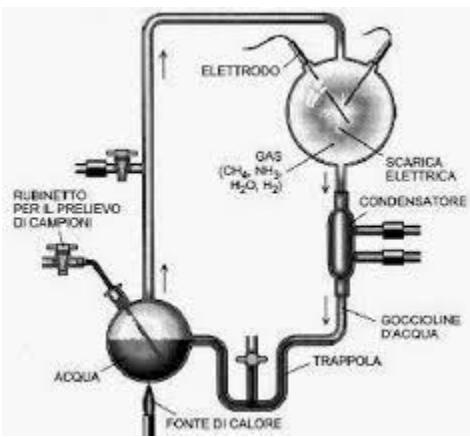


Fig. 5. L'apparecchio di Miller sviluppato per simulare i processi della chimica prebiotica primordiale. La miscela di gas (metano, ammoniaca e idrogeno) viene fatta circolare tra la boccia superiore e una piena d'acqua collocata più in basso. Nella boccia superiore vengono generate scariche elettriche, che simulano l'elettricità atmosferica della Terra primitiva.

primitivo (Fig. 5). Dopo parecchie ore si accumulò nella raccolta d'acqua un sedimento che conteneva un repertorio molto vario e abbondante di composti, tra i quali alcuni erano aminoacidi, vale a dire gli ingredienti fondamentali per la formazione delle proteine; altri erano prodotti importanti del metabolismo, quali acido lattico, acido acetico, acido succinico. Successive sperimentazioni condotte adottando lo stesso schema di Miller ma modificando alcune condizioni portarono alla formazione anche di alcune basi azotate che compongono gli acidi nucleici. L'esperimento di Miller ebbe una risonanza mondiale ed è probabilmente ancora oggi quello più menzionato quando si parla dei problemi riguardanti i meccanismi dell'abiogenesi. I suoi risultati fecero credere che prolungando abbastanza il trattamento si sarebbero potute ottenere macromolecole, e forse alla fine anche cellule. Tuttavia lo sviluppo successivo di questo tipo di sperimentazioni dimostrò che non si sarebbe mai andati molto al di là della sintesi dei semplici composti ottenuti da Miller. Tuttavia il suo esperimento portò ad una conclusione di primaria importanza anche a prescindere da obiezioni legate alla nostra incertezza circa la composizione dell'atmosfera primitiva: *dimostrò infatti che la chimica è intrinsecamente "predisposta" a generare un vasto repertorio di molecole biologiche a partire da composti semplici.*

L'idea che la materia possieda questa tendenza spontanea ha inoltre trovato un'ulteriore conferma dalle analisi spettrali degli spazi interstellari, che hanno dimostrato la presenza di composti di questo tipo un po' dappertutto nell'universo. Inoltre un particolare tipo di meteoriti, detto condriti carbonacei, ha fornito ulteriori conferme in tal senso. Si ritiene che esse derivino direttamente dalla condensazione della nube di gas primordiale da cui si è formato il sistema solare e che mantengano anche la composizione chimica che possedevano all'origine. Ebbene: ciò che è di assoluto rilievo in relazione all'abiogenesi è che all'analisi chimica esse si sono dimostrate ricche di un repertorio di composti organici molto simili a quelli ottenuti da Miller.

Molti altri ricercatori hanno sviluppato teorie volte a interpretare i meccanismi dell'abiogenesi. Tali teorie presentano generalmente due limiti, inevitabili, data la natura del problema: il primo è appunto che si tratta di "teorie", cioè speculazioni, sia pur geniali, ma non sperimentazioni; il secondo è che esse hanno per lo più tentato di rendere conto della genesi di una sola tipologia di composti o fenomeni biologici (proteine, acidi nucleici, reti metaboliche), perdendo così di vista l'aspetto essenziale del processo, che è la formazione in un unico processo di tutte o molte le componenti necessarie per la nascita di un sistema vivente. È interessante osservare, a questo riguardo, che in effetti le teorie formulate sono diventate nel tempo sempre più complesse e capaci di tener conto degli aspetti problematici, soprattutto nel corso del XX secolo, ma ciò è conseguito dall'approfondirsi della nostra comprensione dei meccanismi molecolari che governano i sistemi biologici, piuttosto che da sperimentazioni specificamente orientate a tentare di riprodurre il fenomeno dell'abiogenesi. È particolarmente illustrativa, a questo riguardo, la scoperta nel 1989 di molecole di RNA dotate di attività catalitica. Esse assommano infatti la capacità di promuovere specifiche reazioni all'interno delle cellule, come le proteine, con quella di immagazzinamento di informazione, come il DNA. Ciò ha fondato la

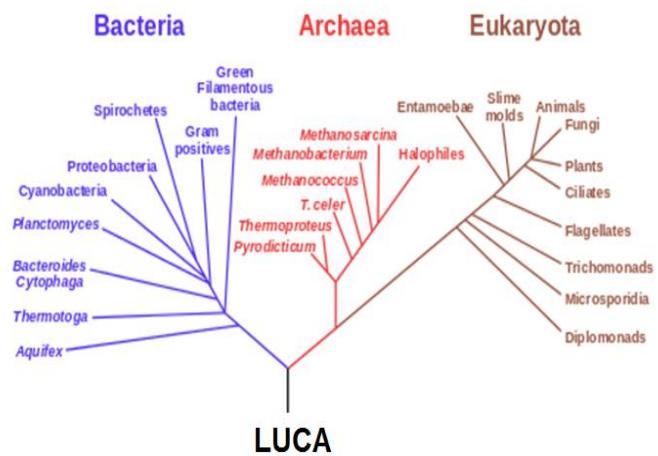


Fig. 6. L'albero filogenetico universale, che mostra le relazioni evolutive ipotizzate tra i tre grossi raggruppamenti di organismi. Alla radice dell'albero si trova il LUCA, progenitore comune di tutti gli organismi attuali, come confermato da molteplici dati molecolari. Batteri e archibatteri sono morfologicamente procarioti, vale a dire organismi unicellulari senza nucleo, di cui sono invece dotati gli eucarioti, organismi con cellule compartmentate, in particolare dotate di nucleo, e includono tutti gli organismi pluricellulari (animali e piante), ma anche molti unicellulari. Gli archibatteri si distinguono dai batteri in senso stretto per avere conservato determinate peculiarità del patrimonio genetico che a livello molecolare li rendono più simili agli eucarioti che non ai batteri.

vero che inserendo in un batterio un gene che codifica una proteina umana, in opportune condizioni il batterio si mette a produrre la proteina umana.

La condizione monofiletica ha suscitato l'ovvia domanda se la vita si sia effettivamente sviluppata una sola volta sulla Terra, o se vi siano stati molteplici tentativi, tutti abortiti tranne uno. L'unica risposta che si può dare a questo interrogativo è: non lo sappiamo! In ogni caso, la condizione monofiletica ha stimolato l'interesse a ricostruire le caratteristiche del primo organismo unicellulare, che con un acronimo in lingua inglese è stato definito *LUCA*, vale a dire "Last Universal Common Ancestor". In italiano si potrebbe tradurre con: "il più recente progenitore di tutti gli organismi". In termini semplificati, si potrebbe dire che la strategia per ricostruire, per quanto possibile, le caratteristiche del LUCA si basa sull'analisi molecolare, soprattutto del genoma, dei vari organismi. L'idea di fondo si basa sul concetto che la speciazione (vale a dire la formazione di più specie biologiche a partire da un organismo originario) porti col tempo a una divergenza delle caratteristiche molecolari degli organismi derivati, ma ciò comporta anche che i tratti conservati in tutti gli organismi attuali, molto probabilmente avrebbero dovuto essere già presenti nel LUCA. Non è possibile illustrare la teoria senza entrare in dettagli specialistici: ci limitiamo a dire che tale analisi conferma la presenza nel progenitore ancestrale dei tratti essenziali dei sistemi di replicazione del DNA, della trascrizione e della traduzione e delle reti metaboliche seppure un po' più semplificate rispetto ai più elementari organismi attuali. È anche degno di nota che questa analisi abbia consentito di ricostruire l'albero evolutivo universale, che stabilisce, seppure in modo approssimativo, quando ha avuto luogo la divergenza evolutiva tra i vari

teoria del mondo a RNA, oggi centrale nella nostra comprensione dell'abiogenesi. In ogni caso, neppure questa scoperta ha individuato un percorso dettagliato per la comprensione del processo.

4. Quante volte sulla Terra si sono formati organismi viventi dalla materia non vivente?

Sulla base delle nostre attuali conoscenze circa le caratteristiche molecolari degli organismi viventi, è un dato assolutamente certo che tutti quelli a noi noti derivano da un unico progenitore comune, che era naturalmente unicellulare. Si usa un termine specifico per indicare tale derivazione comune: si dice che tutte le specie esistenti sono *monofiletiche*. Possiamo affermare questo con tanta sicurezza in quanto le strutture molecolari che presiedono alle funzioni base di una cellula sono le stesse in tutti gli organismi, in termini di struttura generale e logica di funzionamento. Parliamo in particolare della struttura di acidi nucleici, proteine, come pure del codice genetico e dei sistemi di trascrizione (DNA → RNA) e traduzione (RNA → proteine). Tutto ciò è così

raggruppamenti di organismi oggi esistenti (Fig. 6). Ma soprattutto questa analisi conferma un concetto fondamentale che abbiamo già menzionato nel secondo paragrafo: anche il più semplice dei microrganismi, incluso il LUCA, era dotato a livello molecolare una complessità non molto diversa da quella degli organismi più complessi.

5. Quale la probabilità?

Le investigazioni e le speculazioni che abbiamo fin qui presentato circa i meccanismi dell'abiogenesi ci portano inevitabilmente a porci due interrogativi, distinti ma strettamente connessi tra loro: 1) qual è la probabilità che si sviluppi la vita quando le condizioni chimico-fisiche al contorno sono favorevoli? (e di conseguenza che probabilità aveva la vita di comparire sulla Terra quando è effettivamente comparsa?) 2) qual è in media la probabilità che in un sistema planetario vi siano condizioni favorevoli?

Così come lo abbiamo formalizzato, questo è un problema di probabilità composta. Ciò significa che la probabilità dell'evento finale (comparsa della vita) è dato dal prodotto delle probabilità dei due fattori elencati. In qualche senso, la comparsa della vita è una “gara a eliminazione”, come in seguito emergerà anche più chiaramente, il cui esito finale è favorevole se lo sono tutti gli eventi intermedi. Come ovvia conseguenza, se avessimo la risposta a questi due interrogativi, saremmo anche in grado di stimare se e quanto la vita sia diffusa nell'Universo. Vediamo quindi quali risposte si possono dare all'una e all'altra delle due domande.

1) *Quando le condizioni chimico-fisiche al contorno sono favorevoli, qual è la probabilità che si sviluppi la vita?* Per quanto deludente possa apparire, anche in questo caso l'unica risposta onesta a questa domanda è: non lo sappiamo. La nostra ignoranza ha una motivazione ben precisa, legata al fatto che, almeno dal nostro punto di osservazione, la vita è una singolarità. In altre parole, noi conosciamo *un solo* esito riuscito di esperimento naturale di abiogenesi: quello che ha avuto luogo sulla Terra e dal quale noi stessi deriviamo. Non sappiamo dunque quanti altri ce ne siano stati nel nostro o in altri sistemi planetari, e quanti abbiano, o non abbiano, avuto successo. Ora, un procedimento scientifico che si prefigga di dare risposta al problema deve necessariamente fondarsi sul metodo sperimentale, e ciò a sua volta presuppone la riproducibilità. In altre parole, i risultati di un esperimento debbono poter essere replicati se si vuole osservare il divenire del fenomeno sotto indagine, da cui trarre conclusioni, o formulare ipotesi e teorie ragionevolmente certe: se deve occuparsi di singolarità la scienza perde uno dei suoi strumenti metodologici fondamentali. Dunque, per dare una risposta dovremmo provare a riprodurre più volte in laboratorio le condizioni della Terra primitiva (che fra l'altro conosciamo molto parzialmente) e per ciascun tentativo monitorarne gli esiti nel corso di decine o centinaia di milioni di anni: decisamente al di fuori della nostra portata! In alternativa, e più realisticamente, potremmo forse nei prossimi decenni andare a verificare l'esito di “esperimenti naturali”, tentando di osservare, se possibile più volte, il verificarsi dell'abiogenesi in natura, vale a dire su altri pianeti, come in effetti le agenzie spaziali stanno programmando sul lungo periodo.

2) *Qual è in media la probabilità che in un sistema planetario vi siano pianeti che presentano condizioni favorevoli?* Fa parte del comune sentire che il nostro pianeta, grazie alle sue condizioni chimico-fisiche, costituisca un ambiente particolarmente accogliente per la vita. Anche il confronto con gli altri pianeti del sistema solare rende evidente che a questo riguardo la Terra rappresenta un ambiente particolarmente fortunato in vista dell'abiogenesi. In particolare, esso possiede (e possedeva), una superficie rocciosa e non gassosa, un'atmosfera sufficientemente densa, grandi quantità di acqua, e una temperatura compatibile con la permanenza di questa allo stato prevalentemente liquido. Nessun altro pianeta o satellite del sistema solare possiede al contempo tutte queste prerogative. Di

conseguenza, una riflessione superficiale potrebbe far pensare che se le condizioni sopra elencate sono necessarie e *sufficienti* per la comparsa della vita, pianeti simili al nostro debbano essere molto numerosi nell'Universo. Si stima infatti che le stelle nell'Universo conosciuto siano dell'ordine di centomila miliardi di miliardi. Per esempio, potremmo ragionevolmente ipotizzare che il numero dei pianeti abitabili sia dell'ordine dei miliardi. In realtà, i progressi della cosmologia, e non meno quelli della geologia, suggeriscono che i prerequisiti per un ambiente abitabile siano sorprendentemente numerosi. Naturalmente, essi sono tutti presenti sul nostro pianeta. Ma la presenza *in contemporanea* di tutti questi prerequisiti potrebbe essere appannaggio di una frazione estremamente esigua di pianeti tra tutti quelli esistenti. Per documentare concretamente questo aspetto del problema, presentiamo qui di seguito un elenco di condizioni indispensabili, o per lo meno fortemente favorenti, perché un pianeta possa ospitare la vita (precisando, a ogni buon conto, che si tratta verosimilmente di un elenco incompleto):

- La stella attorno alla quale orbita il pianeta abitabile deve essere una stella di seconda generazione, come il nostro Sole, derivante dalla condensazione della materia prodotta dall'esplosione di una supernova. Nell'esplosione si distribuiscono nel mezzo interstellare gli elementi pesanti prodotti dalla supernova (come per esempio il ferro e altri metalli), indispensabili per la costruzione degli organismi.
- La stella non deve essere parte di un sistema binario, vale a dire composto di due stelle: ciò comporterebbe irradiazioni di intensità estremamente variabile sui pianeti, con una conseguente drammatica instabilità climatica.
- La stella deve orbitare nella galassia non troppo vicino al centro né troppo lontano. In prossimità del centro l'intensità delle radiazioni cosmiche sarebbe idonea a sterilizzare ogni tentativo di vita; lontano dal centro scarseggiano elementi pesanti che, come abbiamo visto, sono indispensabili per la vita.
- L'irradiazione della stella deve essere sostanzialmente costante nel tempo. Ciò ha consentito il mantenimento di acqua liquida sulla superficie del nostro pianeta per miliardi di anni. Si tratta di un ulteriore requisito necessario, anche se a dire il vero esso non dovrebbe essere molto infrequente, in quanto è appannaggio delle stelle di massa simile al Sole, che sono la larga maggioranza.
- Il pianeta abitabile deve essere roccioso, deve ruotare attorno alla sua stella alla distanza "giusta" e con un'orbita non troppo ellittica, così da permanere entro un intervallo di distanze dalla stella idoneo a garantire il mantenimento di acqua liquida.
- La presenza di pianeti giganti gassosi esterni (in particolare Giove e Saturno) ha costituito, grazie al loro forte campo gravitazionale, una sostanziale protezione da impatti di asteroidi nell'arco di miliardi di anni, ognuno dei quali avrebbe prodotto effetti catastrofici. Così dovrebbe essere, con ogni probabilità, in un sistema planetario idoneo ad alloggiare la vita.
- La presenza di un satellite massiccio (la Luna) ha garantito alla Terra una notevolissima stabilità nell'inclinazione dell'asse di rotazione del nostro pianeta. In mancanza di ciò il clima avrebbe subito ripetutamente variazioni vertiginose (con cambiamenti della temperatura media anche di parecchie decine di gradi) nell'arco di decine di migliaia di anni, un tempo quasi irrilevante sulla scala dell'evoluzione biologica. Nessun altro pianeta del sistema solare possiede un satellite di massa così relativamente elevata, come quella della Luna rispetto a quella della Terra. Non sappiamo quanto frequente sia a livello cosmico l'esistenza di un sistema simile a quello Terra-Luna: tuttavia quanto viene osservato all'interno del sistema solare suggerisce che possa trattarsi di una evenienza piuttosto rara.
- Il vulcanismo ha garantito un apporto di anidride carbonica nell'atmosfera tale da generare un effetto serra naturale, senza il quale la temperatura – secondo alcune stime – sarebbe stata più bassa di circa 30°C. È comunque verosimile che tale condizione sia condivisa dalla maggioranza dei pianeti simili alla Terra.

- La Terra possiede anche un forte campo magnetico, che scherma sostanzialmente la superficie dai raggi cosmici. In sua assenza la superficie verrebbe permanentemente sterilizzata dal bombardamento di queste radiazioni. Il campo magnetico non è una prerogativa costante di tutti i pianeti rocciosi, come dimostrato dalla sua assenza su Marte e Venere.

Questa breve rassegna di condizioni chiarisce che, su base statistica, l'esistenza di pianeti che possiedano condizioni compatibili con la vita è un evento di assoluta rarità, e quindi alla domanda se la vita esista nell'Universo (tolta naturalmente la Terra), dobbiamo onestamente rispondere che non siamo in grado di rispondere né con un sì, né con un no. È anche degno di nota che la scoperta della eccezionalità delle condizioni del nostro pianeta si sia profilata gradualmente e solo in epoche relativamente recenti (approssimativamente negli ultimi 40 anni), a seguito dei recenti progressi conoscitivi nell'ambito dell'astrofisica e della geofisica.

6. Alla ricerca della vita nell'Universo

Nel 1961 l'astrofisico statunitense Frank Drake elaborò una formula con la quale si proponeva di stimare il numero di civiltà extraterrestri in grado di comunicare con la nostra (Fig. 7). Il criterio generale su cui si basava il suo tentativo è lo stesso di "gara ad eliminazione" che abbiamo enunciato nel paragrafo precedente: in altre parole, la probabilità dell'evento finale è data dal prodotto delle probabilità dei singoli eventi indispensabili per il verificarsi dell'evento finale. Tuttavia, nel proporre questa formalizzazione matematica del problema, Drake non prese in considerazione soltanto l'abiogenesi, ma anche un altro aspetto, del quale qui non ci siamo occupati: quello della probabilità dello sviluppo dalla vita batterica primitiva di forme di vita autocoscienti e tecnologiche. Accenniamo brevemente al fatto che le conoscenze attuali suggeriscono che anche questo sia un evento tutt'altro che deterministico. In altre parole, in considerazione di quanto conosciamo in merito alle dinamiche evolutive, non c'è dubbio che a priori avremmo potuto attribuire scarsissime probabilità di successo alla comparsa della nostra specie da forme di vita più primitive.

La maggior parte dei fattori che compongono la formula di Drake sono ignoti e quindi essa ha un valore puramente speculativo. Tuttavia il forte interesse degli scienziati (e non di meno di tutte le persone desiderose di conoscenza) ha fatto da propulsore all'avvio del programma SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence), dedicato alla ricerca di possibili segnali radio inviati da forme di vita intelligenti extraterrestri che siano abbastanza evolute per poterlo fare. Il SETI si occupa anche di inviare segnali della nostra presenza a queste eventuali civiltà. L'aspetto tecnologico del SETI è tutt'altro che banale e non è nostra intenzione approfondirlo in questa sede. Osserviamo tuttavia che a fino ad oggi questa ricerca non ha prodotto alcun risultato, sebbene essa sia iniziata quasi 60 anni fa. È anche vero che le potenzialità tecnologiche dispiegate fino ad oggi hanno consentito di esplorare solo una porzione dell'Universo che corrisponde a una minima parte della nostra galassia. In realtà, il progetto SETI continua; in particolare è in via di allestimento lo SKA (Square Kilometer Array), un gigantesco radiotelescopio da un chilometro quadrato composto un gran numero di piccole antenne distribuite su un'area immensa, principalmente tra il Sudafrica e l'Australia. La sua entrata in funzione è prevista nel 2023 e consentirà di captare segnali fino a mille anni luce di distanza, esplorando così un volume circa un milione di volte maggiore di quello esplorato fino ad oggi, corrispondente ad almeno un centesimo del volume della galassia, contenente un numero di stelle dell'ordine delle centinaia di milioni e, non meno importante, tutto ubicato all'interno della zona abitabile della galassia (cioè né troppo vicino né troppo lontano dal suo centro).

$$N = R f_1 f_2 n_e f_3 f_4 f_5 L$$

N: numero di civiltà nella nostra Galassia

R: tasso medio di formazione di stelle nella Galassia

f_1 : frazione di stelle con proprietà compatibili con lo sviluppo della vita

f_2 : frazione di stelle che hanno sistemi planetari

n_e : numero medio di pianeti, in un sistema planetario, che possiedono un ambiente favorevole alla comparsa della vita

f_3 : frazione di pianeti in cui la vita effettivamente è nata

f_4 : frazione di pianeti in cui la vita si è sviluppata fino a generare forme intelligenti

f_5 : frazione di pianeti in cui la vita si è sviluppata fino a generare forme intelligenti capaci di tecnologie avanzate

L: vita media delle civiltà evolute

Figura 7. La formula di Drake. N (il numero di civiltà tecnologiche presumibilmente presenti nella nostra Galassia), è dato dal prodotto di molteplici fattori, alcuni di tipo astrofisico, di cui oggi abbiamo qualche nozione, altri legati alla probabilità di comparsa della vita e di forme evolute di esse, di cui ad oggi nulla conosciamo.

Come abbiamo visto, solo all'incirca negli ultimi cento anni il problema dell'abiogenesi è stato affrontato su basi metodologiche realmente scientifiche. Fino ad ora, nonostante la straordinaria ingegnosità dei ricercatori che si sono cimentati su questo problema gli sviluppi di queste ricerche si sono dimostrati un insuccesso, in quanto non sono stati in grado di produrre una teoria o un modello realmente esplicativi degli aspetti chiave del fenomeno (come si assemblano le macromolecole da composti più semplici? Da dove viene l'informazione necessaria per sostenere le funzioni del più elementare degli organismi? Come è stata possibile la formazione sufficientemente stabile di forme intermedie tra il non vivente e il vivente?). Le ragioni di questo stallo le abbiamo già discusse e sono riconducibili principalmente all'impossibilità di applicare a questo problema il metodo scientifico nella sua interezza.

Tuttavia questi sforzi non sono stati affatto inutili, almeno a parere di chi scrive. Essi hanno infatti arricchito grandemente il nostro bagaglio di conoscenze (si pensi in particolare all'esperimento di Miller e alle sue implicazioni), e in tal modo allargato il nostro sguardo sulla realtà fisica e sulla collocazione dell'uomo al suo interno. Ma al contempo, il problema dell'abiogenesi è forse uno dei casi più rappresentativi dell'esistenza di limiti invalicabili (almeno ad oggi) per la ricerca scientifica nel suo specifico ambito, quello della conoscenza del mondo fisico. Pertanto, quando si trattano problematiche scientifiche è sommamente opportuno, per un dovere di realismo, prendere atto dell'esistenza di questi limiti. Nel caso che abbiamo qui preso in esame, ciò vale sia per gli aspetti strettamente biologici (come si sono formati i primi organismi?) sia per quelli cosmologici (esiste vita nel cosmo?). Non è pertanto irrealistico asserire che il percorso umano di conoscenza può imbattersi nell'insondabile anche quando si avvale del metodo scientifico, e ciò a sua volta suscita interrogativi che vanno al di là degli aspetti puramente fisici della realtà.

Si attende la ricezione di un segnale da altre civiltà nei prossimi 15-20 anni, naturalmente se esiste! Tuttavia è opportuno osservare che anche un risultato negativo comporterebbe un incremento importante della conoscenza in materia, in quanto dimostrerebbe che la vita (almeno nella forma cosciente e tecnologica) o è molto molto rara nell'Universo o non esiste affatto. Inoltre, se anche esistesse, essendo molto molto rara, con alta probabilità statistica sarebbe anche molto molto lontana. Qualsiasi sia l'interpretazione della mancata ricezione di un segnale dal cosmo, se ne dovrà pertanto trarre la conclusione, *quasi* certa, che non entreremo mai in contatto con altre civiltà.

3.9 Per concludere: quali lezioni dalle ricerche sull'origine della vita