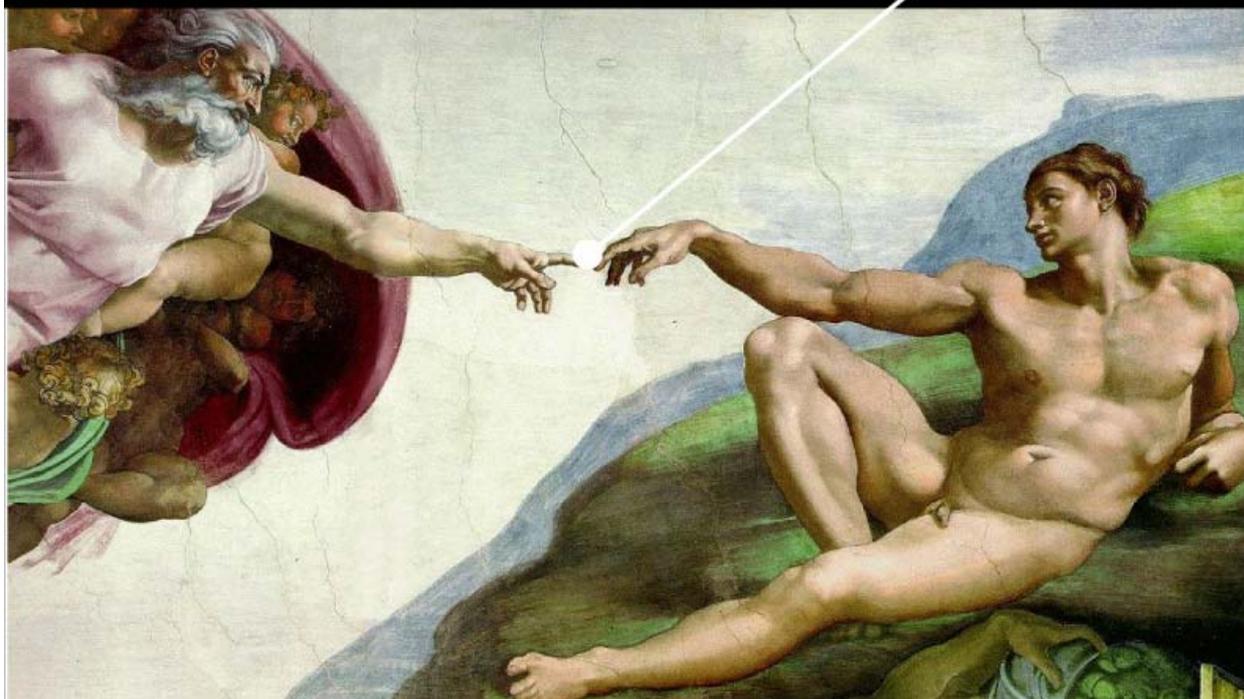


*Bruna Tadolini*

# **Dal Big Bang a Dio**

*Il lungo viaggio della vita*



<b>LA VITA</b>	<b>6</b>
<b>DAL BIG BANG ALLA VITA</b>	<b>9</b>
<b>L'evoluzione fisica dell'universo</b>	<b>9</b>
L'evoluzione fisica ha prodotto le diverse forme di energia	9
La materia si organizza ... in grande	10
... ed anche in piccolo.	14
<b>Sulla terra comincia l'evoluzione chimica</b>	<b>18</b>
Come funziona la chimica: quali reazioni avvengono e quanto tempo impiegano ad avvenire	18
Arrivano i primi intoppi ma ... la chimica riesce a superarli	21
I trasportatori di energia	22
I catalizzatori, acceleratori di reazioni	22
I captatori di energia solare	25
<b>Inizia l'evoluzione biochimica</b>	<b>26</b>
Un tipo molto efficiente di catalizzatori, i ribozimi	26
I ribozimi, le prime macchine biochimiche	29
Un sacchetto per non disperderli	30
Fare e disfare è tutto un lavorare	33
Un ribozima speciale per riprodurre i ribozimi ...	34
... che divengono lo stampo di sé stessi	35
<b>L'evoluzione biochimica prosegue</b>	<b>35</b>
Le proteine, molecole con tanti pregi ed un tremendo difetto ...	35
... ma il merito, prima o poi, viene riconosciuto	40
Una nuova funzione per i ribozimi: istruzioni per la sintesi delle proteine	46
Come salvaguardare le istruzioni	47
La concorrenza da dei vantaggi: il DNA spodesta i ribozimi dalla funzione di stampo di sé stessi	50
<b>LA CELLULA PRIMORDIALE</b>	<b>52</b>
<b>Costruiamo l'astronave vivente</b>	<b>52</b>
La carrozzeria	54
Le porte	55
Come procurarsi energia e pezzi utilizzabili partendo dal materiale introdotto	57
Le catene di smontaggio	58
Le catene di montaggio	60
Come costruire le macchine utensili	62
I piani di costruzione	64
I progetti e la loro duplicazione	65

<b>Ottimizziamone il funzionamento</b>	<b>67</b>
L'economicità	67
La flessibilità	68
Si ottengono modificando il parco macchine ...	70
...e l'efficienza delle macchine	72
<b>L'EVOLUZIONE FISICA DELLA VITA</b>	<b>75</b>
<b>Il fine della vita</b>	<b>75</b>
<b>Gli strumenti per raggiungere lo scopo</b>	<b>75</b>
Le mutazioni	75
La selezione naturale	79
<b>L'evoluzione degli organismi unicellulari</b>	<b>82</b>
La prima grande "scelta": duplicarsi velocemente ... o no	82
L'evoluzione dei "veloci"	83
La strategia dei "lenti": l'organizzazione	87
Si organizza il DNA	88
Si organizza il "territorio"	89
Si organizza uno "scheletro"	91
Si inventa il "sesso"	93
Ma ci vuole anche un colpo di ... fortuna	94
Con l'organizzazione e l'energia si è pronti a conquistare il mondo!	96
<b>L'evoluzione degli organismi pluricellulari</b>	<b>97</b>
I nuovi strumenti a disposizione	97
La coesione fra cellule	97
Il differenziamento: cellule uguali ma diverse	98
La comunicazione fra cellule	99
Costruiamo l'albero genealogico	102
Le grandi linee dell'evoluzione degli organismi animali pluricellulari	104
Tutto è cominciato con il collasso di un pallone	104
Il pallone collassato si arricchisce di una imbottitura interna	105
Scavare buchi nel pieno o riempire una cavità?	106
Una questione di orifizi ...	107
... e di spina dorsale	108
Ma anche le mascelle fanno la differenza	111
Ci si attrezza per la conquista delle terre emerse	112
Un mare tascabile per lo sviluppo embrionale	114
Un nuovo ambiente da conquistare: la notte	115
Per non parlare del cielo	116
Una secrezione apparentemente inutile: il latte	117
Il colpo di scena che ha favorito il successo dei Mammiferi	119

Gli antenati dell'uomo	121
Lo strumento vincente: il cervello	121
Cosa ha determinato l'evoluzione dell'uomo?	125
La stazione eretta	126
E una volta in piedi?	127
Le cause dell'intelligenza	128
Il ruolo promozionale del linguaggio	129
<b>L'EVOLUZIONE "METAFISICA" DELLA VITA</b>	<b>132</b>
<b>Le sensazioni</b>	<b>132</b>
<b>I sentimenti</b>	<b>135</b>
<b>L'apprendimento e la cultura</b>	<b>140</b>
Come si apprende	140
L'apprendimento individuale	141
L'apprendimento è un nuovo ed efficiente strumento evolutivo	143
L'apprendimento pre-sociale	143
L'apprendimento sociale	146
Le diverse forme di apprendimento si integrano e si evolve la trasmissione culturale	147
<b>La socialità</b>	<b>150</b>
Compare un nuovo organismo: il gruppo sociale	151
L'evoluzione della socialità	152
Le società temporanee	153
Le società permanenti	154
Le caratteristiche delle società permanenti	155
<b>L'apprendimento e la socialità</b>	<b>157</b>
Imparare a guadagnarsi il proprio posto ed a tenerlo	157
Giocando si impara ...	158
... e con l'affetto si impara meglio	160
Il vecchio sistema di apprendimento è ancora adeguato?	161
<b>La socialità e la morale</b>	<b>162</b>
Cosa è la morale e qual'è la morale della vita	162
Una morale per il bene dell'individuo	163
Una morale per il bene della specie	164
L'egoismo, pardon, l'amor proprio	165
La morale altruistica finalizzata al bene dei propri cari ...	167
... che, opportunamente adattata, poteva essere finalizzata al bene di altri	168
I nuovi strumenti che permettono questo adattamento della morale	169
L'obbedienza	171
La morale della vita e la morale dell'uomo	174

La nostra morale	177
<b>E Dio? E la religione?</b>	<b>178</b>
L'origine dello spiritualismo	178
A che pro?	180
La ritualità	182
La spiritualità	184

## LA VITA

Il primo atto di un libro che ha come titolo "Il lungo viaggio della vita" ovviamente deve essere la definizione del termine "vita". Cosa è la vita? Questo sostantivo, come del resto il sostantivo bellezza, è una parola astratta che riassume in sé qualità e modi di essere della materia. Mentre le caratteristiche che definiscono la bellezza sono soggettive, quelle che definiscono la vita sono oggettive. E' viva ogni cosa che è in grado di auto-costruirsi, mantenere funzionante la propria struttura, replicarsi.

La capacità di distinguere un essere vivente da uno non vivente, cioè la capacità di riconoscere il fenomeno "vita", è presente in tutti noi. Questa conoscenza è basata sulle caratteristiche che abbiamo appena citato e che sono facilmente percepite dai sensi: gli strumenti che l'uomo ha a disposizione per conoscere il mondo che lo circonda. Se è facile identificare un organismo vivente non è altrettanto facile capire i meccanismi e le leggi che sono alla base del suo funzionamento. Per capire come funziona una macchina è necessario percepire gli elementi che la costituiscono e le sequenze di causa ed effetto che ne permettono il funzionamento. Ad esempio, pensate ad un mulino a vento, una delle macchine più semplici inventate dall'uomo. Il vento muove i bracci che provocano la rotazione dell'asse a cui sono fissati. Ad una estremità dell'asse c'è un ingranaggio che trasferisce la rotazione ad un'asta disposta perpendicolarmente. A sua volta questa asta fa girare la ruota a pale che solleva l'acqua ad un livello più alto. In questo caso, i sensi ci permettono di vedere i pezzi che costituiscono il mulino e di individuare le sequenze di causa ed effetto che ne permettono il funzionamento. Nel caso della vita, però, la cosa non è così semplice. Purtroppo i pezzi che costituiscono una macchina vivente sono talmente piccoli che non si riescono a vedere neanche utilizzando i microscopi più potenti. Per avere un'idea della grande differenza di dimensioni fra un essere vivente e le parti elementari che lo compongono possiamo utilizzare una similitudine: se un uomo avesse le dimensioni della terra, gli elementi semplici che lo formano avrebbero le dimensioni di qualche centimetro. In altre parole, se un uomo fosse paragonabile ad una macchina enorme come la terra i suoi pezzi elementari avrebbero dimensioni paragonabili a quelle di bulloni, dadi, viti ecc. Questo ci fa capire perché, per migliaia di anni, la vita non sia stata considerata un fenomeno fisico: gli elementi che la costituiscono e le leggi che la governano non sono percepibili con i sensi. La impenetrabilità ed imperscrutabilità della vita ha fatto a lungo

ritenere che essa fosse governata da una forza metafisica, misteriosa e divina, la cosiddetta forza vitale.

L'invenzione di strumenti e tecnologie di analisi sempre più sensibili ha permesso dapprima di sollevare e poi di squarciare il velo che nascondeva la natura fisica, cioè osservabile, della vita. Grazie allo studio della struttura microscopica e molecolare della materia vivente è stato possibile arrivare al cuore della vita stessa e dimostrare che essa è una organizzazione, pur estremamente complessa, di materia non vivente che obbedisce alle leggi della fisica e della chimica. Le ricerche condotte hanno portato anche alla individuazione dei meccanismi che hanno dato origine alla vita e al riconoscimento che tale processo non è che una tappa, forse la più strabiliante, fra le tante tappe dell'evoluzione fisico-chimica dell'universo.

La natura della vita non è quindi più un mistero. Purtroppo, però, la sua complessità è tale che per comprenderla sono richieste un enorme numero di conoscenze. E' esperienza comune che tanto più è complessa una macchina tante più sono le conoscenze necessarie per capirne il funzionamento: elementari conoscenze di meccanica sono sufficienti per capire come funziona una bicicletta; già la comprensione di una semplice macchina a vapore richiede conoscenze di fisica dei fluidi e dei gas; il funzionamento di una automobile è poi comprensibile solo se si hanno anche conoscenze di elettricità e magnetismo. La comprensione di un fenomeno tanto complesso come la vita richiede un numero enorme di conoscenze. Discipline come la fisica, la chimica, la biochimica, l'enzimologia, la biologia molecolare, l'istologia, la fisiologia, l'anatomia, la genetica, la psicologia, l'etologia ecc insieme contribuiscono a spiegare il fenomeno vita, fornendo ciascuna una parziale ma specifica porzione del sapere. Purtroppo la necessità di una cultura scientifica quasi enciclopedica fa sì che la conoscenza della natura della vita sia, in pratica, appannaggio solo degli addetti ai lavori.

Queste considerazioni, insieme alla tendenza umana a fare proseliti, cioè a condividere con gli altri quelle che a noi sembrano gioie, mi ha spinto a scrivere questo libro. Il suo fine è fornire a persone di cultura media le conoscenze per capire la vita e per collocarla nella sua giusta posizione nell'ambito dell'evoluzione dell'universo. La strategia seguita per raggiungere l'obiettivo consiste nel superare il problema posto dalla vastità della materia limitando l'esposizione a poche pietre miliari che segnano il percorso seguito dalla vita nella sua organizzazione ed evoluzione. Il libro è quindi una sorta di antologia, un ikebana scientifico in cui diversi argomenti, come appunto fiori,

cooperano alla formazione del bouquet della comprensione; e come in un bouquet anche nel libro troverete fiori semplici come una primula e fiori più complessi come una infiorescenza di orchidea o una peonia. Me ne scuso ma così è la vita!

Per cercare di rendere semplici e chiari anche gli argomenti complessi è stato utilizzato un linguaggio non accademico, più simile al linguaggio parlato che a quello scritto, che si avvale anche di esempi e paragoni tratti dalla vita di ogni giorno. Questo modo di raccontare non ha solo lo scopo di facilitare la comprensione, ma anche quello di fornire a genitori o insegnanti gli strumenti da utilizzare per esporre, a loro volta, la materia ai bambini ed ai ragazzi.

## DAL BIG BANG ALLA VITA

### ***L'evoluzione fisica dell'universo***

#### *L'evoluzione fisica ha prodotto le diverse forme di energia*

Tutto quello che ci circonda non è sempre esistito. All'inizio non c'era proprio nulla, o quasi, di quello che conosciamo: non solo non c'erano gli alberi e gli animali ma neppure la terra, o il sole, o le galassie. Non esisteva né il tempo né lo spazio. L'universo era solo energia, e questa enorme quantità di energia era concentrata in un punto di dimensioni zero poiché lo spazio non esisteva ancora! Non si può dire per quanto tempo l'universo sia esistito in questa forma poiché allora il tempo non esisteva. Così questa energia, che era tutto ciò che c'era, esisteva senza però occupare spazio e protrarsi nel tempo. Essa era totalmente uniforme, come una specie di puntiforme occhio del ciclone in cui, in una calma totale, sono racchiuse enormi energie. Ma improvvisamente, circa quindici miliardi di anni fa, l'energia cominciò ad espandersi. Al presente non si sa assolutamente come e perché questo sia avvenuto. Si pensa che l'improvvisa e casuale comparsa di una disomogeneità abbia precipitato l'universo, dal suo limbo di eterna pace e serenità, nel caos. Probabilmente una unità di energia, all'interno del tutto, rubò energia ad una unità vicina. Questo misterioso peccato originale, che incrinò la perfezione dell'energia primordiale, è stato chiamato dagli scienziati Big Bang, grande esplosione. Non abbiamo idea di come fosse l'universo nei suoi primi istanti di vita. Forse era caldo e densissimo, di sicuro l'energia vi esisteva in una forma a noi ignota. In una infinitesima frazione di secondo questa energia subì delle transizioni di fase. Il termine transizione di fase descrive il fenomeno per cui la materia passa da uno stato di aggregazione ad un altro, come per esempio l'acqua che passa dallo stato gassoso di vapore acqueo a quello liquido di acqua e quello solido di ghiaccio. Malgrado il vapore acqueo, l'acqua liquida ed il ghiaccio abbiano la stessa composizione il diverso stato in cui si trovano conferisce loro proprietà diverse.

Più o meno lo stesso successe all'energia primordiale. Man mano l'universo si espandeva la sua temperatura si "diluiva" favorendo la comparsa, in successione, di diversi aggregati di energia. I primi a comparire furono dei quanti/ particelle dette gravitoni poiché in esse l'energia si esprime sotto forma di forza gravitazionale. Successivamente, dall'energia indifferenziata residua si

formarono altre particelle, dette gluoni, che hanno associata a sé la forza nucleare forte. Fu poi la volta di particelle, dette fotoni, che sono responsabili della forza elettromagnetica. Infine si formarono le particelle, dette bosoni, che sono associate alla forza nucleare debole. Si originarono, così, i quattro tipi di forze fondamentali del nostro universo (gravitazionale, elettromagnetica, nucleare forte e debole) che non sono altro che i prodotti di quattro diversi modi in cui l'energia primordiale si è aggregata.

Queste prime transizioni di fase sono paragonabili alla condensazione del vapore acqueo in acqua: in esse l'energia primordiale, indifferenziata ed invisibile come il vapore acqueo, assunse una struttura percepibile anche se dotata di alcuni aspetti di indeterminazione; come l'acqua, del resto, che non ha una forma propria e cambia di forma a seconda dei contenitori. La transizione di fase successiva coinvolse l'energia rimasta ancora indifferenziata.

L'energia si condensò formando particelle solide di materia, solide come il ghiaccio. Le condizioni ambientali dell'universo erano infatti cambiate: l'espansione dell'universo aveva prodotto un forte abbassamento della temperatura. A questo punto l'aggregazione dell'energia avvenne con una transizione simile a quella che subisce il vapore acqueo espirato in una giornata particolarmente rigida, con il termometro che indica una temperatura inferiore a zero. Nelle particelle di energia che si formarono in seguito a questa nuova transizione, l'energia assunse la caratteristica che noi, oggi, definiamo con il nome di massa: l'energia divenne materia. Le particelle più semplici provviste di massa sono dette quark. A dire il vero di quark ne esistono di tanti tipi: leggeri, medi, pesanti. Essi, sono multipli sempre più complessi dei quark più semplici ed inglobano nelle loro strutture anche quanti delle forze fondamentali.

### *La materia si organizza ... in grande*

Compiuta in pochi istanti la trasformazione dell'energia primordiale in energia differenziata e materia, l'universo continuò ad espandersi e la sua temperatura ad abbassarsi. Il raffreddamento dell'universo ebbe un importante effetto sulle particelle semplici di energia e di materia che si erano formate. Fino a quel momento avevano avuto abbastanza energia a disposizione per muoversi in tutte le direzioni sfuggendosi reciprocamente, da ora cominciarono a raggrupparsi insieme. I gluoni, cioè i quanti della forza nucleare forte, riuscirono ad incollare i quark vincendo la loro reciproca repulsione (il termine gluone deriva dalla parola inglese glue che significa colla).

Dalla varia combinazione dei quark ebbero origine i neutroni ed i protoni. L'universo si riempì di così di queste nuove particelle complesse che sostituirono le particelle di materia più semplici che fino ad allora avevano popolato l'universo.

Ma l'espansione dell'universo continuò e la temperatura si abbassò ulteriormente; in breve, si fa per dire, i neutroni ed i protoni non ebbero più energia sufficiente per contrastare la potentissima forza nucleare forte. Ancora una volta, le forze di attrazione prevalsero sulle forze di repulsione ed i neutroni ed i protoni cominciarono a combinarsi insieme ed a produrre particelle sempre più grosse e complesse: i nuclei atomici. A questo punto della storia dell'universo la materia in esso contenuta era costituita dai nuclei.

L'universo continuò ad espandersi e la sua temperatura ad abbassarsi. Circa un milione di anni dopo il Big Bang la temperatura si era abbassata tanto che anche la forza elettromagnetica cominciò a far sentire il proprio effetto. Gli elettroni, che fino ad allora si erano mossi liberamente nell'universo, vennero catturati dai nuclei. Da questo processo ebbero origine gli atomi e ben presto l'universo ne fu pieno.

#### Atomo

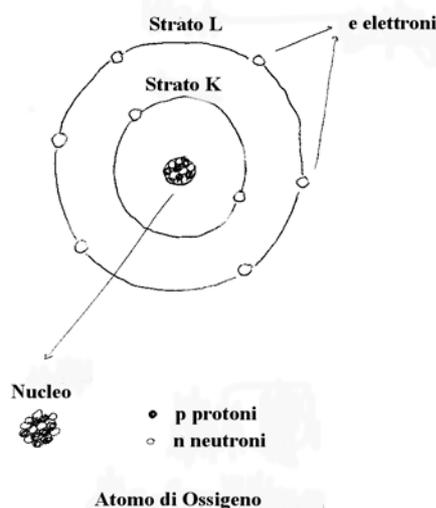
La parola atomo deriva dal greco e significa indivisibile. Fino agli inizi del 1900 si riteneva che esso fosse la più piccola particella costitutiva della materia. Si è scoperto poi che l'atomo è invece una complessa struttura formata da protoni, neutroni ed elettroni. Nell'atomo si distinguono due parti: il nucleo che è la parte centrale dell'atomo ed è formata dai neutroni e dai protoni incollati insieme dai gluoni, e gli elettroni che occupano la periferia.

Si conoscono un centinaio di tipi di atomi che si differenziano per il numero di protoni che hanno nel nucleo. Ad esempio l'idrogeno ha un solo protone, l'elio due, il litio tre, il berillio quattro...il carbonio sei.. l'ossigeno otto...l'uranio novantadue...il plutonio novantaquattro.. E' il numero di protoni (numero atomico) ciò che caratterizza ed individua ciascun elemento. Il nucleo di ogni elemento, oltre ai protoni contiene anche dei neutroni che contribuiscono alla costituzione della massa del nucleo; per questo il numero totale di neutroni e protoni di un nucleo si dice numero di massa. Si conoscono atomi che hanno un uguale numero atomico, e quindi appartengono allo stesso elemento, ma hanno un numero diverso di neutroni. Ad esempio l'idrogeno, il deuterio ed il trizio hanno tutti un solo protone ma hanno, rispettivamente, zero, uno, due neutroni. Questi atomi hanno numero di massa uno, due e tre e sono fra loro isotopi (dal greco stesso tipo).

Le altre particelle che partecipano alla costituzione degli atomi sono gli elettroni. Essi sono sempre in numero uguale al numero di protoni. Quindi l'idrogeno, il deuterio ed il trizio hanno un solo elettrone, l'ossigeno ne ha otto...l'uranio novantadue.. ecc.

L'organizzazione nello spazio del nucleo e degli elettroni è stata rappresentata, nel corso degli anni, da diversi modelli che man mano tenevano conto delle nuove scoperte. Il modello che verrà qui descritto è quello formulato dal fisico danese Bohr. Questo modello è sorpassato poiché si è dimostrato alquanto semplicistico ma, dato che oltre ad essere semplicistico è anche semplice, si adatta ai nostri fini. Secondo questo modello l'organizzazione nello spazio delle particelle dell'atomo è simile a quella del sistema solare: al centro, al posto del sole, c'è il nucleo e alla periferia, al posto dei pianeti, ci sono gli elettroni. Gli elettroni alla periferia si trovano su orbite, dette stati o strati stazionari, che man mano si allontanano dal nucleo divengono sempre più grandi e possono accomodare un numero sempre maggiore di elettroni. Questi strati successivi di elettroni sono denominati, partendo da quello più interno, con le lettere K, L, M, N, O, P, Q e sono caratterizzati da una quantità crescente di energia. Lo strato K può contenere solo due elettroni, lo strato L ne può contenere 8. In generale gli elettroni si collocano preferenzialmente negli orbitali più bassi e, quando questi sono pieni, utilizzano quelli più esterni. Ad esempio, l'idrogeno ha il suo unico elettrone sull'orbitale K; il carbonio ha due elettroni sull'orbitale K e gli altri quattro sull'orbitale L; il magnesio ha due elettroni sul K, otto sull'L e i restanti due sull'orbitale M.

Figura 1: Struttura dell'atomo



Questo universo, con le quattro forze fondamentali e gli atomi, è il nostro universo anche se ancora neonato; l'evoluzione che lo ha successivamente reso adulto, cioè come noi lo conosciamo è, nel vero senso della parola, sotto gli occhi di tutti. A causa dell'enorme dimensione dell'universo e della relativamente modesta velocità della luce, ci giungono solo ora, dalle profondità dell'universo, le immagini di quello che successe miliardi di anni fa; in diretta vediamo un film girato quando la terra e forse anche il sole non esistevano.

La trama di questo film racconta che la successiva espansione dell'universo determinò un ulteriore abbassamento della temperatura. A questo punto, anche la forza attrattiva più debole cominciò a far sentire la propria azione: i gravitoni cominciarono ad attrarre gli atomi organizzandoli in masse di materia fortemente localizzata, più densa della densità media dell'universo. Poiché la quantità di gravitoni è direttamente proporzionale alla quantità di materia, queste zone dense divennero un centro di attrazione che risucchiò gli atomi dalle zone circostanti e tanta più materia si aggregava tanto maggiore diveniva la forza di attrazione. In questo modo la materia si distribuì nell'universo in modo diseguale: si formarono così le galassie ed il vasto vuoto. Man mano che ciascuna galassia si andava organizzando nella sua struttura a spirale, al suo interno la materia che la componeva si frammentava in migliaia di ammassi che avrebbero dato origine alle stelle.

Anche la storia delle stelle ci è raccontata nel film che è trasmesso dalle profondità dell'universo. La contrazione di ogni ammasso, diminuendo le dimensioni della materia, causò una accelerazione della velocità di rotazione e la nube di materia si appiattì a formare una specie di disco. Questo disco, che somigliava in piccolo ad una galassia, aveva la maggior parte della materia addensata al centro in un cosiddetto proto-sole. Continuando l'addensamento, e quindi la compressione della materia sulla materia, si svilupparono grandi quantità di calore. Quando la parte centrale della stella raggiunse temperature dell'ordine di decine di milioni di gradi, si innescarono delle reazioni nucleari: i nuclei degli atomi leggeri si fusero trasformandosi in atomi sempre più pesanti. In questo modo si sono formati tutti i tipi di atomi noti fra cui gli atomi di carbonio, azoto, ossigeno, fosforo tanto importanti per lo sviluppo della vita. La fusione nucleare portò anche alla liberazione di una enorme quantità di energia e le stelle, il nostro Sole compreso, cominciarono a brillare.

Trasmutazioni: fissione e fusione

Gli atomi dei diversi elementi sono strutture complesse formate da un diverso numero di protoni, neutroni ed elettroni. Poiché i diversi atomi sono formati dalle stesse particelle è intuitivo che se fosse possibile agire sui nuclei togliendo o aggiungendo protoni, sarebbe possibile trasformare un elemento in un altro. Non solo si potrebbero creare nuclei semplici scindendone dei complessi ma si potrebbero anche creare nuclei complessi fondendo nuclei semplici. Questo processo di trasformazione degli atomi di un elemento negli atomi di un altro elemento si chiama trasmutazione.

La rottura di un nucleo atomico complesso per creare due nuclei più semplici si chiama fissione nucleare ed avviene liberando grandi quantità di energia. Sfruttando il principio della fissione nucleare sono stati costruiti i reattori nucleari e la bomba atomica in cui nuclei di elementi pesanti (ad esempio l'uranio) vengono scissi in due o più parti con

liberazione di energia. Da quanto detto sembrerebbe possibile realizzare l'antico sogno degli alchimisti di trasformare il piombo in oro. Teoricamente infatti, spaccando il nucleo del piombo, che contiene 82 protoni si potrebbe ottenere quello dell'oro che ne ha solo 79. Questa reazione però non avviene perché il nucleo del piombo ha una struttura molto stabile.

La formazione di un nucleo atomico complesso a partire da due nuclei più semplici si chiama fusione nucleare. Essa, per poter avvenire, richiede enormi energie che inneschino la reazione. Nella bomba H, in cui avviene una reazione di fusione nucleare, l'energia di innesco è fornita da una precedente reazione di fissione nucleare che funge da detonatore. Durante le reazioni di fusione nucleare una parte della materia si ritrasforma in energia, con un processo opposto a quello che si è verificato durante il Big Bang. La quantità di energia liberata è data dalla relazione scoperta da Einstein

$$E = mc^2$$

in cui E è l'energia che si libera; m è la massa della materia che si consuma e c è la velocità della luce (circa 300.000 Km/sec). E' facile intuire come la quantità di energia ottenibile sia enorme.

All'inizio anche le parti più esterne del disco di materiale stellare che aveva al centro il proto-sole erano molto calde. Man mano che si raffreddarono, i gas formati dai vari tipi di atomi si condensarono in vari minerali e composti solidi che, agglomerandosi fra loro, formarono i planetesimali. I più grandi fra questi, attraendo per gravità i più piccoli, si accrebbero in dimensione e formarono i pianeti. Questo tipo di modello di formazione del sistema solare spiega la diversa composizione in minerali dei diversi pianeti. Infatti nei pianeti più prossimi al sole la vicinanza manteneva una temperatura molto elevata per cui solo i minerali più pesanti, che ad alte temperature sono solidi, riuscirono ad aggregare mentre quelli che ad alte temperature sono gassosi e leggeri vennero dispersi per radiazione nello spazio sotto forma di gas. Per questo Mercurio, il pianeta più vicino al sole è il più denso essendo formato da metalli pesanti come il ferro. La sua formazione avvenne a temperature così elevate che solo il ferro poté condensare. Nelle zone più lontane dal sole e relativamente fredde riuscirono a condensare composti più leggeri come l'ossigeno, il magnesio, il silicio. Le rocce di Venere, di Marte e della Terra sono infatti particolarmente ricche di questi elementi. Nelle zone più periferiche del sistema solare sfuggirono gli elementi volatili liberati dagli altri pianeti (acqua, metano, ammoniaca) e qui si condensarono sotto forma di ghiacci a formare i satelliti dei pianeti giganti.

*... ed anche in piccolo.*

La materia incandescente di cui erano formati i pianeti subì un lento processo di raffreddamento. Infatti l'energia che i pianeti ricevevano dal Sole non era sufficiente a mantenerli in "ebollizione"

ed essi non erano in grado, da soli, di innescare le reazioni nucleari che producono calore. Sulla superficie della Terra cominciò a formarsi una crosta solida che isolò sempre più l'atmosfera esterna dalla zona interna incandescente. Il vapore acqueo, che insieme ad altri gas sfuggiva dal magma, incontrò una atmosfera sempre più fredda e cominciò a condensarsi in nuvole che riversarono violentissime piogge sulla terra. Lentamente tutta la superficie si solidificò e si materializzò un paesaggio non proprio bucolico fatto di aspre montagne, fiumi impetuosi, mari profondi e una atmosfera turbolenta.

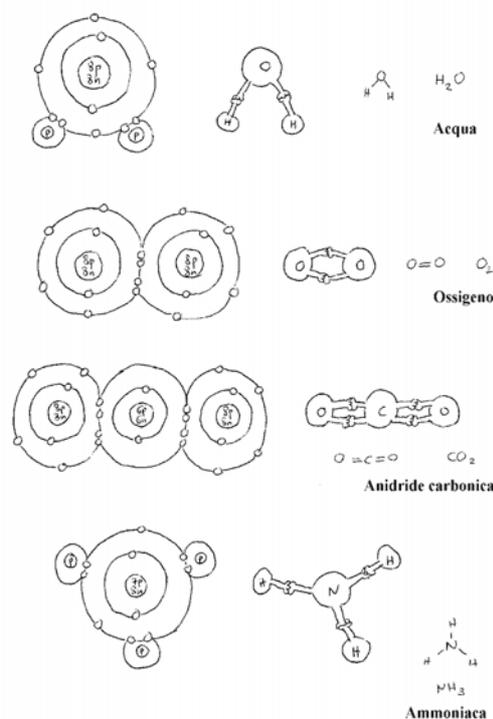
La primitiva atmosfera era formata da vari gas sfuggiti dall'interno della terra e comprendeva molecole di idrogeno, di ammoniaca, di metano, di anidride carbonica, di ossido di carbonio, di azoto, si acqua.

#### Molecole

Col termine molecola si definisce la più piccola unità chimica di un elemento o di un composto capace di esistenza indipendente. Le molecole possono essere costituite da un solo atomo (monoatomiche) o da più atomi (poliatomiche). Le molecole degli elementi chimici sono in genere mono- o biatomiche ed inoltre sono sempre formate da atomi dello stesso elemento; ad esempio la molecola di elio è formata da un solo atomo di elio (He), la molecola di idrogeno ( $H_2$ ) è formata da due atomi di idrogeno e quella di ossigeno ( $O_2$ ) da due atomi di ossigeno. Le molecole dei composti chimici, invece, sono di solito poliatomiche e costituite da atomi di elementi diversi. Ad esempio l'acqua ( $H_2O$ ) è formata da due atomi di idrogeno ed uno di ossigeno mentre la molecola di anidride carbonica ( $CO_2$ ) è formata da un atomo di carbonio e due di ossigeno.

Il motivo per cui i diversi atomi formano molecole mono- o poliatomiche dipende dalla loro struttura. Come abbiamo visto gli atomi sono formati da un nucleo e da elettroni collocati su diversi strati. A seconda del numero di elettroni che possiedono, i diversi atomi possono riempire completamente o solo parzialmente i loro strati esterni. Gli atomi con un numero di elettroni che riempie l'ultimo strato sono stabili, non reagiscono mai con altri atomi e formano molecole monoatomiche. Appartengono a questa categoria i cosiddetti gas nobili, ad esempio l'elio, che ha 2 elettroni e perciò riempie lo strato K (capacità 2 elettroni) ed il neon, che ha 10 elettroni e riempie sia lo strato K che quello L (capacità 8 elettroni). Al contrario, gli atomi che non riescono completamente a riempire lo strato esterno sono instabili e, per raggiungere la struttura stabile, cioè quella con gli strati esterni pieni, interagiscono con altri atomi. Il numero di elettroni che mancano loro per raggiungere la stabilità si chiama numero di valenza. Intuitivamente ogni valenza può essere immaginata come una mano pronta ad afferrare quella di un altro atomo. L'atomo di idrogeno, che manca di un elettrone per essere stabile, ha una valenza-mano con la quale si unisce alla valenza-mano di un altro atomo di idrogeno formando la molecola di idrogeno  $H_2$ . Come ulteriore esemplificazione consideriamo la molecola dell'acqua ( $H_2O$ ): in questa molecola le valenze-mano di due idrogeni si uniscono alle due valenze-mano di un ossigeno (che ha solo sei elettroni nello strato L ed ha bisogno di altri due elettroni per riempirlo).

Figura 2: Alcune molecole



Si formano così i legami chimici. Un legame chimico, come ogni altro tipo di legame, contiene energia. Per avere una idea di quanta energia ci sia in un legame si considera quanta fatica si fa a romperlo! È facile staccare due bambini che si danno la mano; più difficile è rompere la stretta di mano di due adulti robusti! Anche nel caso dei legami chimici l'energia/forza del legame dipende dal tipo di atomi contraenti. Il legame fra un carbonio ed un idrogeno, ad esempio, è più forte di quello fra un carbonio ed un ossigeno. Perciò le molecole che hanno molti legami C-H contengono più energia (misurata in calorie) delle molecole che contengono legami C-O. Per questo motivo il metano  $CH_4$ , il metanolo  $CH_3OH$ , la formaldeide  $CH_2O$ , l'acido formico  $CH_2O_2$ , l'anidride carbonica  $CO_2$ , hanno un contenuto decrescente di energia. Questa è la ragione per cui bruciamo il metano per ottenere calore e non l'anidride carbonica! Per lo stesso motivo i grassi, ricchissimi di legami C-H, contengono circa 9.000 kcalorie al Kg mentre gli zuccheri, in cui c'è parecchio ossigeno, contengono "solo" circa 4.000 kcalorie al Kg. L'energia contenuta in ogni molecola dipende quindi da quanti atomi e da che tipi di legami ci sono nella sua struttura.

L'acqua, formando un gas meno volatile delle altre molecole presenti nell'atmosfera, condensò in pioggia e formò i primitivi oceani dove si è svolta la fase chimica del processo evolutivo che ha portato alla vita.

I fulmini dei temporali, la luce ultravioletta proveniente dalle intense radiazioni solari che penetrava attraverso la sottile atmosfera, l'alternanza ciclica di notti fredde e di giorni torridi fornirono le forze che agendo sulle molecole inorganiche presenti nell'atmosfera generarono le molecole organiche. E' stato dimostrato in laboratorio che queste forti energie sono in grado di rompere i legami chimici di molecole semplici come quelle presenti nella primitiva atmosfera. Le molecole allora divengono reattive e si possono unire ad altre molecole generando nuovi composti. In questo modo, probabilmente, si produssero le molecole organiche che costituiscono i mattoni fondamentali per la costruzione di un organismo vivente. Tali piccole molecole (purine, pirimidine, amminoacidi, zuccheri, acidi grassi) caddero con la pioggia nei primitivi oceani e qui si assemblarono in molecole di dimensioni sempre maggiori grazie a reazioni di condensazione favorite da agenti fisici come il calore o chimici come certi minerali. I mari divennero, per la presenza di questi composti organici sempre più complessi, un gigantesco brodo pre-biotico (prima che comparisse la vita).

E' quasi inconcepibile che la vita abbia fatto i primi passi del suo lungo cammino in quelle primordiali atmosfere sature di gas velenosi, squassate da tremendi fulmini, bersagliate dai terribili raggi cosmici a temperature elevatissime!

Questa ipotesi di sintesi pre-biotica di composti organici è rafforzata dai dati ottenuti dall'analisi chimica compiuta su meteoriti cadute sulla terra provenendo da altre parti del sistema solare. Anche in esse sono state trovate le stesse molecole organiche che consideriamo i mattoni fondamentali per la costruzione della vita. Secondo i soliti estero-fili per i quali "l'erba del vicino è sempre la più verde" questa sarebbe la prova che i mattoni della vita e la vita stessa sono nati altrove e da lì sono arrivati a colonizzare la terra. Per chi non soffre di complessi di inferiorità questa è invece la conferma che anche in altri luoghi del sistema solare l'evoluzione dell'universo ha prodotto non solo gli stessi composti chimici semplici (ossido di ferro, carbonato di calcio ecc..) ma anche le stesse semplici molecole inorganiche ed organiche (anidride carbonica, acqua, amminoacidi, zuccheri ecc..). Se sulla Terra oggi c'è la vita e su Marte no questo è probabilmente legato al fatto che sul nostro pianeta le condizioni ambientali hanno permesso alla vita non solo di fare il primo passo ma anche i successivi. Su Marte, invece, la mancanza di qualcosa ha impedito di procedere ulteriormente nel processo evolutivo.

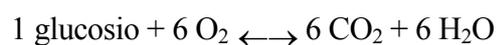
Ma che cosa è mancato sugli altri pianeti? Probabilmente ciò che sulla terra ha permesso il passaggio dalla chimica alla biochimica.

### ***Sulla terra comincia l'evoluzione chimica***

#### ***Come funziona la chimica: quali reazioni avvengono e quanto tempo impiegano ad avvenire***

Per capire come dalla chimica si è potuta evolvere la vita è necessario brevemente analizzare quali sono le principali caratteristiche delle reazioni chimiche. Le reazioni chimiche sono dei processi attraverso i quali una o più sostanze, dette reagenti, si trasformano in sostanze diverse, dette prodotti. La probabilità che si verifichi una reazione è legata a due sue caratteristiche: la termodinamica e la cinetica. Dalla termodinamica dipende se la reazione avverrà; dalla cinetica dipende quanto tempo impiegherà ad avvenire.

Analizziamo, dapprima, l'aspetto termodinamico delle reazioni facendo un esempio concreto. Consideriamo la reazione in cui una molecola di glucosio reagisce con sei molecole di ossigeno per produrre sei molecole di acqua e di anidride carbonica. E' teoricamente possibile anche la reazione opposta, cioè che l'anidride carbonica reagisca con l'acqua per dare glucosio e ossigeno. Quale delle due reazioni ha più probabilità di avvenire, quella che distrugge il glucosio o quella che lo sintetizza?



Per dare risposta a questa domanda, cioè per predire in quale direzione avviene la reazione (se da sinistra a destra o da destra a sinistra) ci si avvale della seconda legge della termodinamica, secondo la quale avvengono spontaneamente solo le reazioni in cui molecole ricche di energia si trasformano in molecole povere di energia. Per potere applicare questa legge al nostro esempio dobbiamo confrontare fra loro le energie contenute nelle molecole che partecipano alla trasformazione. L'energia totale del glucosio e dell'ossigeno è data dalle calorie contenute in ogni singola molecola moltiplicate per il numero delle molecole coinvolte nella reazione (è evidente infatti che le calorie contenute in un etto o in un chilo di glucosio sono diverse). Allo stesso modo

l'energia totale dell'anidride carbonica e dell'acqua è data dalle calorie contenute in ogni singola molecola moltiplicate per il loro numero. Quando si confrontano le calorie totali contenute nel glucosio e nell'ossigeno si vede che esse sono molto maggiori di quelle contenute nell'anidride carbonica e nell'acqua. In base alla seconda legge della termodinamica, secondo la quale avvengono spontaneamente solo le reazioni in cui molecole ricche di energia si trasformano in molecole povere di energia, fra le due reazioni possibili, quella che si verifica è la combustione del glucosio da parte dell'ossigeno con produzione di anidride carbonica ed acqua. La reazione opposta non si può verificare spontaneamente. Ed in effetti non si è mai vista una bottiglia di acqua addizionata di anidride carbonica che abbia prodotto glucosio!

Anche per le reazioni chimiche vale, quindi, il principio fisico per cui sono spontanei solo i fenomeni in cui si ha liberazione di energia. Nel caso delle reazioni chimiche l'energia che si libera compare soprattutto sotto forma di calore: la combustione del glucosio infatti genera calore.

Tutto questo ha sorprendenti conseguenze sull'origine della vita. Infatti, se è vero che sono spontanee le reazioni in cui si rompono i legami o quelle in cui i legami ricchi di energia vengono trasformati in legami poveri di energia, è intuitivo che le reazioni sintetiche, in cui si formano nuovi legami o legami più ricchi di energia, non sono spontanee. Ma è grazie a queste reazioni che ha avuto origine e continua ad esistere la vita! In che modo si possono far avvenire le reazioni costruttive? La termodinamica dà la risposta: perché si verifichino le reazioni in cui le molecole di arrivo, i prodotti, hanno più energia delle molecole di partenza, i reagenti, è necessario che qualcuno o qualcosa fornisca l'energia mancante. L'esempio che abbiamo fatto chiarisce questo concetto: malgrado l'anidride carbonica e l'acqua non producano spontaneamente glucosio, questa reazione può avvenire nelle foglie delle piante che sono in grado di captare l'energia del sole e di utilizzarla per questa sintesi.

Per lungo tempo, nel corso dell'evoluzione, l'approvvigionamento di energia per le reazioni di sintesi non costituì un problema. Nell'atmosfera furono i fulmini ed i raggi ultravioletti a fornire l'energia per la sintesi delle sostanze organiche semplici, mentre negli oceani furono i vulcani subacquei che dettero l'energia necessaria per condensare le molecole semplici in molecole più complesse. Questa fase dell'evoluzione chimica, in cui prevalevano le reazioni costruttive, fu favorita dal fatto che le principali reazioni di degradazione non avvenivano facilmente. Nell'atmosfera primordiale, infatti, c'era talmente poco ossigeno che tutte le reazioni di ossidazione

(fra cui anche la degradazione del glucosio che abbiamo preso ad esempio) erano molto limitate. Se fossimo vissuti allora non avremmo avuto bisogno di mettere il prosciutto sottovuoto per impedire che l'ossigeno atmosferico lo irrancidisse!

Grazie alla termodinamica abbiamo una prima importante informazione su di una reazione: sappiamo se avverrà o no. Ma quando? Possiamo aspettarci che sia conclusa dopo dieci minuti o dobbiamo aspettare giorni, anni?

Per rispondere a questa domanda dobbiamo prendere in considerazione la seconda caratteristica di una reazione: la sua cinetica, cioè la sua velocità. Per definizione, la velocità di una reazione è il numero di prodotti che si formano in un minuto. Sperimentalmente è stato dimostrato che la velocità di una reazione dipende principalmente da tre fattori: la temperatura, la natura e la concentrazione dei reagenti. La ragione di questa dipendenza è spiegabile con la teoria delle collisioni secondo la quale i prodotti di una reazione si formano solo se i reagenti sbattono fra di loro con il giusto orientamento e con una sufficiente energia. Per capire questa teoria, facciamo finta che i reagenti siano due motorini e che il prodotto sia un'APE Car. Questa reazione è termodinamicamente spontanea poiché l'energia che tiene insieme i pezzi dei motorini è maggiore di quella che unisce i pezzi dell'APE Car. Malgrado sia spontanea, la reazione rischia di non avvenire se teniamo i motorini fermi in garage. Perché avvenga dobbiamo fornire ai veicoli sufficiente benzina da permettere loro di muoversi e collidere. Ma non tutte le collisioni danno il prodotto. Esso si forma solo se i veicoli sbattono col giusto orientamento e con sufficiente energia per fondere le lamiere. Se i veicoli hanno o una carrozzeria debole o manubri poco ingombranti e tali da non intralciare l'avvicinamento, le collisioni utili (che cioè danno il prodotto) sono abbastanza frequenti. Basta, quindi, poca benzina per trasformare i veicoli-reagenti in nuovi veicoli-prodotti. Ma se i veicoli-reagenti sono più complicati e più robusti serve più benzina per ottenere lo stesso risultato. Il numero di prodotti formati in uno stesso tempo, a parità di benzina fornita, è nei due casi molto diverso: maggiore nel primo rispetto al secondo. La velocità di formazione dei prodotti è perciò diversa e dipende dalle caratteristiche dei reattivi.

Nel caso di molecole con una struttura "semplice" e con i gruppi chimici ben esposti sulla superficie, i prodotti si formano nella maggior parte degli scontri. Al contrario, nel caso di molecole con struttura "complessa" e con gruppi poco accessibili, solo una piccola percentuale di scontri è coronata da successo. Per quantificare questo fenomeno è stata definita una grandezza che è propria

di ogni reazione: l'energia di attivazione che è l'energia (paragonabile alla benzina del nostro esempio) necessaria affinché metà dei reattivi si trasformino in prodotti. Da quanto detto si capisce che le molecole semplici richiedono poca energia per trasformarsi in prodotti: hanno una energia di attivazione bassa. La reazione di molecole complesse, al contrario, ha un'alta energia di attivazione. La teoria delle collisioni spiega anche perché la velocità delle reazioni dipende dalla concentrazione dei reagenti e dalla temperatura. E' intuitivo che aumentando il numero dei veicoli-reagenti aumenta il numero degli scontri e quindi le probabilità che si formino i nuovi veicoli-prodotti. E' altrettanto intuitivo che un aumento della temperatura, che funziona come un extra apporto di benzina, fa muovere di più i reagenti ed aumentare così il numero degli scontri e la formazione dei prodotti.

Anche le caratteristiche cinetiche delle reazioni hanno importanti conseguenze sulla vita. Infatti, una gran parte delle reazioni che sono necessarie per vivere coinvolgono molecole complesse ed hanno, perciò, un'alta energia di attivazione. Esse possono avvenire con una velocità "ragionevole" solo in presenza di alte temperature.

### *Arrivano i primi intoppi ma ... la chimica riesce a superarli*

Nella fase iniziale della evoluzione della vita, le condizioni sulla terra erano favorevoli alla veloce sintesi di molecole complesse. Nel brodo caldo degli oceani le molecole avevano a disposizione sia l'energia necessaria per formare nuovi legami fra atomi sia quella necessaria a muoversi e a collidere fra loro. Ma cosa sarebbe successo quando le condizioni favorevoli si fossero affievolite e infine fossero venute meno? La catastrofe! Le sintesi si sarebbero interrotte ed in particolare sarebbe rallentata la velocità delle reazioni fra molecole complesse, proprio quelle che erano lì lì per costruire la vita.

Gli ostacoli chimici sulla strada della vita, come abbiamo visto, sono essenzialmente due: quello termodinamico che impedisce il verificarsi delle reazioni sintetiche che assorbono energia; quello cinetico che rende lenta la velocità delle reazioni che avvengono fra molecole complesse. La soluzione del problema termodinamico, cioè fornire energia alle reazioni di sintesi, teoricamente non è difficile. Basta accoppiare ad ogni reazione che ha bisogno di energia, una reazione che gliela fornisca. Detto così sembra semplice ma, purtroppo, non lo è. Perché l'accoppiamento delle due reazioni abbia successo è necessario che esse avvengano nello stesso posto, alla stessa ora e non ci

sia l'interferenza di altre reazioni "ladre" che rubano l'energia liberata. Insomma, questo evento è più improbabile di un terno al lotto! La soluzione del problema cinetico è molto meno difficile. Infatti a ben considerare, la difficoltà principale è far avvicinare le molecole orientandole in modo che le parti che devono reagire possano farlo. Questo sarebbe più facile se i reagenti fossero molto concentrati.

Mentre avveniva la sintesi pre-biotica delle molecole, altri fenomeni si stavano verificando sulla terra alterandone la struttura macro e microscopica. Alcuni di questi fenomeni contribuirono al superamento degli ostacoli posti dalla chimica sulla via della vita.

#### I trasportatori di energia

In regioni ad attività vulcanica o nelle sorgenti calde sotto la superficie del mare, le alte temperature fornirono l'energia per far reagire fra loro dei fosfati inorganici. I fosfati, come l'anidride carbonica e l'acqua, hanno poca energia e da soli non avrebbero mai potuto unirsi per formare dei prodotti che ne sono ricchi. Grazie alle alte temperature essi reagirono fra di loro con la formazione di polifosfati. Queste molecole immagazzinano nei loro legami le grandi energie che sono state necessarie per sintetizzarle e le rendono disponibili quando i legami fra i fosfati si rompono: in questo modo si comportano come pile. Infatti, come le pile, i polifosfati permettono di conservare l'energia, di trasferirla lontano dai luoghi di produzione e di liberarla quando serve. Ciò permise alle reazioni accoppiate, cioè le reazioni di sintesi che utilizzano l'energia liberata da reazioni di scissione, di svincolarsi dai luoghi e dai tempi in cui l'energia era stata originariamente prodotta. Come nel nostro mondo l'introduzione delle pile ha permesso di fare cose che prima erano quasi impossibili (ascoltare la radio nel deserto o usare un trapano elettrico sull'Everest), così la comparsa dei polifosfati favorì il verificarsi e diffondersi delle reazioni accoppiate. La grande diffusione di queste reazioni fu una delle mosse vincenti che hanno permesso di procedere verso la costruzione della vita.

#### I catalizzatori, acceleratori di reazioni

Contemporaneamente, il vento e la pioggia frammentavano le rocce ed i detriti venivano trascinati in mare formando sui fondali marini enormi depositi di sedimenti. Alcuni di questi, le argille, sono costituiti da particelle particolarmente fini disposte a strati. Grazie alla loro struttura, esse hanno la capacità di adsorbire su di sé grandi quantità di molecole organiche, aumentandone localmente la

concentrazione. Concentrando ed avvicinando i reagenti, le argille sono in grado rendere veloci anche le reazioni che, altrimenti, sarebbero assai lente come quelle che avvengono fra molecole complesse o fra molecole presenti in basse concentrazioni. Questo fenomeno, cioè l'accelerazione della velocità di una reazione ad opera di agenti che avvicinano ed orientano i reagenti, è detto catalisi ed è la seconda mossa vincente che ha permesso il passaggio dalla chimica alla biochimica. Gli agenti che esercitano la catalisi sono detti catalizzatori. Per capire come funzionano riprendiamo l'esempio dei veicoli-reagenti e dei veicoli-prodotti. I catalizzatori sono paragonabili alle presse che usano gli auto demolitori per schiacciare le automobili. Immaginiamo di avere una pressa nella quale possono entrare i due motorini del nostro esempio precedente; qui entrati vengono accostati fianco a fianco dai movimenti della pressa che poi li comprime dando come prodotti l'APE Car ed una ruota spuria.. Tutte le volte che i due motorini entrano nella pressa si ha la formazione dei prodotti. E' evidente che per ottenere i veicoli-prodotti è necessaria molto meno benzina di quella che serviva a far schiantare fra di loro ad altissima velocità i motorini; è sufficiente quella che consente loro di entrare nella pressa. Il catalizzatore ha abbassata l'energia di attivazione (vi ricordo che è l'energia necessaria per trasformare in prodotto metà dei reattivi) e di conseguenza ha accelerato la velocità della reazione. Ma non solo! possiamo anche immaginare un modello avanzato di pressa, capace di sfruttare per la sintesi di un veicolo l'energia che si ottiene da una demolizione. Questa pressa ha due postazioni: in una entra il reattivo da demolire (ad esempio alcuni pneumatici che devono essere bruciati) e nell'altra i nostri due veicoli-reagenti. L'energia che si libera dalla prima reazione fornisce il calore per fondere le lamiere, nel caso che volessimo sintetizzare dei veicoli che hanno più energia dei veicoli-reagenti che li costituiscono. Perciò un catalizzatore non solo è in grado di accelerare la velocità delle reazioni ma anche di favorire le reazioni di sintesi facendo avvenire nello stesso posto e nello stesso istante le reazioni accoppiate!

Grazie a questi due "trucchi" chimici si poterono continuare a sintetizzare molecole anche quando le condizioni ambientali divennero meno favorevoli. Combinazioni di polifosfati, che fornivano energia, e di argille, che concentravano e avvicinavano i reagenti, furono in grado di fare avvenire reazioni di sintesi fra molecole complesse accelerandone la velocità anche in presenza di concentrazioni basse di reagenti e di temperature modeste. Le nuove molecole non si disperdevano nel mare ma rimanevano lì vicine, adsorbite all'argilla, e questo ne faceva aumentare la concentrazione che aumentava la velocità delle sintesi che aumentava la concentrazione.... In

questa orgia di chimica probabilmente tutto reagì con tutto, formando milioni di miliardi di combinazioni.

La maggior parte delle molecole sintetizzate si dimostrò, dal punto di vista evolutivo, di scarso interesse e la loro degradazione rigenerò il materiale di partenza rendendolo disponibile per altri tentativi. Alcune molecole, invece, si dimostrarono in grado di migliorare la performance dei primitivi aggregati molecolari che si erano formati nelle zone ricche di argilla. Questi sono i nucleotidi trifosfati, un modello molto migliorato di polifosfati, una pila di nuova generazione perchè ricaricabile!

#### Nucleosidi e nucleotidi

I nucleosidi sono dei composti chimici costituiti da due parti: una base azotata ed uno zucchero. La struttura di un nucleoside può essere rappresentata come l'unità strutturale di una scala. La base azotata è una molecola piatta che forma il gradino e ad un suo bordo sta attaccato lo zucchero, disposto ad angolo retto come fosse il montante della scala. Poiché "a catalogo" esistono due modelli di montanti (il ribosio ed il desossiribosio), due dimensioni dei gradini (la base purinica più larga della base pirimidinica), cinque varianti di forma dei gradini (la purina può essere Adenina o Guanina, la pirimidina Timina, Uracile, Citosina) dalla loro combinazione si possono ottenere parecchi tipi di nucleosidi. Se si attacca un fosfato alla parte superiore del montante della scala di un nucleoside si ottiene un composto chimico detto nucleotide. In presenza di energia a questo fosfato si può attaccare un secondo e poi un terzo fosfato per ottenere, riappettivamente, un nucleotide difosfato e trifosfato. Nei legami chimici fra il primo ed il secondo e fra il secondo ed il terzo fosfato è immagazzinata una grande quantità di energia (rappresentata dal segno ~) che si libera qualora questi legami vengano scissi. Negli organismi viventi il nucleotide più abbondante è l'adenosina trifosfato, comunemente detta ATP.

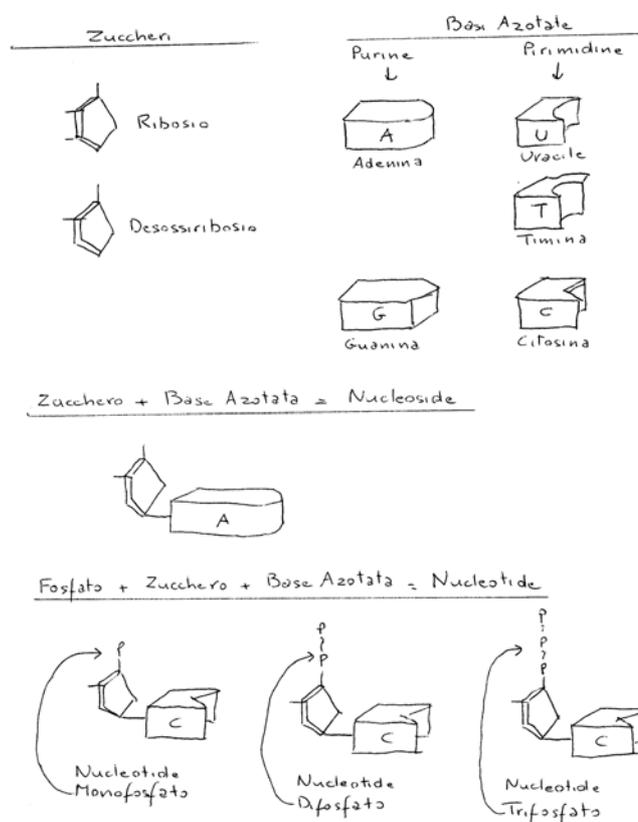


Figura 3: Struttura dei nucleotidi

I nucleotidi trifosfati, come i polifosfati, favoriscono le reazioni di sintesi poiché immagazzinano nei legami fra i loro fosfati grandi quantità di energia, la trasportano al punto in cui serve e la liberano nel momento in cui serve. I nucleotidi che, per liberare energia, hanno perso uno o due fosfati, in opportune condizioni sono in grado di legarli di nuovo a sé riformando il nucleotide trifosfato: la pila scarica si può ricaricare.

I captatori di energia solare

I sistemi di ricarica più semplici e più antichi consistettero nel rubare fosfati ad altre molecole ripristinando così, in una sorta di cannibalismo molecolare, la struttura del nucleotide trifosfato. Ma si svilupparono anche sistemi più innovativi, primi germi della terza mossa vincente per lo sviluppo della vita. Fra i milioni di miliardi di molecole formatesi dall'incessante reagire, comparvero

molecole capaci di captare, come se fossero delle antenne, l'energia del sole. L'energia fisica che esse avevano catturata poteva venire scaricata su altre molecole che si rompevano liberando l'energia chimica immagazzinata nei loro legami. Questa energia, a sua volta, poteva essere utilizzata per attaccare il fosfato inorganico ai nucleotidi mono e difosfati riformando così le pile cariche: i nucleotidi trifosfati.

A questo punto, l'evoluzione delle molecole verso la vita si cominciò ad emancipare dal calore come fonte di energia: non erano più necessari vulcani subacquei, era sufficiente qualche raggio di sole.

### ***Inizia l'evoluzione biochimica***

#### *Un tipo molto efficiente di catalizzatori, i ribozimi*

Ovviamente affiancare al calore una fonte di energia generosa ed inesauribile come quella fornita dal sole portò ad una enorme sintesi di nucleotidi trifosfati. A dire il vero, per la difficoltà di sintetizzare lo zucchero desossiribosio e la base azotata timina, a quei tempi erano presenti solo i quattro tipi di ribonucleotidi contenenti le basi adenina (A), guanina (G), uracile (U) e citosina (C). La grande disponibilità di questi ribonucleotidi trifosfati portò alla loro condensazione in polinucleotidi, dei polimeri detti anche acidi ribonucleici. Per indicarli si usa di solito l'acronimo del loro nome in inglese Ribo Nucleic Acids: RNA.

#### Polinucleotidi

I polinucleotidi sono lunghe catene di nucleotidi monofosfati. Nella reazione di sintesi del polinucleotide i reagenti sono i nucleotidi trifosfati che forniscono sia il monomero, il nucleotide monofosfato, sia l'energia necessaria alla formazione del legame fra monomeri. L'energia è quella che si libera quando dai trifosfati si staccano i due fosfati terminali. I nucleotidi monofosfati sono uniti fra di loro dal fosfato che fa da collante fra il montante del proprio gradino ed il montante del gradino successivo. Si forma così una struttura che ha l'aspetto di una scala a pioli con un solo asse portante costituito dal susseguirsi dei montanti incollati dai fosfati; dai montanti sporgono, verso il vuoto, i gradini. Come abbiamo detto parlando dei nucleotidi, i gradini hanno diverse dimensioni per cui il profilo dei pioli è molto accidentato. A questo disallineamento contribuisce la forma dei gradini che, come abbiamo detto è diversa. In particolare i gradini di tipo A e G hanno una forma complementare, rispettivamente, a quelli di tipo U e C. A differenza di una mezza scala a pioli che ha una struttura rigida, i polinucleotidi in soluzione sono molto flessibili poiché il loro asse portante è abbastanza snodabile. Questo permette loro di ripiegarsi su sé stessi in modo da avvicinare gradini

altrimenti distanti nella scala. Se i gradini che si avvicinano hanno forma complementare essi si incastrano formando un doppio gradino che mantiene unite zone distanti della catena. Le sequenze complementari sul polinucleotide, quindi, agiscono come zone appiccicose che fanno assumere al polinucleotide una struttura ripiegata in anse e cappi. Se due polinucleotidi hanno le sequenze di nucleotidi complementari, essi si possono incollare lungo tutta la loro lunghezza formando una struttura simile ad una scala a pioli completa. In essa i doppi gradini formati dalle basi complementari tengono uniti i due montanti.

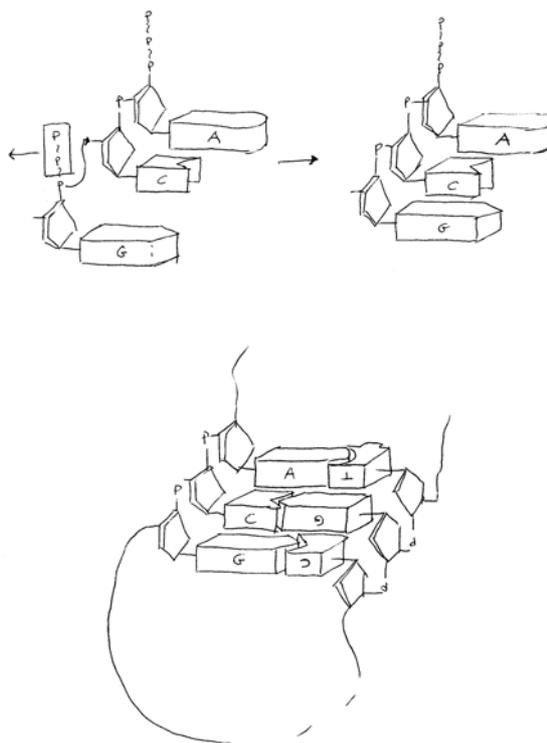


Figura 4: Polinucleotidi

#### RNA

Gli RNA (Ribo Nucleic Acid) sono una classe di polinucleotidi. I monomeri che li costituiscono sono ribonucleotidi monofosfati, cioè nucleotidi che hanno come zucchero il ribosio. Solo le basi adenina, guanina, uracile e citosina entrano nella loro composizione.

La grande disponibilità dei quattro tipi di ribonucleotidi trifosfati rese possibile la sintesi di un numero incalcolabile di RNA. Infatti il numero possibile di RNA diversi fra loro che si possono ottenere con quattro tipi di nucleotidi è  $4^n$ , in cui  $n$  è la lunghezza del polimero. In pratica sono

possibili 4 ( $4^1$ ) diversi RNA lunghi un nucleotide, 16 ( $4^2$ ) diversi RNA lunghi due nucleotidi... 1.048.576 ( $4^{10}$ ) diversi RNA lunghi 10 nucleotidi. Poiché probabilmente si formarono RNA lunghi anche centinaia di nucleotidi è evidente che il numero possibile di diversi tipi di polinucleotidi fu enorme. La maggior parte di questi RNA assemblati casualmente non aveva alcuna capacità funzionale e la loro degradazione rigenerò il materiale da costruzione per altri tentativi. Occasionalmente, alcuni di essi si dimostrarono, invece, in grado di accelerare qualche reazione, di agire cioè da catalizzatori. Le ripiegature formatesi nella loro struttura a nastro avevano generato una sorta di tasca nella quale potevano entrare alcuni tipi di molecole; qui le molecole venivano orientate e avvicinate dai movimenti del nastro stesso che ne accelerava, in questo modo, la reazione. La comparsa accidentale di questi RNA, detti ribozimi, capaci di comportarsi da catalizzatori fu l'EVENTO che permise il passaggio dalla chimica alla biochimica. Come i nucleotidi trifosfati erano stati le pile ricaricabili di nuova generazione così i ribozimi furono i catalizzatori di nuova generazione.

Ma cosa non andava nell'argilla? Il problema dell'argilla era che accelerava la reazione di tutto con tutto, purché fosse vicino: biciclette con monopattini, pennelli da barba con autoblindo ecc.. Questa mancanza di selettività, per lungo tempo, era stata estremamente utile perché aveva permesso di ottenere una enorme varietà di prodotti fra cui verificare quali fossero quelli più vantaggiosi per la nascita della vita. Ed erano stati trovati! Forse era giunto il momento di cambiare strategia: smettere di spendere la maggior parte delle risorse nella ricerca di nuove molecole ed indirizzarla verso la produzione di quelle che si erano dimostrate utili. Bisognava, insomma, passare dalla ideazione alla produzione. E l'argilla non era più il catalizzatore giusto. Era ormai assurda e fuori mercato come un fornitore di una industria meccanica in espansione che, invece di assicurare l'approvvigionamento di grandi quantità di viti e bulloni indispensabili alla produzione, consegna ogni giorno prodotti diversi e strampalati: oggi cappelli con binocolo incorporato, domani bicchieri di stoffa o magari seggiole con due gambe.

Cosa avevano di nuovo i ribozimi?

Prima di addentrarci in tecnicismi, concedetemi di fare alcune considerazioni per inquadrare il ruolo svolto dai ribozimi nell'evoluzione della vita, ruolo che è di tale importanza da aver fatto ritenere la loro comparsa come l'EVENTO che ha permesso il passaggio dalla chimica alla biochimica.

### *I ribozimi, le prime macchine biochimiche*

L'uomo è, evolutivamente parlando, una specie che ha avuto un grande successo: ha sconfitto le altre specie e ha preso il sopravvento su tutta la terra. La caratteristica vincente dell'uomo è la sua grande capacità di costruire strumenti, attrezzi, macchine. Dalla selce scheggiata, passando per aratri di legno e ciotole di terracotta, carri e telai, fucine e mulini ad acqua, macchine a vapore, a scoppio, elettriche, elettroniche ... le macchine hanno accompagnato la nostra vita e ne hanno pesantemente influenzato la qualità. In generale si può dire che il successo evolutivo dell'uomo ed il benessere di cui gode, sono in grande misura commisurabili alle macchine di cui dispone. Una selce scheggiata dà solo un piccolo vantaggio nella competizione con gli altri animali mentre gli strumenti che abbiamo oggi a disposizione ci hanno permesso di uccidere se non proprio ogni altra forma vivente, quasi! Anche avendo a disposizione una selce scheggiata la vita rimane meschina; al contrario, con le pompe e l'acqua corrente ed i sanitari, il bruciatore ed i termosifoni, l'aratro ed il cibo vario ed abbondante, le medicine e la sanità, l'automobile ed il telefono ecc.. gli aspetti materiali della vita sono molto migliorati! Questa prima divagazione dovrebbe avervi fatto capire che il successo evolutivo può essere dedotto dal numero, dalla varietà e dalla specializzazione delle macchine che si hanno a disposizione.

Ma cosa sono le macchine? sono strumenti che rendono più rapide delle operazioni. Ad esempio una automobile permette di viaggiare velocemente; un trapano di fare rapidamente un foro, una macchina da cucire di fissare in pochi secondi un orlo e così via. In pratica le macchine sono assimilabili ai catalizzatori. Questa seconda divagazione non ha tanto lo scopo di fare considerare le nostre macchine come dei catalizzatori ma piuttosto, invertendo il paragone, di far intendere i catalizzatori chimici come macchine.

Ora mettiamo insieme le due divagazioni. Se è vero che il successo evolutivo dell'uomo è esponenzialmente aumentato quando è esploso il numero, la varietà e la specializzazione delle sue macchine, allo stesso modo l'evoluzione della vita dovrebbe aver avuto un enorme sviluppo alla comparsa di numerose macchine chimiche varie e specializzate. Ed è qui che si inseriscono i ribozimi!

Mentre l'argilla è sempre argilla, con i quattro nucleotidi si poterono costruire, come abbiamo già detto, 4<sup>n</sup> polinucleotidi diversi fra di loro. Anche ammesso che solo una piccola percentuale di essi fosse in grado di catalizzare reazioni, il numero dei possibili catalizzatori era comunque enorme. I

diversi polinucleotidi si ripiegavano nello spazio in modo diverso formando perciò tasche molto eterogenee in forma e dimensione. Tale varietà consentiva la specializzazione che in biochimica si chiama specificità. Ogni tasca lasciava entrare certi substrati e non ad altri: ad esempio due biciclette e non un monopattino ed un motorino o due monopattini o... Questa caratteristica, per cui il catalizzatore sceglie i reagenti, è detta specificità di substrato. Ogni tasca, inoltre, era fatta in modo da consentire un solo tipo di posizionamento dei reagenti: ad esempio, alcuni ribozimi affiancavano le biciclette in modo tale da costruire un riscio (uno di quei buffi veicoli che sono tanto di moda fra i turisti di Rimini), altri le allineavano in modo da costruire un tandem. La caratteristica, per cui il catalizzatore determina il prodotto, è detta specificità di reazione. Queste due caratteristiche, insieme, conferivano a ciascun ribozima la peculiarità di fare prodotti diversi dagli altri ribozimi: di essere cioè specializzati. Ribozimi diversi facevano prodotti diversi, lo stesso ribozima faceva sempre lo stesso prodotto.

Grazie al numero, alla varietà ed alla specializzazione dei ribozimi ci fu un'altra orgia chimica in cui, anziché formarsi milioni di miliardi di combinazioni di molecole, si formarono milioni di miliardi di copie di alcuni tipi di molecole. Quali molecole? L'iperproduzione di certe molecole piuttosto che di altre fu del tutto casuale, legata alla casuale comparsa di alcuni tipi di ribozimi piuttosto che di altri. L'enorme incremento di concentrazione di tali molecole ebbe però notevoli conseguenze sul futuro dell'evoluzione sul nostro pianeta. Infatti, come succede nella costruzione di un edificio, anche nella costruzione della vita il tipo di materiale a disposizione condiziona molto il modo di costruire e gli edifici che si possono ottenere (al polo si fanno igloo con il ghiaccio mentre in polinesia si fanno capanne con le foglie di palma). Fatte queste considerazioni generali, possiamo supporre che le molecole che sono comuni a tutti gli organismi viventi oggi sulla terra fossero fra quelle che allora ebbero a disposizione specifici ribozimi. Possiamo quindi supporre che ci fossero ribozimi che acceleravano la sintesi di zuccheri, di basi azotate, di nucleosidi, di nucleotidi, di RNA, di pigmenti captatori di fotoni, di altre molecole importanti per la vita come la conosciamo. Se in quel lontano passato si fossero formati ribozimi in grado di accelerare la sintesi di altre molecole forse la vita avrebbe assunto modi di essere e forme diverse.

*Un sacchetto per non disperderli*

Ma come spesso accade la soluzione di un problema ne crea altri!

Certo, i ribozimi erano più specifici dell'argilla nell'accelerare le reazioni chimiche ma avevano un grosso difetto: sia essi che i loro prodotti si disperdevano, diluendosi, nel mare *magnum*. Questo piccolo dettaglio sarebbe stato sufficiente a vanificare il vantaggio evolutivo che essi rappresentavano. Infatti la diluizione diminuiva le probabilità che collidessero con i reagenti e quindi diminuiva la velocità di generazione dei prodotti. A questo punto il cammino verso la vita avrebbe potuto subire, se non proprio una battuta d'arresto, un drastico rallentamento. Ma evidentemente, prima che le cose divenissero irrimediabili, si trovò una soluzione.

Probabilmente fra i tanti ribozimi che erano stati sintetizzati ve ne erano alcuni capaci di accelerare la costruzione di fosfolipidi o di molecole simili.

#### Fosfolipidi

I fosfolipidi sono un vasto gruppo di molecole classificate fra i lipidi complessi. Fra di essi i glicerofosfolipidi hanno particolare importanza per la costituzione delle membrane biologiche. Queste molecole sono formate da due molecole di acidi grassi (che immaginiamo siano di colore bianco), una molecola di glicerolo, una molecola di fosfato (che immaginiamo sia grigia) e da un'altra molecola che può essere colina, serina, etanolamina, inositolo la cui presenza qualifica i diversi fosfolipidi. Queste molecole sono legate fra di loro in modo da formare una struttura che, nello spazio, ha l'aspetto di un parallelepipedo abbastanza allungato e simile ad un mattone. Nella molecola di fosfolipide si possono distinguere due zone: una bianca, costituita dai due lunghi acidi grassi disposti parallelamente fra di loro, che occupa una estremità e quasi tutta la lunghezza del mattone; l'altra grigia che contiene il fosfato ed i componenti specifici di ciascuna classe di fosfolipidi che occupa l'altra estremità del mattone. Queste due zone a causa dei componenti che le occupano hanno caratteristiche chimiche molto diverse: poichè gli acidi grassi sono idrofobi (non si mescolano con l'acqua) la regione bianca che li contiene è idrofoba e tende a fuggire il contatto con l'acqua. Al contrario la zona grigia contenente il fosfato è idrofila, cioè interagisce con l'acqua. E' questo duplice comportamento nei confronti dell'acqua che conferisce ai fosfolipidi la capacità di formare la struttura membranosa di base delle membrane.

I fosfolipidi che venivano sintetizzati non si disperdevano certo nell'acqua per la quale la maggior parte della molecola ha una profonda repulsione. In presenza di questo liquido le loro porzioni idrofobe, che abbiamo immaginato bianche, si disponevano spalla a spalla formando un muro dello spessore di un mattone. Questa struttura, con una superficie grigia ed una bianca, si chiama monostrato lipidico. La superficie grigia, costituita dalle zone idrofile dei mattoni, cercò il contatto con l'acqua ed instaurò con essa relazioni stabili. Quella bianca, costituita dalle estremità idrofobe, cercò di sfuggire l'acqua incollandosi alla superficie bianca idrofoba di un altro monostrato. Si

formò così il doppio strato lipidico, la struttura base delle membrane biologiche, che ha le due superfici esterne grigie e la porzione centrale bianca.

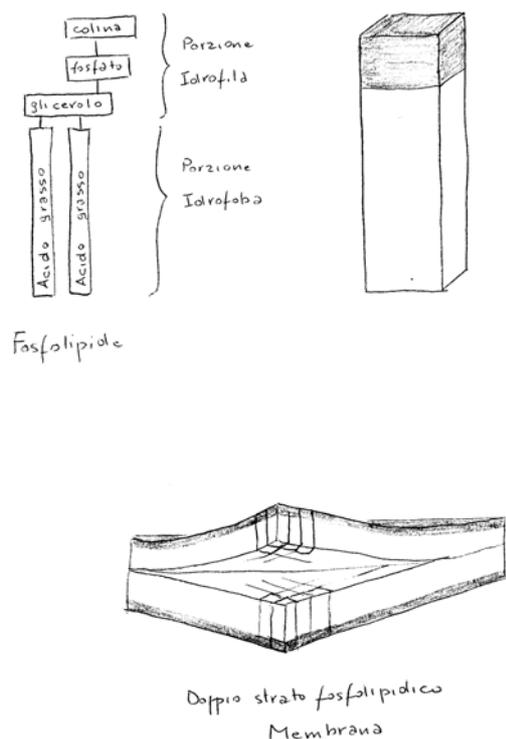


Figura 5: Fosfolipidi e membrane

L'assemblaggio delle membrane funzionali, come è stato descritto, è un processo spontaneo e casuale. Fu sufficiente la comparsa di grandi quantità di fosfolipidi perché questi si aggregassero fra loro a formare ampi lenzuoli che, rompendosi e risaldandosi, inglobavano parte del mezzo acquoso in cui si erano formati. Dentro queste vesciche di fosfolipidi il problema dell'allontanamento e della diluizione di molecole e di ribozimi non si pose più. Semmai si pose il problema di come far entrare nuovo materiale organico. Per fortuna le vesciche, quando collidono, fondono la loro "pelle" membranosa generando una vescica più grande in cui i contenuti si rimescolano. La fusione fra vescicole divenne il mezzo per scambiare e far circolare sia le molecole che i ribozimi.

A questo punto gran parte del lunghissimo cammino sulla via della vita era stato percorso. C'erano già le molecole capaci di captare l'energia dal sole e di trasformarla in energia chimica, le molecole capaci di conservare l'energia chimica e di distribuirla alle reazioni che ne avevano bisogno (i nucleotidi trifosfati), c'erano già i catalizzatori specifici per la sintesi delle molecole utili (i ribozimi) e c'erano le membrane che delimitavano lo spazio entro cui avveniva questo brulicare di reazioni.

### ***Fare e disfare è tutto un lavorare***

C'era quasi tutto, ma mancava quella cosa senza la quale tutto poteva essere perduto! La possibilità di tramandare le conoscenze e le informazioni acquisite.

Questa affermazione sembra assurda poiché in quel mondo casuale, privo di intelligenza, apparentemente non c'erano conoscenze da tramandare. Apparentemente! Se riflettiamo sul significato del termine conoscenza forse cambiamo idea. Conoscere vuol dire sapere, saper fare, essere capaci, ed essere capace è il termine che ho costantemente usato per qualificare le doti di alcune molecole che si erano formate durante l'evoluzione pre-biotica. Dire che una struttura è capace di svolgere una funzione è come dire che racchiude in sé molte conoscenze. Non ci credete? Facciamo un esempio. Le macchine che utilizziamo continuamente ogni giorno, sono capaci di svolgere delle funzioni. E' evidente a tutti che un aeroplano, una automobile, un trapano a colonna, un asciugacapelli .... un tegame, una forchetta sono capaci di svolgere una funzione. Siete in grado di costruire un tegame? No, perché non sapete distinguere un minerale ferroso da una roccia generica, perché non sapete fondere il minerale di ferro, perché non sapete dare al ferro fuso la giusta forma. Non avete la più vaga idea di cosa sia il Teflon per cui figuriamoci se sapete come ottenerlo ed usarlo per rendere il tegame antiaderente. Anche i manici di plastica sono un mistero! Questo piccolo esempio credo abbia chiarito che ogni macchina è un condensato, un riassunto delle conoscenze che bisogna avere per costruirla.

Cosa succederebbe se si rompesse irrimediabilmente l'unica macchina in grado di fondere il minerale ferroso esistente sulla terra che, facciamo finta, ci sia stata regalata da fantomatici marziani di passaggio. Non avendo le istruzioni per ricostruirla, la civiltà ripiomberebbe all'età del bronzo e si dovrebbe contare sul ritorno degli "omini verdi" per poter ritornare agli standard odierni.

Torniamo al nostro mondo pre-biotico. Cosa sarebbe successo se un ribozima si fosse rovinato o distrutto (e prima o poi questo evento doveva ben succedere)? Sarebbe crollata praticamente a zero la produzione della molecola di cui catalizzava la sintesi e questo avrebbe fatto crollare a zero la produzione di altre molecole che usavano quella molecola come componente. La vita, che era lì lì per nascere, sarebbe ripiombata all'argilla, la sua età del bronzo. E forse chissà quante volte lo ha fatto prima di trovare la soluzione!

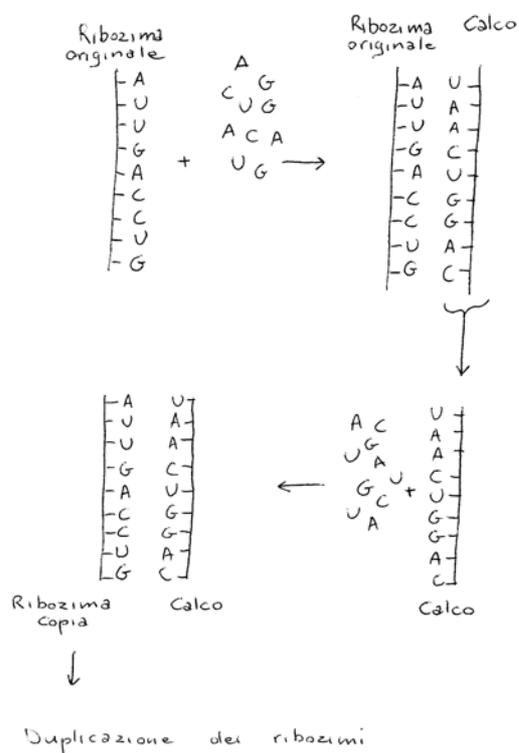


Figura 6: Duplicazione dei ribozimi

### *Un ribozima speciale per riprodurre i ribozimi ...*

La soluzione venne quando fra gli RNA sintetizzati ne comparve uno capace di copiare gli RNA esistenti. Questo ribozima, detto RNA replicasi, invece di costruire una ennesima mezza scala a pioli disponendo i nucleotidi-gradini in un ordine casuale, era in grado di costruire l'altra metà di ogni scala che incontrava. A fianco dei gradini della vecchia scala disponeva i nucleotidi complementari e poi li univa. Si formava così una nuova mezza scala a pioli che era complementare alla vecchia. La nuova scala era un calco della vecchia, e ricopiando quel calco,

l'RNA replicasi produceva un RNA identico allo stampo originale. Grazie a questo meccanismo si potevano fare tante copie di ogni singolo ribozima e l'informazione in essi contenuta non andava più perduta. Le conoscenze e le informazioni acquisite potevano essere tramandate.

*... che divengono lo stampo di sé stessi*

Da quel momento gli RNA non furono solo i catalizzatori ma furono anche l'informazione per costruire i catalizzatori, cioè l'informazione genetica.

La conseguenza di questo evento non fu secondaria. Infatti, la vescicola in cui era stata casualmente sintetizzata la replicasi poteva, ora, tramandare la cultura, cioè l'insieme delle conoscenze acquisite in circa 500 milioni di anni di evoluzione. Ogni macchina-ribozima non doveva più essere reinventata, poteva essere riprodotta! Ecco la parola magica che mancava per fare di un sacchetto di molecole un organismo vivente! Era nata la vita!

Le prime cellule, perché di cellule ormai si trattava, erano vive perché erano in grado di svolgere le tre funzioni caratteristiche di ogni organismo vivente: auto-costruirsi, mantenere funzionante la propria struttura, replicarsi. Queste cellule primordiali, grazie alla replicasi, avevano infatti una grande e continua disponibilità di ribozimi che permetteva loro di cannibalizzare molecole ingerite con la fusione; di ottenere da esse sia energia chimica che piccole molecole; di usare queste molecole semplici per sintetizzare le molecole costitutive della cellula (i fosfolipidi, i nucleotidi trifosfati, i captatori di energia solare) la cui disponibilità permetteva la sintesi delle entità strutturali e funzionali della cellula stessa (le membrane, i ribozimi). In questo modo le cellule primordiali erano in grado di procacciarsi energia e materiali e con questi di costruire/ricostruire la propria organizzazione. Ed erano anche in grado di replicarsi, cioè di costruire organismi uguali a sé stesse. Grazie alla replicasi, la duplicazione dei ribozimi consentiva di dotare ogni cellula figlia dello stesso corredo di informazioni necessarie per costruire e mantenere funzionante la propria struttura.

### ***L'evoluzione biochimica prosegue***

*Le proteine, molecole con tanti pregi ed un tremendo difetto ...*

L'organizzazione cellulare che abbiamo fin qui descritto si avvaleva anche di molecole di cui non abbiamo ancora parlato. L'omissione è dovuta alla loro non essenzialità per la comprensione delle prime fasi della evoluzione della vita. Queste molecole sono gli amminoacidi.

Figura 7

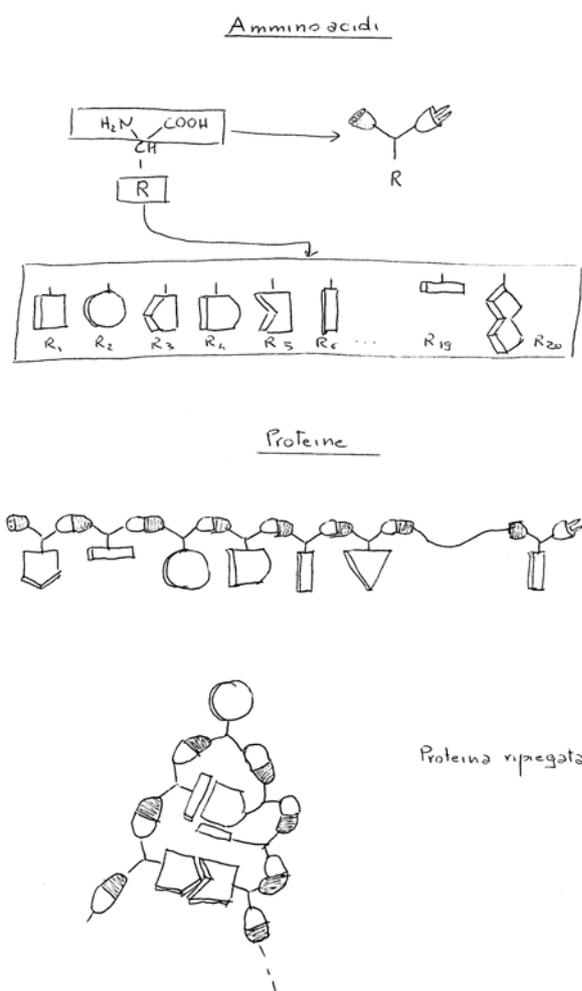


Figura 7: Amminoacidi e proteine

### Amminoacidi

Gli amminoacidi costituiscono una famiglia di composti organici che hanno la struttura generale di una Y. Essi sono uguali fra di loro per alcune caratteristiche chimiche mentre differiscono per altre. Come dice la parola amminoacido, tutte queste molecole hanno nella loro struttura un gruppo amminico ed uno acido che occupano le braccia della Y. Essi funzionano come il maschio e la femmina di un incastro e permettono agli amminoacidi di unirsi a formare lunghe catene. E' la gamba della molecola, detto radicale ( R ), che contraddistingue un amminoacido dall'altro. I radicali differiscono sia in dimensioni che in caratteristiche chimiche. Possono essere lunghi o corti, stretti o larghi, carichi negativamente o positivamente, idrofili (amano il contatto con l'acqua) o idrofobi (la rifuggono). Queste caratteristiche si combinano a formare 20 amminoacidi diversi. Essi sono: glicina, alanina, valina, leucina, isoleucina, prolina,

fenilalanina, tirosina, triptofano, metionina, serina, treonina, cisteina, asparagina, glutammina, acido aspartico, acido glutammico, lisina, arginina, istidina.

Gli amminoacidi sono molecole molto semplici che si formarono, nella primitiva atmosfera, dalla condensazione di metano, azoto, acqua ed ammoniaca, sotto l'azione delle intense energie dei fulmini e della luce ultravioletta. La loro precoce sintesi è dimostrata dal loro ritrovamento su meteoriti abbattutisi sulla terra. Come altre molecole presenti nel brodo primordiale, essi vennero adsorbiti dall'argilla e, in presenza di alte energie, contribuirono alla costruzione di molecole più complesse. Ad esempio, la glicina partecipa alla sintesi di alcune molecole che catturano l'energia del sole, e gli amminoacidi tutti si condensano fra di loro a formare polimeri detti proteine.

#### Proteine

Le proteine sono dei polimeri, cioè delle lunghe catene lineari formate da amminoacidi. Gli amminoacidi si uniscono fra di loro facendo reagire il gruppo acido (che funziona da maschio) del primo amminoacido con il gruppo amminico (che funziona da femmina) del secondo. Il legame che si forma è un legame rigido poiché ha le caratteristiche di un doppio incastro (come quello formato dalla spina e dalla presa di corrente). In questo tipo di incastro (legame peptidico) il maschio non può ruotare rispetto alla femmina e questo fa sì che i due amminoacidi non possano ruotare l'uno rispetto all'altro intorno a questo legame. L'incastro maschio del secondo amminoacido rimane disponibile per la reazione con l'incastro femmina di un terzo amminoacido ecc.. Si forma così la lunga catena di amminoacidi delle proteine. Le proteine risultano diverse per vari motivi. Possono contenere un numero differente di amminoacidi; alcune sono formate da 8-10 amminoacidi, altre da migliaia, la maggior parte da centinaia di amminoacidi. A parità di lunghezza possono avere una composizione percentuale di amminoacidi diversa; ad esempio, nella maggior parte delle proteine la prolina è poco presente, in alcune è preponderante. A parità di lunghezza e composizione percentuale, gli amminoacidi possono essere uniti in una differente sequenza. Il numero di proteine ottenibili con 20 amminoacidi è  $20^n$  in cui  $n$  è la lunghezza della proteina. La lunghezza di una proteina, la sua composizione in amminoacidi e la loro sequenza definiscono la struttura primaria di una proteina.

Da quanto detto si potrebbe dedurre che le proteine assumano nello spazio una conformazione rettilinea. La realtà è ben diversa. Malgrado il legame peptidico sia rigido, gli amminoacidi possono ruotare intorno ad altri legami. L'entità della rotazione dipende dal "fastidio" che amminoacidi vicini si causano l'un l'altro: più si infastidiscono più ruotano per evitarsi. Una volta effettuata la rotazione e raggiunta una posizione "comoda", gli amminoacidi smettono di muoversi e la struttura si stabilizza in questa conformazione. Quindi, la proteina assume una forma che dipende dalla mutua posizione, cioè dalla sequenza, degli amminoacidi. Questa struttura dovuta alle interazioni fra amminoacidi vicini si chiama struttura secondaria.

Come succede per i polinucleotidi, anche segmenti lontani di una proteina, muovendosi nello spazio si possono avvicinare. Se nel corso di questi contorcimenti, giungono a contatto zone contenenti amminoacidi con residui idrofobi, esse tendono ad unirsi come le gocce d'olio o le code idrofobe dei fosfolipidi. Queste interazioni idrofobe sono stabili e la proteina resta "incollata" in questa conformazione. La struttura che la proteina assume nello spazio in seguito ai ripiegamenti ed alle forze di stabilizzazione fra amminoacidi lontani si chiama struttura terziaria.

Poiché sia la struttura secondaria che quella terziaria di una proteina dipendono dalla sequenza degli amminoacidi (struttura primaria), proteine con sequenze diverse assumono nello spazio una conformazione "generale" diversa.

Poiché gli amminoacidi sono molecole semplici (a differenza dei nucleotidi che sono composti da base azotata, zucchero e fosfato) probabilmente essi cominciarono a polimerizzare e a produrre proteine prima che si formassero i nucleotidi e ben prima che si formassero gli RNA. Le proteine, come i polinucleotidi, si ripiegano su sé stesse assumendo nello spazio delle conformazioni in cui si evidenzia la presenza di tasche; anche nelle proteine alcune varianti di queste tasche possono accomodare specifici reagenti e catalizzare specifiche reazioni. Le proteine, come gli RNA, possono essere catalizzatori. Le proteine con attività catalitica sono dette enzimi.

Avendo a disposizione 20 amminoacidi, il numero di polimeri diversi che si possono ottenere dalla loro combinazione è assai maggiore di quello che ottiene con soli 4 nucleotidi. Ad esempio per un polimero lungo cinque monomeri le proteine ottenibili sono  $20^5 = 3.200.000$  mentre gli RNA ottenibili sono  $4^5 = 1024$ . Quindi, la disponibilità nel brodo pre-biotico di amminoacidi rese possibile la loro unione in una enorme varietà di combinazioni. Come è evidente che la probabilità di ottenere combinazioni vincenti al Super Enalotto aumenta all'aumentare del numero delle combinazioni giocate, così dovrebbe essere altrettanto evidente che è assai più facile trovare molecole vincenti, nel nostro caso catalizzatori, fra molte combinazioni disponibili piuttosto che fra poche. L'enorme disponibilità di tipi diversi di proteine rese perciò "abbastanza" frequente la comparsa di enzimi.

Gli enzimi, come catalizzatori, sono molto migliori degli RNA. Per capirne il motivo, ancora una volta paragoniamo le macchine biochimiche alle macchine meccaniche. Se in cucina io avessi come unici attrezzi un coltello, un cucchiaio, una forchetta ed un tegame cucinerei in più tempo, facendo più fatica e ottenendo peggiori risultati che se avessi a disposizione una serie di coltelli, un trinciante, un mestolo, una ramina, una batteria di tegami nonché un colapasta, un pelapatate, uno snocciolatore, una frusta, un colino, uno scavino, uno spremiagrumi, uno vuotamele, una grattugia,

ecc. Gli stessi problemi si avrebbero in una officina se si usassero solo quattro utensili anziché una ventina. Come nel caso degli utensili, la disponibilità di 20 diversi tipi di radicali amminoacidi permette all'operatore-catalizzatore di svolgere un maggior numero di operazioni in modo migliore. Per questo le proteine sono dei catalizzatori migliori, cioè più specializzati degli RNA.

Da quanto abbiamo detto, risulta molto probabile che già prima della comparsa dei ribozimi esistessero nel brodo pre-biotico una grande varietà di ottimi catalizzatori proteici. Essi, quasi sicuramente contribuirono all'accelerazione del cammino verso la vita. E' molto probabile che siano stati enzimi i primi catalizzatori che accelerarono la sintesi delle molecole organiche di cui abbiamo parlato. E nulla vieta di pensare che specifici enzimi abbiano accelerato, fra le tante sintesi, anche quella dei ribozimi.

Ma per quale motivo si erano dovuti aspettare i ribozimi per costruire la vita se praticamente fin da subito, si fa per dire, erano presenti dei catalizzatori proteici che funzionavano altrettanto bene, anzi meglio?

Per capirlo riandiamo un attimo indietro per ricordare quale era stato il momento in cui era nata la vita. Cito da me stessa: "Ogni macchina-ribozima non doveva più essere reinventata, poteva essere riprodotta! ... Era nata la vita!"

Questo fondamentale evento era stato reso possibile dalla struttura dei ribozimi. I nucleotidi che li costituiscono hanno le basi azotate che, in opportune condizioni di appaiamento, risultano complementari a due a due. Quindi ogni nucleotide ha un nucleotide complementare ( A-T, T-A, G-C, C-G). Grazie a ciò, avendo a disposizione un ribozima-scala era possibile farne un calco; questo fungeva da stampo per fare una scala identica al ribozima originale. In questo modo l'informazione contenuta nel ribozima non andava perduta se esso si deteriorava poiché era stata trasferita e quindi conservata in diverse copie.

Le proteine, rispetto agli RNA, hanno molti pregi ma un tragico difetto: non hanno il dono della complementarità! Purtroppo i 20 amminoacidi non hanno affinità chimiche che li rendano a due a due complementari e quindi, data una proteina, non c'è modo di costruirne una uguale. Di conseguenza, l'informazione contenuta in ogni enzima, cioè la sua capacità di accelerare la sintesi di una molecola, andava costantemente perduta ogni volta che esso si deteriorava. Ogni perdita faceva fare all'evoluzione un passo indietro. Si doveva aspettare che casualmente si riformasse un

enzima simile per rifare lo stesso passo. E a forza di marciare sul posto, le proteine vennero raggiunte dai ribozimi che non solo le sorpassarono ma fecero la differenza fra la vita e la non vita!

*... ma il merito, prima o poi, viene riconosciuto*

A causa della incapacità delle proteine di riprodursi, la nascita della vita aveva dovuto aspettare che comparissero i ribozimi che racchiudevano in sé entrambe le funzioni di catalisi e di informazione genetica. Le proteine, a cui era stata data una possibilità e che non si erano dimostrate all'altezza del compito, sembravano archiviate per sempre come chissà quante altre molecole. Sembrava che per esse non ci fosse un futuro! Ma non fu così. I loro meriti erano tali e tanti che la fase successiva dell'evoluzione fu, in pratica, una lenta ma costante invenzione dei meccanismi che portarono al loro recupero. E furono i ribozimi gli artefici del salvataggio.

Abbiamo visto come questi catalizzatori fossero formati da soli quattro tipi di componenti e per di più molto simili fra loro; abbiamo anche sottolineato come la "uniformità" chimica della loro struttura limitasse sia il numero delle reazioni che essi potevano accelerare che la velocità massima raggiungibile. Ma, come dicono i proverbi, "Con quel che si ha si fa" ed "In mancanza di cavalli, corrono anche i somari"!

Il primo passo verso il recupero delle proteine si verificò quando, cercando di migliorare il repertorio catalitico estremamente ridotto dei ribozimi se ne modificò la struttura. Viste le loro modeste capacità, non fu difficile: bastò che alla lunga catena polinucleotidica si legasse un cofattore, cioè una molecola in grado di fornire gruppi chimici diversi e particolarmente reattivi. Data la versatilità degli amminoacidi, non sorprende che si dimostrassero particolarmente efficienti i ribozimi che avevano acquisito, come cofattore, un amminoacido. Ovviamente non era sufficiente che si legasse un qualsiasi amminoacido; era necessario che si legasse quello dotato delle caratteristiche chimiche più adatte ad accelerare la reazione catalizzata da quel ribozima. Ad esempio, per un certo ribozima l'amminoacido "giusto" era l'alanina mentre per un altro era il triptofano. Il legame degli amminoacidi ai ribozimi, all'inizio, avvenne probabilmente in modo casuale ma successivamente fu guidato da ribozimi di "assegnazione" che permettevano non solo di rendere veloce questa reazione ma anche di renderla specifica. Ciò permise di assegnare sempre lo stesso amminoacido, quello "giusto", allo stesso ribozima (Figura 8a).

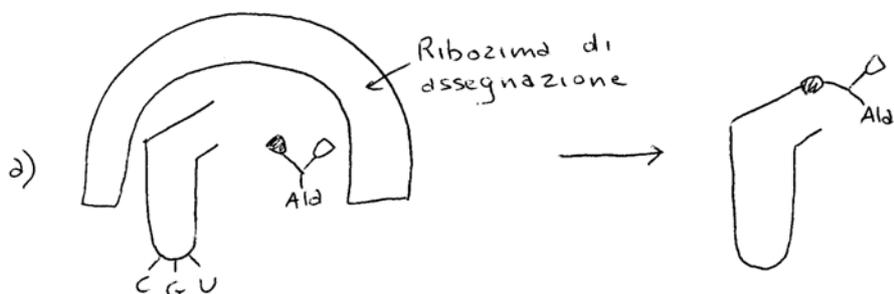


Figura 8a: Recupero delle proteine

Se il legame di un singolo amminoacido era tanto vantaggioso per l'attività catalitica dei ribozimi, immaginate i vantaggi che si sarebbero potuti ottenere nel caso in cui il cofattore fosse stato, anziché un singolo amminoacido, una catena di amminoacidi.

Ma perché il vantaggio fosse reale, la sequenza degli amminoacidi non poteva essere casuale. Solo una specifica sequenza avrebbe contribuito all'organizzazione di una più efficiente tasca catalitica nel ribozima; altre sequenze o sarebbero state ininfluenti o, peggio, avrebbero impedito al ribozima di ripiegarsi nel modo corretto compromettendone l'attività. Questa considerazione vale per tutti i ribozimi, ciascuno dei quali, per funzionare meglio, avrebbe dovuto dotarsi di una catena proteica specifica, diversa da quella degli altri.

Ottenere un simile risultato non deve essere stato facile e deve aver richiesto sia nuove "strategie" sia lo sviluppo di nuove strutture adatte ad attuarle. Per capire come sia stato possibile inventare un modo per sintetizzare proteine specifiche, analizziamo quali sono i problemi che dovettero essere affrontati. Prima di tutto bisognava accelerare la velocità di unione degli amminoacidi, indipendentemente dal loro ordine; poi bisognava escogitare un sistema che permettesse di unirli in una sequenza definita; infine bisognava stabilire chi stabiliva la sequenza! Per semplicità presenterò separatamente i modi in cui i tre problemi sono stati risolti anche se, nella realtà, la loro soluzione sembra essere avvenuta contestualmente.

Per risolvere il primo problema si usarono, come donatori di amminoacidi, i ribozimi che già avevano un amminoacido legato. Fra di essi ve n'erano alcuni che erano dotati di una caratteristica particolarmente adatta allo scopo: avevano una forma ad L con l'amminoacido legato all'estremità

del braccio corto. A questa classe di RNA è stato dato il nome di RNA di trasferimento o RNA transfer.

#### RNA transfer

Gli RNA transfer o di trasferimento (tRNA) sono polimeri abbastanza corti, della lunghezza di circa 70-90 nucleotidi. La sequenza dei nucleotidi permette l'avvolgimento della molecola in una struttura a trifoglio che si ripiega ulteriormente per ottenere una struttura ad L, simile ad un braccio con il gomito piegato. Tale struttura è uguale per tutti i tRNA, anche se essi differiscono nella sequenza dei nucleotidi. Data la diversità di sequenza, i diversi tipi di tRNA hanno, alla estremità lunga del braccio, una diversa tripletta di nucleotidi, una sorta di mano con tre dita diverse. All'estremità corta del braccio viene attaccato l'amminoacido da trasferire; si forma così l'amminoacido-tRNA. Ogni tipo di tRNA lega sempre e solo un tipo di amminoacido rendendo le coppie amminoacido-tRNA non casuali ma specifiche.

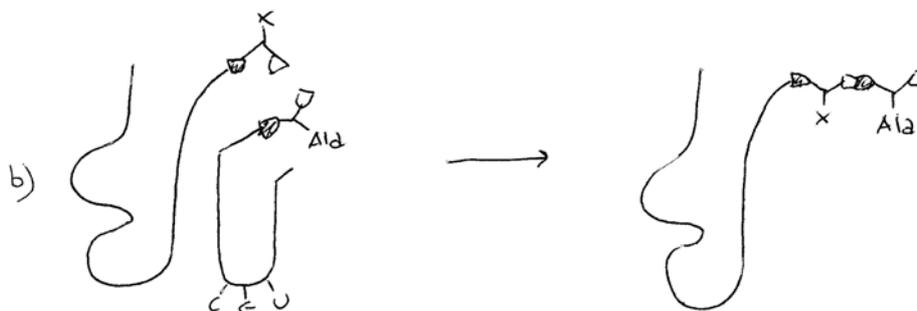


Figura 8b: Recupero delle proteine

I tRNA tendevano ad accostarsi fra di loro, fianco a fianco, avvicinando così gli amminoacidi a loro legati. Ricorderete certamente che quando abbiamo definito la catalisi abbiamo detto che essa è “.. l’accelerazione della velocità di una reazione ad opera di agenti che avvicinano ed orientano i reagenti..”. L’accostamento degli amminoacidi ad opera dei tRNA è perciò, per definizione, una catalisi che accelerò la velocità di formazione del legame fra amminoacidi. Grazie a questo meccanismo, un ribozima poteva velocemente allungare il proprio cofattore ricevendo nuovi amminoacidi dai tRNA che successivamente affiancava (Figura 8b).

Un ulteriore incremento della velocità si ottenne quando fu assemblata una nuova struttura: una specie di tavolo costituito da RNA un po’ particolari, detti RNA ribosomiali (rRNA). Quanto sia utile un tavolo che tenga attaccati a sé gli utensili necessari per compiere una operazione ben sanno gli astronauti che, in orbita, si sbracciano (alta energia di attivazione) per recuperare i pezzi che

fluttuano nell'abitacolo della navicella spaziale. Gli rRNA del tavolo, attirando su di sé gli amminoacidi-tRNA, favorivano il loro avvicinamento. Questo rese ancora più veloce la sintesi della corta coda proteica. Purtroppo però, l'accostamento fianco a fianco degli amminoacidi-tRNA sul tavolo avveniva in modo casuale; questo rendeva casuale l'ordine, cioè la sequenza con cui gli amminoacidi si legavano. Ogni sintesi era perciò un happening e solo alla fine si scopriva che codina proteica era stata sintetizzata!

#### RNA ribosomiale

Gli RNA ribosomiali (rRNA) sono tre RNA molto lunghi e di alto peso molecolare che partecipano alla costituzione del ribosoma, la struttura sulla quale avviene l'assemblaggio degli amminoacidi per la sintesi delle proteine. Essi hanno affinità per gli altri RNA coinvolti in questo processo e ciò favorisce la loro corretta posizionatura.

Ma come disporre gli amminoacidi giusti nel giusto ordine?

Nella scheda in cui ho descritto sommariamente la struttura dei tRNA, ho detto che, pur avendo la stessa forma, essi sono diversi ed in particolare hanno, in fondo al braccio una tripletta caratteristica per ciascuno di essi. Questa particolarità fa sì che gli amminoacidi, legandosi specificamente ai tRNA, acquistino una mano con tre dita specifiche. Ad esempio l'alanina si lega ad un tRNA che ha in fondo al braccio la tripletta CGU, la serina ad uno che ha la tripletta AGA, la metionina ad uno che ha la tripletta UAC e così via. Quindi, ogni amminoacido, quando viene legato al proprio tRNA, si trova ad essere agganciato ad una tripletta che, non solo, permette la sua identificazione, ma gli consente anche di avvantaggiarsi della caratteristica vincente degli acidi nucleici: la complementarità. La complementarità acquisita fu lo strumento che permise di risolvere il problema della posizionatura degli amminoacidi nel giusto ordine.

Il problema dell'ordine, cioè della successione di molecole diverse, era già stato incontrato in passato quando si voleva fare una copia di un ribozima. In quel caso la struttura stessa del ribozima aveva fornito le "istruzioni per l'uso": il susseguirsi delle sue basi costituiva lo stampo per il posizionamento nel giusto ordine dei nucleotidi complementari. Ora che gli amminoacidi avevano acquisito la complementarità, anche se per interposta persona, si poteva utilizzare una tattica simile anche per stabilire il loro ordine durante l'assemblaggio delle proteine. Bastava trovare una molecola che fornisse "le istruzioni per l'uso". Fra i tanti RNA presenti in quel mondo brulicante di

RNA, alcuni assunsero la funzione di stampo per la sintesi delle proteine. Comparvero così gli RNA messaggeri (mRNA).

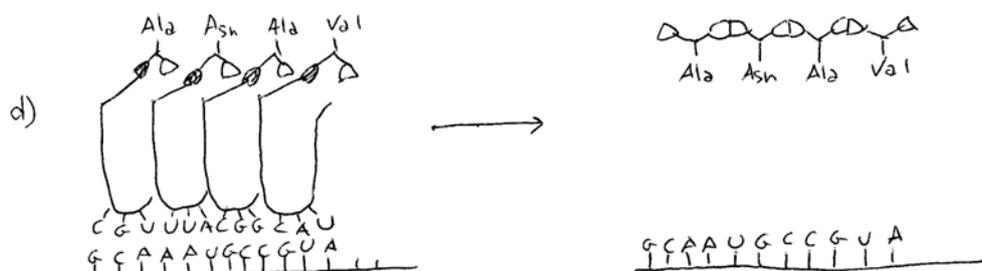


Figura 8c: Recupero delle proteine

Per capire il ruolo svolto da queste molecole nella costruzione delle proteine, dobbiamo utilizzare una diversa chiave di lettura dell'informazione contenuta negli RNA. Il messaggio contenuto nella sequenza di nucleotidi, al contrario di quanto avveniva per la sintesi degli RNA, non deve più essere letto come una unica lunghissima parola formata dalle quattro lettere (AAUGCCGUACCGUACUUCGUU.....), ma lo dobbiamo immaginare come un discorso formato da una lunga sequenza di brevi parole, ciascuna formate da tre lettere (AAU GCC GUA CCG UAC UUC GUU ...). Ogni tripletta nucleotidica può attirare e legare a sé solo il tRNA che porta la tripletta complementare.

#### RNA messaggero

Gli RNA messaggeri (mRNA) sono lunghi RNA che hanno brevi sequenze complementari agli rRNA. Grazie a tali sequenze gli mRNA si dispongono sul ribosoma: il tavolo su cui avviene la sintesi delle proteine. Il resto della lunga catena polinucleotidica degli mRNA può essere immaginata come un susseguirsi di triplette ognuna delle quali attrae e lega a sé, per il principio della complementarietà fra nucleotidi, un amminoacil-tRNA. La sequenza delle triplette degli mRNA, impartendo l'ordine di successione dei tRNA, determina quindi l'ordine di successione degli amminoacidi nelle proteine. Questi RNA portano, perciò, il messaggio per la sintesi delle proteine.

In questo modo gli amminoacidi-tRNA non si accostano più a caso ma si dispongono sull'mRNA nell'ordine definito dalla sequenza dei nucleotidi dell'mRNA stesso. Ad esempio, l' mRNA che ha la sequenza AAUGCCGUACCGUACUUCGUU lega, nell'ordine, i tRNA dotati delle triplette

UUA (complementare a AAU), CGG (completare a GCC), CAU, GGC, AUG, AAG, CAA che, a loro volta, portano legati gli amminoacidi asparagina, alanina, valina, prolina, tirosina, fenilalanina, valina (Figura 8c). La corrispondenza fra le triplette del mRNA e gli amminoacidi, mediata dai tRNA, è il notissimo codice genetico.

UUU	fenilalanina	UCU	serina	UAU	tirosina	UGU	cisteina
UUC	"	UCC	"	UAC	"	UGC	"
UUA	leucina	UCA	"	UAA	stop	UGA	stop
UUG	"	UGG	"	UAG	"	UGG	triptofano
CUU	"	CCU	"	CAU	istidina	CGU	arginina
CUC	"	CCC	"	CAC	"	CGC	"
CUA	"	CCA	"	CAA	glutammina	CGA	"
CUG	"	CCG	"	CAG	"	CGG	"
AUU	isoleucina	ACU	treonina	AAU	asparagina	AGU	serina
AUC	"	ACC	"	AAC	"	AGC	"
AUA	"	ACA	"	AAA	lisina	AGA	arginina
AUG	metionina	ACG	"	AAG	"	AGG	"
GUU	valina	GCU	alanina	GAU	ac. aspartico	GGU	glicina
GUC	"	GCC	"	GAC	"	GGC	"
GUA	"	GCA	"	GAA	ac glutammico	GGA	"
GUG	"	GCG	"	GAG	"	GGG	"

Codice genetico

Figura 9: Codice genetico

#### Codice genetico

Il codice genetico, come ogni codice più o meno segreto, è l'insieme delle regole che permettono di passare da un linguaggio ad un altro. Il codice genetico, in particolare, permette di passare dal linguaggio degli acidi nucleici che è scritto con 4 lettere (i nucleotidi) al linguaggio a 20 lettere (gli amminoacidi) delle proteine. La mancata corrispondenza numerica fra le lettere dei due linguaggi (4 contro 20) fa sì che siano necessarie delle regole di traduzione ed un vocabolario: il codice genetico, appunto! La prima e principale regola del codice genetico dice che i nucleotidi che si susseguono nel mRNA non vengono letti come unità ma a tre a tre. Il calcolo combinatorio dice che con 4 nucleotidi presi a tre a tre si possono comporre 64 triplette. Poiché ogni tripletta del mRNA, detta codon, corrisponde ad un amminoacido, è evidente che alcuni amminoacidi sono codificati da più codon (nell'esempio del testo sia GUA che GUU codificano per l'amminoacido valina). La tabella qui di seguito presentata è il vocabolario del codice genetico che fa corrispondere ad ogni parola del mRNA, cioè ad ogni tripletta, la parola nel linguaggio delle proteine, cioè l'amminoacido. Il codice genetico è universale: questo significa che tutti gli organismi viventi, pur avendo mRNA molto diversi, usano le stesse regole per trasformare in proteine l'informazione che contengono. Il codice genetico viene confuso, dai saccenti ignoranti, con il patrimonio genetico che è, invece, diverso e proprio di ciascun organismo vivente.

Ma come facevano i diversi ribozimi a dire ad un mRNA l'ordine in cui dovevano essere legati gli amminoacidi del proprio cofattore? La risposta è molto semplice: all'inizio gli mRNA furono i ribozimi.

### *Una nuova funzione per i ribozimi: istruzioni per la sintesi delle proteine*

Abbiamo visto come, per far sì che gli amminoacidi venissero uniti in una sequenza ben definita, si dovette evolvere una nuova classe di RNA, gli mRNA, che costringeva i tRNA a disporsi nel giusto ordine. Ma in realtà, gli RNA che per primi fornirono le istruzioni per sintetizzare la porzione proteica dei ribozimi non furono altro che i ribozimi stessi che utilizzarono parte della loro lunga catena come stampo per il corretto assemblaggio del proprio cofattore proteico (Figura 8d).

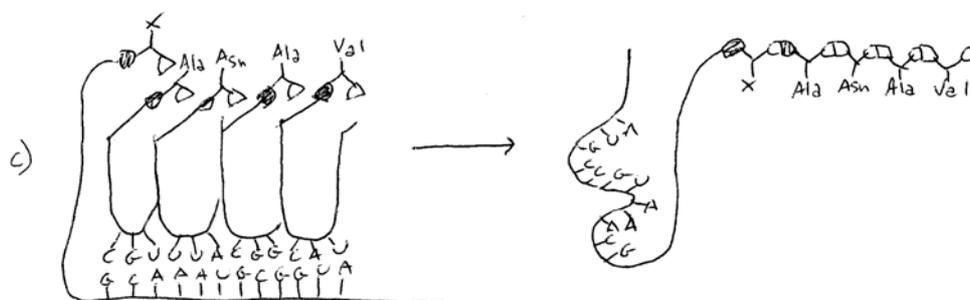


Figura 8d: Recupero delle proteine

I ribozimi, a questo punto cruciale dell'evoluzione della vita, furono veramente il *deus ex machina* della situazione. Alle loro due fondamentali funzioni (catalizzatori ed informazione genetica per la propria riproduzione) se ne affiancava una terza: informazione genetica per la sintesi del proprio cofattore proteico.

La funzione di catalizzatore e quella di stampo per la propria porzione proteica convissero per milioni di anni in ciascun ribozima. All'inizio la porzione di RNA dedicata alla catalisi era preponderante rispetto a quella destinata alla sintesi del peptide. Ma un po' alla volta i rapporti si invertirono. Infatti, vista la maggiore efficienza catalitica delle proteine rispetto agli RNA, la capacità del ribozima di accelerare la reazione migliorò tutte le volte che un pezzo della sua molecola si sottraeva alla funzione catalitica e si aggiungeva a quella di sintesi della proteina. Per questo la porzione del ribozima che aveva funzione di stampo per la proteina divenne sempre più

lunga a spese di quella catalitica che divenne sempre più corta. Il processo arrivò alle estreme conseguenze quando nessuna parte del ribozima partecipò più alla catalisi ma tutta la sua struttura servì solo per assemblare la proteina che ormai quasi da sola esercitava la funzione catalitica. A questo punto, visto che l'RNA serviva solo per la sintesi della proteina, non c'era motivo che rimanesse legato ad essa come una inutile lunga coda. Gli RNA stampo si staccarono e cominciarono ad esistere come una nuova classe di RNA, gli mRNA appunto, che venivano utilizzati solo quando doveva avvenire la sintesi delle proteine: i nuovi ed efficienti catalizzatori. In questa operazione di salvataggio delle proteine la maggior parte dei ribozimi persero la loro funzione catalitica ma acquisirono la nuova funzione di informazione genetica per la sintesi delle proteine (mRNA) (Figura 8d).

Per le proteine si apriva un nuovo mondo! Grazie alla presenza degli specifici mRNA che fungevano da stampo per la loro sintesi, esse potevano essere rifatte ogni volta che ce ne fosse stato bisogno, senza dover aspettare il caso. E grazie alla replicasi, copie degli mRNA potevano essere date in dote, insieme ai ribozimi, alle cellule figlie che potevano godere, così, anche di questo corredo di informazioni necessarie per costruire e mantenere funzionante la propria struttura.

### *Come salvaguardare le istruzioni*

Tutti questi RNA (ribozimi, rRNA, tRNA e mRNA), come ogni macchina ed in particolare come ogni macchina che lavora intensamente, tendevano a deteriorarsi: delle basi si staccavano, altre si modificavano, la catena si rompeva ecc... Queste alterazioni strutturali con buona probabilità incidavano su quelle funzionali e gli RNA alterati perdevano la loro attività. Ad esempio i ribozimi e gli mRNA difettosi non erano più in grado, rispettivamente, di catalizzare la reazione per cui erano specifici e di sintetizzare la proteina giusta. Ovviamente tutto questo avrebbe potuto avere gravi conseguenze per la cellula se non fosse esistito, come abbiamo detto, un sistema per tramandare l'informazione. Grazie alla struttura degli RNA ed alla complementarietà delle basi, ogni RNA poteva essere utilizzato come stampo per fare un calco di sé stesso e questo calco servire per fare una copia del RNA originale. Però, se l'RNA originale era difettoso anche la copia sarebbe stata ..... difettosa! Oh! Oh! Nella magnifica costruzione che abbiamo fin qui descritto si stava evidenziando una grossa falla che rischiava di compromettere la conservazione e la trasmissione dell'informazione genetica, cioè la vita! Dove stava l'errore?

Purtroppo l'errore era intrinseco al sistema. Quella che era stata la carta vincente degli RNA nella costruzione della vita (la stessa molecola fungeva sia da macchina biochimica che da informazione genetica per costruire quella macchina) era anche la loro debolezza. E' evidente, infatti, che se la stessa molecola svolge le due funzioni, nel momento in cui essa si deteriora, nello stesso momento viene meno l'informazione per costruirne una copia funzionante. Purtroppo, la struttura degli RNA permetteva di risolvere il problema della trasmissione dell'informazione ma non quello della sua conservazione.

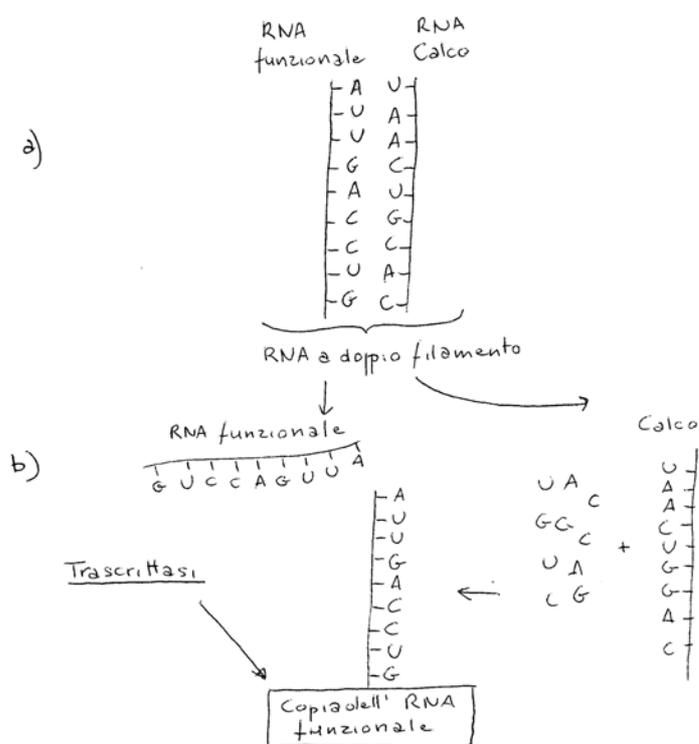


Figura 10: Utilizzo e trasmissione dell'informazione genetica.

A causa della sua intrinsecità al sistema, questo problema si dovette evidenziare quasi subito ed il fatto che noi siamo qui a parlarne dimostra che si evolsero rapidamente dei sistemi in grado di risolverlo. La strategia utilizzata non fu molto sofisticata: non tutte le macchine vennero messe a lavorare, una copia di ciascuna di esse venne tenuta da parte ed inoltre, per diminuire le probabilità che si rovinasse, venne anche ben imballata. Biochimicamente parlando, di ogni RNA originale venne fatto, ad opera della RNA replicasi, un calco che rimase unito al suo stampo. Si formò così

un RNA a doppio filamento. In questa struttura, il filamento calco svolgeva due fondamentali funzioni. La prima (Figura 10a) era di proteggere l'RNA originale dagli insulti dell'ambiente esterno come fosse il fodero di una spada. La seconda era di permettere la costruzione di una copia operativa dell'RNA originale (Figura 10b). Infatti, ogni volta che serviva una copia operativa, gli RNA del doppio filamento si scollavano e l'RNA calco fungeva da stampo per la sintesi del nuovo RNA operativo. Terminata l'operazione l'RNA calco si riincollava all'RNA originale. Questa copiatura dell'RNA calco veniva fatta da un nuovo catalizzatore detto RNA trascrittasi. In questo modo anche se gli RNA operativi si deterioravano la cellula era in grado di costruirne dei "nuovi" in tutti i sensi. Gli RNA operativi utili, a singolo filamento, continuarono a svolgere le funzioni di macchina biochimica mentre l'RNA a doppio filamento, formato dall'RNA originale e dal suo calco, divenne il depositario dell'informazione genetica.

Durante la vita della cellula funzionava solo l'RNA trascrittasi che, copiando l'RNA calco produceva gli RNA operativi; nel momento in cui la cellula stava per dividersi interveniva anche la replicasi che (Figura 10c), copiando entrambi i filamenti, permetteva di ottenere due RNA a doppio filamento, uno dei quali poteva essere dato in dote alla cellula figlia. Questo sistema abbastanza semplice si dimostrò molto efficace tanto è vero che venne utilizzato per milioni di anni.

E così, ancora una volta la situazione fu salvata dagli RNA!

Ma questo non ci deve far mitizzare queste molecole. Anche loro hanno dei difetti! Abbiamo già visto come in una delle loro due funzioni, la catalisi, non fossero un gran ché e a dire il vero non erano un gran ché anche nell'altra funzione, cioè come depositari dell'informazione genetica. Infatti, la presenza negli RNA dello zucchero ribosio fa sì che questi polimeri, in certe situazioni, siano propensi all'autodistruzione.

Come abbiamo visto, la vita superò ben presto, si fa per dire, l'inadeguatezza verso la catalisi degli RNA grazie alla presenza nel brodo primordiale degli amminoacidi che permisero la sintesi delle proteine. Purtroppo per milioni di anni la vita non ebbe a disposizione nessuna molecola in grado di svolgere meglio degli RNA la funzione di depositario dell'informazione genetica. Ma anche per questo problema arrivò il grande giorno della soluzione, il momento in cui si verificò l'ultimo grande salto verso la vita come la conosciamo.

*La concorrenza da dei vantaggi: il DNA spodesta i ribozimi dalla funzione di stampo di sé stessi*

In verità tutto partì da un evento apparentemente modesto ed insignificante: la comparsa di una proteina che catalizzava la trasformazione del ribosio in uno zucchero più semplice il desossiribosio. La differenza è veramente modesta: in pratica il desossiribosio ha un ossigeno in meno rispetto al ribosio. La disponibilità di questo nuovo zucchero permise la sintesi, oltre ai ribonucleotidi, anche dei deossiribonucleotidi e questo creò una enorme confusione. Da quel momento, infatti, gli enzimi che sintetizzavano acidi nucleici (l'RNA trascrittasi che permette la sintesi degli RNA operativi e l'RNA replicasi che produce copie degli RNA stampo e calco depositari dell'informazione genetica) ebbero a disposizione, oltre ai soliti ribonucleotidi, anche questi nuovi tipi di substrati.

L'RNA replicasi (che produce copie degli RNA depositari dell'informazione genetica) risultò preferire i nuovi precursori. Sotto la sua azione gli RNA a doppio filamento vennero copiati utilizzando i deossiribonucleotidi ed il prodotto non fu più l'RNA (Ribo Nucleic Acid) ma il DNA (Deossiribo Nucleic Acids) a doppio filamento. Da quel momento in poi, quindi, l'informazione genetica che venne data in dote alle cellule figlie non fu più contenuta in un RNA ma in un DNA. E l'RNA replicasi cambiò nome e divenne una DNA polimerasi.

Al contrario, i deossiribonucleotidi non piacquero all'altro enzima che sintetizza acidi nucleici (la RNA trascrittasi che permetteva la sintesi degli RNA operativi) che continuò come prima a sintetizzare mRNA, tRNA e rRNA. Per fortuna non disdegnò, come stampo, la nuova molecola che conteneva l'informazione genetica, il DNA. Essa divenne quindi una RNA polimerasi DNA dipendente.

Il risultato di questi cambiamenti fu un organismo vivente in cui l'informazione genetica era contenuta nel DNA, veniva trascritta nell'RNA e tradotta nelle proteine. Questo nuovo tipo di organizzazione dovette risultare talmente vantaggiosa che i mutanti soppiantarono ben presto quelli che erano allora i normali. Prova di ciò è il monopolio che il DNA esercita sul materiale genetico della stragrande maggioranza degli organismi oggi viventi. La ragione del successo evolutivo del DNA è presto detta: chimicamente questa molecola è molto più stabile e meno vulnerabile dell'RNA. Il DNA è quindi una miglior Banca in cui depositare il patrimonio di progetti faticosamente acquisito nel corso dell'evoluzione.

## DNA

Il DNA (Deossiribo Nucleic Acid) è la molecola responsabile della conservazione, della trasmissione e dell'espressione dei caratteri ereditari. Il DNA, è costituito da due catene polinucleotidiche ciascuna delle quali è un polimero formato dalla unione di nucleotidi. I nucleotidi presenti nel DNA hanno come zucchero il desossiribosio e come basi azotate le purine adenina (A) e guanina (G) e le pirimidine timina (T) e citosina (C). I desossiribonucleotidi possono essere raffigurati come l'unità strutturale di una scala: la base azotata piatta forma il gradino, al suo bordo sta attaccato, ad angolo retto, lo zucchero desossiribosio che svolge la funzione di montante e ad esso è legato il fosfato. I singoli nucleotidi si uniscono fra di loro a formare il polinucleotide grazie al fosfato che funziona da collante fra la parte bassa del montante del primo gradino e la parte alta del montante del gradino successivo. Ogni filamento ha quindi l'aspetto di una mezza scala a pioli con un asse portante costituito dal susseguirsi dei montanti incollati dai fosfati da cui sporgono, verso il vuoto, i gradini. Poiché le basi A e G sono fatte in modo da potersi incastrare rispettivamente con le basi T e C, la presenza di sequenze complementari nei due filamenti del DNA fa sì che essi si incollino formando una scala completa. Gli appaiamenti sono sempre fra una purina ed una pirimidina per cui la larghezza del gradino risultante è costante. La scala che si forma, la scala della vita come viene pomposamente definita da alcuni, è a chiocciola. I due assi portanti, infatti, non sono paralleli sullo stesso piano come in una normale scala a pioli ma sono avvitati in senso destrorso (direzione antioraria).

## LA CELLULA PRIMORDIALE

### ***Costruiamo l'astronave vivente***

Lo spontaneo assemblaggio dei nucleotidi in RNA, reazione che è alla base dell'origine della vita, avvenne per l'innata tendenza che ha l'universo a complicarsi l'esistenza! Infatti, l'universo che conosciamo è il frutto dell'evoluzione cosmica che lo ha plasmato dal Big Bang ad oggi: da energia pura a grumi di energia; da grumi di energia a grumi di materia; da grumi di materia ad atomi; da atomi a molecole; da molecole semplici a molecole più complesse come zuccheri, basi azotate, nucleotidi; da nucleotidi ad RNA; e perché no, dagli RNA agli RNA capaci di accelerare la velocità delle reazioni chimiche. La casuale sintesi, fra i tanti RNA, di uno in grado di fare copie degli RNA esistenti fu l'innescò di una catena di eventi che aprirono all'universo un nuovo campo di espansione: la vita. Grazie a quella scintilla si accesero nuovi fuochi: comparvero gli RNA a doppio filamento, gli RNA transfer, gli RNA ribosomiali, gli RNA messaggeri, le proteine, il DNA. Ogni volta che veniva sintetizzato un nuovo componente biochimico il sistema faceva un passo avanti sulla via della costruzione di una grande macchina in grado di funzionare, auto-costruirsi ed auto-duplicarsi: una macchina vivente. Questa macchina, come abbiamo visto, è costituita solo da molecole, cioè da componenti chimiche anche se complesse, ed è governata solo dalle leggi della chimica e della fisica. Essa non possiede, quindi, nulla di trascendente e di metafisico: è un puro fenomeno fisico. Questa constatazione, però, non è ovvia per tutti, anzi!

La maggior parte delle persone sono perplesse ed incredule e si pongono la domanda di come sia possibile che pezzi inanimati (le molecole) abbiano prodotto un fenomeno animato (la vita). In realtà il fenomeno vita non è che un esempio, certo un po' particolare e molto eclatante, di una condizione che si verifica costantemente nel nostro mondo. Siamo circondati, infatti, da macchine che sanno svolgere un compito pur essendo formate da pezzi che non ne sono in grado. Una automobile si muove, un aeroplano vola, una radio parla, un televisore trasmette immagini, un computer batte a scacchi il campione del mondo. Solo duecento anni fa queste macchine sarebbero state incomprensibili e sarebbero state ritenute frutto di un intervento sovranaturale. Al giorno d'oggi è a tutti evidente che ciò che esse fanno non è sovrumano ma è

la logica conseguenza del modo con cui sono stati assemblati i giusti componenti. Al giorno d'oggi è chiaro a tutti che è l'uso di pezzi specifici e la loro organizzazione che fa il miracolo!

Il miracolo vita non si sottrae a questa regola. Purtroppo, però, la scarsa conoscenza dei pezzi che costituiscono la macchina vivente e la complessità del modo con cui sono organizzati impedisce alla maggior parte di noi di comprendere la natura fisica di questo fenomeno e ci rende simili ad un uomo del settecento che cerchi di capire come funziona un'automobile senza conoscere cosa siano e come funzionino l'albero di trasmissione, il differenziale, il cambio, la frizione, il giunto elastico, gli iniettori, le camere di combustione, le centraline ed i sensori elettronici, le candele, la batteria ecc... Per superare questi oggettivi e formidabili ostacoli e capire come si ottiene il fenomeno fisico detto vita useremo un metodo poco ortodosso, un po' Socratico. Concentreremo la nostra attenzione sulla forma di vita "moderna" più semplice, la cellula primordiale, ed anziché smembrarla, per evidenziarne i pezzi che a stento riconosceremo e di cui faremo fatica a capire la funzione, la costruiremo, scoprendo così, con la logica, quali componenti deve avere per poter funzionare. Per non essere limitati nella nostra fantasiosa ricostruzione dalle scarse conoscenze di chimica, biochimica e biologia molecolare, sfrutteremo ancora una volta la somiglianza fra le macchine biochimiche e quelle meccaniche ed assembleremo una macchina meccanica vivente come modello della macchina biochimica vivente. Faremo concorrenza, quindi, ai tanti scrittori di fantascienza che da decenni si sforzano di immaginare una macchina in grado di funzionare, auto-costruirsi e auto-duplicarsi.

Perché questa nostra ricostruzione possa riuscire dobbiamo prima di tutto individuare una condizione ambientale che permetta ai pezzi ed alle strutture meccaniche che useremo di comportarsi e di muoversi con la stessa libertà con cui si muovono in natura i pezzi biochimici. Solo se si comporteranno allo stesso modo essi potranno generare strutture verosimilmente paragonabili. L'unico ambiente nel quale i pezzi meccanici hanno una mobilità simile a quella che hanno le molecole in acqua è lo spazio profondo, privo di gravità, in cui tutti gli oggetti galleggiano e, fluttuando, possono avvicinarsi ed interagire gli uni con gli altri.

In questo spazio siderale possiamo iniziare ad assemblare la nostra astronave!

### *La carrozzeria*

Cominciamo con il progettare la carrozzeria, cioè l'involucro che la avvolge e separa i suoi componenti dall'ambiente esterno. Non potrà certo essere un monoblocco rigido simile alla scocca di una automobile, di un aeroplano o di un sommergibile. Questo tipo di struttura, infatti, pur offrendo una buona protezione meccanica, ha un grave difetto per una struttura vivente: non cresce. I problemi che essa creerebbe sono esemplificati dalle peripezie che devono affrontare gli animali che, come l'aragosta, sono avvolti da un esoscheletro rigido. Il loro accrescimento è ostacolato da questa "corazza" e può avvenire solo quando essa è sottile e non sclerotizzata. Ciò si verifica in occasione dei fenomeni di muta, quando si forma una nuova cuticola di taglia maggiorata che sostituisce la vecchia.

La carrozzeria più funzionale e più adatta per una astronave vivente è una struttura modulare in cui i singoli componenti si attraggono reciprocamente e si incollano gli uni agli altri formando un grande guscio sferico. Questa struttura permette di aumentare la superficie del guscio senza distruggere la struttura originale grazie all'inserimento successivo di nuovi componenti. Essa permette, inoltre, una facile manutenzione poiché eventuali pezzi difettosi o usurati possono essere tolti e sostituiti con nuovi. La natura ha dotato la cellula primordiale di una membrana costruita secondo questo modello e composta da elementi modulari, i fosfolipidi, che accostandosi gli uni agli altri formano un doppio strato. Noi, per dotare la nostra macchina vivente meccanica di una simile carrozzeria, immaginiamo di utilizzare delle piastre di metallo calamitate.

Poiché la capacità di auto-costruirsi è una delle caratteristiche che qualificheranno come vivente la macchina meccanica che stiamo costruendo, dobbiamo da subito porci il problema di come essa possa costruire il guscio che le assicura protezione. Il tipo di modulo che abbiamo ipotizzato, la piastra calamitata, rende intuibile il meccanismo finale di auto-assemblaggio. Non è per nulla evidente, invece, come la nostra macchina si procuri le piastre calamitate. Una ipotesi realistica è che se le costruisca utilizzando materiali ferrosi che ha recuperato dall'ambiente; un'altra ipotesi un po' più utopistica è che li introduca dall'esterno già preformati. In entrambi i casi la nostra macchina deve essere in grado di trasportare all'interno della propria struttura il materiale che le è necessario per costruire sé stessa. A questa necessità

fondamentale si oppone il guscio che abbiamo appena costruito che impedisce l'approvvigionamento di materie prime e di vettovaglie e l'eliminazione di prodotti di rifiuto.

### *Le porte*

Perciò, affinché la carrozzeria della nostra macchina sia compatibile con la vita dobbiamo fare qualche modifica, ad esempio inserirvi delle strutture che, come porte, permettano di effettuare gli scambi con l'esterno. Per essere funzionali ai compiti che devono svolgere, queste porte devono essere in grado di riconoscere i rottami che costantemente collidono con il guscio (ricordiamoci che siamo in assenza di gravità) distinguendo quelli utili da quelli inservibili o dannosi. Questo non è un compito facile e impone che le porte non siano semplici buchi nella carrozzeria ma delle entità selettive capaci di svolgere almeno due funzioni: percepire qualche caratteristica che identifichi il rottame e, nel caso sia gradito, rispondere ad essa con l'attivazione del meccanismo che ne permette il trasferimento.

Avendo definito cosa le nostre porte devono saper fare cerchiamo ora di immaginare come devono essere per riuscire a farlo. La loro struttura di base potrebbe essere quella di un tunnel che collega l'interno all'esterno ed il cui libero transito è impedito da un diaframma che di fatto lo occlude. E' necessario, quindi, un congegno che ne controlli l'apertura e che potrebbe essere simile a quello della chiave e della serratura. Ogni tunnel, alla propria imboccatura, dovrebbe avere un sensore-serratura sensibile ad un particolare materiale (ferro, rame, vetro, plastica, legna, carbone ..) o ad una particolare forma (Fiat Uno, Renault 5, Citroen 206 ..). L'interazione del sensore con l'oggetto-chiave specifico per lui determina l'apertura del diaframma ed il passaggio dell'oggetto attraverso il tunnel; avvenuto il passaggio, il diaframma si richiude. La presenza di questi trasportatori un po' particolari renderebbe possibile il trasferimento dei materiali giusti nella giusta direzione. La selezione del giusto materiale avverrebbe grazie alla diversa sensibilità del sensore-serratura di cui sarebbe dotato ogni tunnel. Dovrebbero perciò esserci trasportatori specifici per il vetro, per il ferro ecc. La giusta direzione del trasporto, dall'interno all'esterno o viceversa, potrebbe essere ottenuta grazie alla localizzazione della zona serratura all'una e/o all'altra estremità del tunnel. La presenza della maniglia su una sola faccia di una porta permette, infatti, di controllare la direzione di movimento dei materiali.

Quanti film abbiamo visto in cui il nostro eroe entra tranquillamente in una automobile ma non ne può più uscire perché manca la maniglia interna!

Quanti trasportatori sono necessari per introdurre le materie prime da cui ricavare le piastre per la copertura? Apparentemente i pochi specifici per questi materiali. Ma a ben riflettere il numero di trasportatori che ci occorrono è molto più alto. Infatti, per raggiungere lo scopo che c'eravamo prefisso, abbiamo dovuto inventare delle strutture, i trasportatori appunto, che a loro volta devono essere costruiti. Anche per la loro sintesi sono necessari materiali che si devono ricavare dall'esterno e che per entrare hanno bisogno di altri specifici trasportatori. Inoltre, sia per i trasporti che per la sintesi dei trasportatori è richiesta dell'energia che dovrà essere ricavata da combustibili introdotti dall'ambiente esterno; anche per la loro captazione saranno necessari trasportatori specifici.

Sono quindi parecchi i trasportatori necessari per l'introduzione dei materiali che permettono la costruzione delle piastre di copertura. Poiché un numero paragonabile di trasportatori è richiesto per la costruzione di ogni altro componente cellulare e poiché, presumibilmente, i componenti indispensabili alla vita della cellula sono molti, se ne deduce che il numero di trasportatori di cui dobbiamo dotare la nostra macchina non è piccolo. Dell'ordine almeno delle centinaia!

Per la presenza di tutti questi trasportatori, la superficie della nostra macchina ha perso il bell'aspetto liscio e lucido del guscio che avevamo originariamente immaginato per assumere quello più accidentato e scabroso che hanno, nei film di fantascienza, le superfici delle navi spaziali aliene. Ma, a differenza di queste che intrattengono ben pochi rapporti con il vuoto siderale dal quale sono circondate, la superficie della nostra astronave è indaffarata ad inglobare con le sue innumerevoli "bocche" i materiali con i quali accidentalmente collide. Infatti lo spazio della nostra simulazione è ben diverso dalle fredde profondità celesti. Esso è paragonabile all'ambiente acquoso nel quale viveva la cellula primordiale: un ambiente ricco di una moltitudine di molecole che potevano essere utilizzate sia come materie prime che come combustibile. Solo muovendosi in un ambiente simile la nostra astronave può procurarsi i materiali che le consentono di auto-costruirsi e mantenere funzionale la propria struttura, cioè di vivere.

Abbiamo fin qui costruito il guscio protettivo della nostra macchina dotandolo delle strutture che permettono gli scambi con l'ambiente esterno. Il compito che ci apprestiamo ad affrontare

ora è ancora più arduo: riempire l'enorme ventre vuoto con i pezzi che consentiranno alla macchina di divenire vivente. Per farlo, cercheremo di immaginare quali possano essere le funzioni necessarie ed indispensabili per la vita, di ipotizzare in quale modo possono essere svolte e di inventare gli strumenti che le possono svolgere.

### *Come procurarsi energia e pezzi utilizzabili partendo dal materiale introdotto*

La prima cosa che la nostra macchina deve essere in grado di fare è smembrare i materiali che ha introdotto per ottenere da essi tutti i componenti che possono essere riutilizzati. Deve cioè svolgere una azione di riciclaggio come gli sfascia carrozze che recuperano dalle automobili in demolizione tutto ciò che è ancora servibile. Questo tipo di attività nel nostro mondo è estremamente marginale a causa del tipo di strategie produttive della nostra industria che ha basato il proprio sviluppo non sulla ottimizzazione dei prodotti ma sulla loro diversificazione. Ciò ha comportato, quasi sempre, una enorme diversificazione della componentistica per cui i nostri apparecchi sono costituiti da un numero estremamente elevato di pezzi diversissimi fra di loro il cui utilizzo è specifico e finalizzato. Pensate alla vite, uno dei pezzi meccanici più semplici, più diffusi ed apparentemente meno diversificabili. Ebbene ce ne sono migliaia di tipi che differiscono per il materiale di cui sono costruite (acciaio, ferro, rame..), per la lunghezza ed il diametro (da pochi millimetri a diversi centimetri), per tipo di utilizzo (a metallo, a legno, auto-filettanti), per il passo della filettatura, per il tipo di taglio (a cacciavite, a croce..), per il tipo di testa (esagonale, a brugola, cilindrica, a goccia di sego...). A causa di questa varietà è raro che le viti che si ricavano dallo smantellamento di un apparecchio possano essere riutilizzate per la costruzione di un altro. Per i pezzi più particolari, poi, il riciclaggio è quasi impossibile a meno che non li si riusi per la stessa macchina. Ad esempio, i vetri di una automobile modello Panda non possono essere usati che per un'altra Panda.

Le piccole molecole di base che costituiscono gli organismi viventi, invece, sono relativamente poche e l'enorme numero di molecole complesse esistenti è il frutto del diverso modo in cui esse sono assemblate. L'assemblaggio e la componentistica della vita sono quindi paragonabili a quelli del gioco del Meccano in cui è possibile costruire moltissime strutture diverse fra di loro usando un numero limitato di tipi di pezzi. E' su questo tipo di strategia che si basa

l'alimentazione, il caso più generale di cannibalismo: pezzi di pollo o di insalata possono essere smembrati nei loro componenti semplici e riusati per costruire un uomo.

Perché possa verificarsi questo riciclaggio, la nostra astronave deve essere in grado di smembrare, nei pezzi che li compongono, i vari e diversi rottami che ha ingerito. Questa operazione è abbastanza banale se svolta da un essere intelligente che ha a disposizione un po' di attrezzi. Anch'io sarei in grado di capire cosa devo fare, scegliere gli attrezzi giusti per farlo e portare a termine l'operazione; e potrei indifferentemente smontare anche oggetti molto diversi fra loro. Ma l'astronave che stiamo costruendo non sarà un essere intelligente e non avrà neppure a disposizione esseri intelligenti da far lavorare! Sarà solo un enorme macchina formata dall'assemblaggio di macchine che operano in modo meccanico! Come potremo far sì che essa sia in grado di riconoscere rottami diversi ed attuare, per ognuno di essi, le corrette procedure che portano al loro totale o parziale smembramento?

### *Le catene di smontaggio*

Per risolvere questo problema fino a poco tempo fa avremmo dovuto fare concorrenza a Jules Verne, un grande ideatore di macchine avveniristiche. Ma oggi giorno ciò non è più necessario poiché queste macchine esistono già. Sono tante le fabbriche all'avanguardia che non basano più la propria attività produttiva sulla intelligenza e la creatività dei propri operai ma su un patrimonio di macchine utensili tecnologicamente molto avanzate. Ognuna di queste macchine è in grado, senza l'intervento umano, di riconoscere il pezzo su cui lavorare. Questo risultato viene ottenuto utilizzando delle specie di setacci con fori di forma appropriata che fanno passare all'interno della macchina solo i pezzi "giusti". Il pezzo selezionato, nel procedere verso il cuore della macchina, viene guidato da opportune protuberanze ed incavi che gli fanno assumere l'orientamento corretto. Raggiunta la giusta posizione, il pezzo, come fosse un interruttore, attiva la macchina e le fa eseguire l'operazione che la caratterizza. Benché l'operazione che ciascuna macchina svolge sia molto semplice, il risultato globale ottenuto in queste fabbriche è spesso molto complesso. Ciò è reso possibile dalla partecipazione al processo produttivo di più macchine diverse fra di loro per il pezzo su cui agiscono e per l'operazione che eseguono su di esso. Normalmente esse messe in modo che il prodotto di una sia il "substrato" di un'altra. Grazie a questa strategia di segmentazione e concatenazione di diverse semplici operazioni i

semilavorati passano dall'una all'altra fase, fino al raggiungimento del complesso risultato desiderato.

Per raggiungere il nostro scopo possiamo dotare la nostra astronave di macchine di questo tipo. Possiamo quindi immaginare che la nostra astronave abbia, all'interno del proprio grande ventre, le macchine utensili necessarie per smembrare tutti i tipi di rottami che costituiscono il suo "cibo". Poiché sono parecchi, si può prevedere che avrà bisogno di un bel numero di catene di smontaggio; e poiché ciascuna catena di smontaggio dovrà compiere parecchie operazioni è prevedibile che, in totale, il numero di macchine utensili necessarie alla nostra astronave sarà molto elevato. Ma quanto elevato?

Per rispondere bisogna prima di tutto sottolineare che, se la vita avesse seguito le strategie produttive utilizzate dalla nostra industria non ne sarebbe mai uscita "viva"! Infatti sarebbe stata costretta ad avere una catena di smontaggio per ogni variante dei milioni di tipi e modelli di beni prodotti dalle centinaia di migliaia di ditte produttrici di tutto il mondo. Ma, come abbiamo detto, in natura la elevata standardizzazione della componentistica ha, di fatto, impedito la folle diversificazione dei prodotti e quindi dei loro rottami. Malgrado questa semplificazione l'astronave ha pur sempre bisogno di qualche migliaio di macchine utensili per "digerire".

Fra i prodotti che si ricavano dalla degradazione dei rottami non ci sono solo componenti semplici (viti, piastre, spiagge forate..) o pezzi ancora abbastanza complicati che possono venire riutilizzati come tali (scatola di riduzione, tralicci ancora assemblati..). Un altro importante prodotto è parte dell'energia che era stata utilizzata per unirli. Infatti, a differenza di quello che succede in meccanica, in chimica l'energia che è immagazzinata nei legami chimici e che si libera quando essi sono scissi, può essere parzialmente recuperata. Per meglio visualizzare questo concetto, che non è immediato, possiamo immaginare che la forza che tiene uniti i pezzi di un rottame siano della colla. Se per unirli ne era bastata un filo, al momento della separazione la colla non può più essere più recuperata. Se, invece, ne era stata utilizzata una grossa quantità, parte di essa può venire tolta e immagazzinata in appositi contenitori. La colla/energia è quindi un prodotto della degradazione che potrà essere riutilizzata per unire altri pezzi e nella cellula viene immagazzinata nella molecola di ATP.

L'insieme delle operazioni che permettono alla nostra astronave di ottenere dai rottami sia pezzi che energia per le proprie esigenze è detto catabolismo.

### Catabolismo

Il catabolismo è l'insieme delle reazioni degradative, dette cataboliche, che scindono i legami chimici delle molecole e forniscono così alla cellula sia l'energia sia le piccole molecole che le sono necessarie per vivere.

### *Le catene di montaggio*

Tutte le funzioni di cui stiamo dotando la nostra astronave, se ricordate, sono finalizzate all'ottenimento dei materiali per la costruzione delle strutture proprie dell'astronave stessa, a cominciare dall'involucro esterno. Per la sua realizzazione abbiamo inventato delle piastre magnetiche che surrogano le vere piastre biochimiche, i fosfolipidi. I fosfolipidi sono molecole abbastanza complesse formate dall'unione di quattro o cinque molecole più semplici ciascuna delle quali, a sua volta, contiene nella propria struttura più di una molecola di base. Anche il contenitore che conserva la colla, l'ATP, è una molecola molto complessa. E non sono certo semplici gli amminoacidi, le molecole di cui sono formate le macchine utensili che abbiamo inventato. Per costruire tutti questi componenti, fondamentali per la struttura ed il funzionamento dell'astronave, dobbiamo dotarla delle macchine utensili che li assemblano. Il loro numero non potrà essere piccolo poiché ognuna di queste molecole è un oggetto composito e per la sua costruzione, come del resto per la costruzione di tante altre molecole essenziali di cui non abbiamo ancora parlato, sono necessarie molte macchine che montano i componenti e li uniscono nei prodotti finali. Considerando il numero delle molecole di cui l'astronave ha bisogno e quante reazioni sono necessarie per la loro sintesi (reazioni anaboliche), si può stimare in alcune migliaia di unità il parco macchine richiesto.

### Anabolismo

L'anabolismo è l'insieme delle reazioni di sintesi, dette reazioni anaboliche, che permettono di ottenere le molecole di cui la cellula ha bisogno per vivere. Queste reazioni utilizzano molecole ed energia ricavate dalle reazioni degradative.

Concedetemi, a questo punto, una breve pausa di riflessione. Quando ho cominciato a parlare di come è organizzata e di come funziona la vita, vi aspettavate una trattazione molto complessa. Dopo qualche paginetta, avete invece scoperto che costruire una macchina vivente è quasi

banale: bastano alcune migliaia, probabilmente non più di una decina di migliaia, di macchine utensili in grado di introdurre materiali utili, di estrarre da essi energia e componenti di base, di usare questi prodotti per costruire sé stessa. Questa inaspettata rivelazione vi ha certamente lasciati perplessi ed increduli poiché contrasta con il mondo della nostra tecnologia: un mondo pieno di milioni di tipi di macchine e che, malgrado questo, è tutto fuorché vivo.

Una domanda sorge spontanea: come è possibile che noi, con la nostra intelligenza, non siamo stati capaci di ottenere il risultato che nel corso dell'evoluzione è stato raggiunto, per caso, in modo puramente biochimico-meccanico? A cosa è dovuta questa nostra incapacità di realizzare la vita? Per poter rispondere bisogna prima identificare quali sono state le mosse vincenti che hanno consentito alla natura di costruire, con poche migliaia di macchine, una entità capace di auto-assemblarsi, di mantenere funzionante la propria struttura e di duplicarsi.

La prima mossa è stata l'uso di un numero limitato di componenti di base (ad esempio tutte le macchine cellulari sono costruite usando solo venti tipi di pezzi, gli amminoacidi, cosa che non si può certo dire delle nostre macchine!). Questa "scelta minimalista" ha enormemente condizionato la strategia costruttiva del mondo della vita. Essa, da una parte, ha permesso di limitare in modo drastico il numero di macchine utensili necessarie per la costruzione dei pezzi (pochi pezzi = poche macchine per costruirli). Dall'altra, ha di fatto impedito la costruzione di una pleora di macchine varianti che svolgono la stessa funzione. Avendo a disposizione solo pochi tipi di pezzi è infatti già un miracolo se si riesce a costruire una automobile, figuriamoci se se ne possono fare diversi modelli (Panda, Uno, Tipo, Megane, Golf ecc.). Ci sarà, quindi, una unica automobile: l'Automobile con l'A maiuscola! Da questa "sobrietà" è derivata anche la possibilità di riciclare la quasi totalità dei componenti di base. La logica costruttiva che ne è risultata può essere definita "globale": si chiude un occhio sull'efficienza produttiva di una singola macchina purché il sistema produttivo nel suo complesso sia efficiente.

Ben diversa è la situazione nel mondo della nostra produzione. Qui l'obiettivo che i costruttori si pongono è il massimo profitto e questo condiziona le strategie industriali. Poiché non si possono vendere macchine meno efficienti di quelle della concorrenza, grandi sforzi vengono fatti per inventare nuovi componenti di base che le rendano migliori. Il conseguente aumento del tipo e numero di componenti amplifica esponenzialmente, oltre al numero delle macchine che possono venire prodotte, anche quello delle macchine produttrici dei pezzi. Senza contare che questa

strategia industriale impedisce il riciclaggio dei componenti. Il porre l'efficienza della singola macchina al centro del modello produttivo ha, di fatto, impedito quella "semplificazione" e globalizzazione che sono i pilastri portanti dell'auto-costruzione. A questo punto la vita, che ci appariva tanto complessa ed inspiegabile, non solo risulta essere molto più semplice del previsto ma anche più semplice della realtà che ci circonda.

Questa scoperta, però, non ci deve entusiasmare troppo perché siamo solo a metà della costruzione della nostra macchina vivente. Infatti, alla astronave, per divenire viva, manca ancora qualcosa: le stesse macchine utensili di cui abbiamo ipotizzato l'esistenza. E per averle bisogna costruirle.

### *Come costruire le macchine utensili*

Costruire una macchina non è facile poiché è durante questa fase che viene organizzata la struttura tridimensionale che le conferisce specifiche funzioni. Tutti sanno che è il diverso modo con cui si uniscono i pezzi del Meccano, durante la costruzione, che permette di ottenere o una automobile o una gru o un mulino a vento. La struttura della macchina che si desidera viene, in genere, imposta unendo ad un pezzo centrale tutti gli altri componenti, in un processo centrifugo fatto per mezzo di successive aggiunte. Con questa tecnica viene fissata, già durante la costruzione, la posizione che ogni singolo componente avrà nella fase di funzionamento. Questo approccio costruttivo genera delle notevoli complicazioni sia nella progettazione sia, ed è questo che a noi soprattutto interessa, nella fase di traduzione del progetto nella pratica. Per capirci meglio facciamo un esempio noto a tutti: il montaggio di un mobile "fai da te". Il "piano di costruzione" è costituito da una serie di figure che mostrano i pezzi da usare ed il punto in cui debbono essere fissati. Se l'assemblaggio viene affidato ad un essere intelligente, egli è in grado di eseguire tutte le operazioni, per quanto diverse possano essere, e di eseguirle nel giusto ordine. Se invece ci si affida alla meccanica, la cosa è molto più complessa. Infatti servono parecchie macchine utensili, ciascuna in grado di eseguire una delle tante operazioni necessarie, ed esse devono essere disposte sequenzialmente. Ciò permette non solo di eseguire le operazioni giuste ma anche di eseguirle nel giusto ordine. In pratica occorre una catena di montaggio. Questo modo di realizzare il progetto, cioè di tradurlo in pratica, ha un'altra importante conseguenza. E' evidente a tutti che, mentre un unico essere intelligente è in grado di montare

tutta la gamma dei mobili “fai da te” offerti dal mercato, per il loro montaggio meccanico è necessaria una catena di montaggio diversa per ciascuno di essi.

Se la vita, che non è intelligente ed usa soluzioni meccaniche per risolvere i propri problemi, usasse la nostra strategia di progettazione e di costruzione meccanica, ancora una volta non ne uscirebbe “viva”. Infatti, per costruire ogni sua macchina, ad esempio un trasportatore, dovrebbe fornirsi di tutte le macchine che costituiscono la sua catena di montaggio. E non credo sfugga a nessuno che per la costruzione di ognuna di queste macchine utensili servirebbe una catena di montaggio formata da macchine utensili per la cui costruzione servirebbe una catena di montaggio.... e così via in un processo esponenziale!

Per non cadere in questa trappola infernale bisogna rivoluzionare il modo di assemblare le macchine: non più unendo i pezzi nelle tre dimensioni ma in una sola dimensione! In pratica, per la costruzione delle macchine della nostra astronave/cellula i pezzi/amminoacidi vengono uniti sequenzialmente gli uni agli altri, in linea retta come per formare una collana di viti, piastre, bulloni ecc.. La struttura tridimensionale definitiva della macchina viene assunta successivamente per effetto del ripiegarsi spontaneo della collana su sé stessa. I ripiegamenti sono resi possibili dalle caratteristiche dei singoli pezzi impiegati che si attraggono o respingono mutuamente quando la collana si muove liberamente nello spazio (ricordate che stiamo lavorando, in assenza di gravità, nella profondità dello spazio). Collane diverse per lunghezza e per ordine dei pezzi assumono una diversa struttura tridimensionale e danno quindi origine a macchine utensili in grado di svolgere diverse funzioni. In grande, questo sistema somiglia all’origami, cioè alla tecnica di ottenere forme diverse ripiegando in modo diverso un foglio di carta. Mentre nell’origami siamo noi che decidiamo quanto e dove piegare la carta, nella collana sono i diversi pezzi che, a seconda della propria natura, impongono quanto e, a seconda della propria posizione, impongono dove far avvenire la piegatura. Sembra incredibile ma funziona!

Questo rivoluzionario modo di costruire permette di semplificare la progettazione, la realizzazione del progetto e le strutture che sono necessarie. Il piano di costruzione, infatti, non è più costituito da una serie di figure ma da un semplice elenco che riporta l’ordine di successione dei pezzi (dadi, piastre, viti ecc) nella collana. Per la sua realizzazione è sufficiente unire i pezzi nell’ordine riportato dal progetto. Una unica catena di montaggio, capace di compiere questa operazione, può costruire qualunque macchina, anche tutte quelle che la

costituiscono e la costruiscono. Le diverse macchine si possono ottenere semplicemente unendo in un ordine diverso i pezzi.

La macchina che compie questa operazione di unione “ordinata” dei pezzi deve essere guidata da qualcosa che impartisce quell’ordine. Questo sistema costruttivo richiede degli speciali apparati meccanici per essere messo in pratica. E non dobbiamo neanche sforzarci troppo per inventarli perché già esistono nel nostro mondo. Ad esempio, ci sono le macchine controllate da rulli o da schede perforate che eseguono operazioni rispondendo a istruzioni date in sequenza. Nelle pianole a manovella, ad esempio, l’ordine di percussione dei tasti è impartito dalla successione dei fori praticati sul rullo che è mosso dalla manovella. La corrispondenza fra il susseguirsi dei fori sul rullo e l’abbassamento dei tasti per le note corrispondenti fa sì che la pianola suoni il motivo musicale stabilito. Le pianole, come le macchine che a noi interessano, pur compiendo un’unica operazione meccanica (abbassare un certo tasto) sono in grado di suonare motivi molto diversi se fornite di rulli diversi. In queste macchine i rulli perforati svolgono, quindi, la funzione di piani di esecuzione. Un altro esempio è fornito dalle vecchie macchine per la tessitura della seta. I vari disegni del damasco erano ottenuti intrecciando l’ordito e la trama secondo schemi ben precisi. Il movimento dei licci era controllato da lunghe schede perforate che costituivano il piano di esecuzione.

### *I piani di costruzione*

Abbiamo visto come, nella cellula, il depositario dell’informazione per la costruzione delle proteine sia l’RNA messaggero, un lungo polimero costituito dal susseguirsi di quattro diversi nucleotidi. E’ questa struttura il piano di costruzione delle macchine cellulari! E’ il susseguirsi dei nucleotidi nel RNA messaggero che ordina di posizionare un certo amminoacido, come nelle pianole è il susseguirsi dei fori nelle schede che ordina di abbassare un certo tasto.

Nella costruzione meccanica della nostra astronave vivente possiamo immaginare che le funzioni dei diversi RNA messaggeri siano svolte da strutture che assomigliano alla catena di una bicicletta. Queste catene snodate sono formate dall’unione successiva di quattro tipi di maglie (i nucleotidi) che si diversificano fra di loro per una caratteristica dentatura. Combinando in vario modo le maglie è teoricamente possibile ottenere un numero infinito di catene diverse fra di loro. E’ la diversa successione delle dentature in queste catene che porta l’informazione e

ordina i tipi di pezzi (dadi, piastre, viti ecc) da inserire nella collana in costruzione. La Catena di Montaggio con la C e la M maiuscole, cioè la struttura che permette di “leggere” l’informazione contenuta nella catena da bicicletta e di eseguire gli ordini che essa impartisce, è ovviamente complessa dovendo possedere tutte le macchine necessarie per la corretta esecuzione di questo compito fondamentale per il funzionamento e l’esistenza stessa della nostra astronave. Le sue parti essenziali sono un piano su cui viene fatta scorrere la catena da bicicletta (funzione che nella cellula vera è svolta dal ribosoma), dei sensori (gli RNA transfer) che riconoscono il susseguirsi delle dentellature e rispondono ad esse fornendo i pezzi complementari (gli amminoacidi), ed una pinzatrice che unisce fra di loro i pezzi successivamente aggiunti (attività svolta dal ribosoma). Ogni collana ottenuta si ripiega, poi, in un modo suo proprio che le fa assumere la conformazione tridimensionale adatta a svolgere la funzione che la caratterizza.

Grazie a questa diversa strategia di progettazione e di costruzione la nostra astronave vivente è in grado di produrre tutte le macchine di cui ha bisogno sia per costruire sé stessa sia per mantenere funzionanti le proprie strutture. Spero che stiate sempre più apprezzando la semplicità della vita!

Per essere “viva”, però, all’astronave manca un’ultima cosa: la capacità di duplicarsi, cioè di costruire una astronave figlia identica a sé. A dire il vero, poiché è in grado di fare tutti i propri pezzi di base e tutte le proprie macchine, nulla osta che li faccia doppi e ne destini metà alla costruzione della propria copia. Purtroppo, questo non è sufficiente! Infatti, per rendere l’astronave figlia identica a sé deve anche fornirle dei piani di esecuzione delle macchine; deve perciò dotarla di una copia delle catene da bicicletta. E non abbiamo ancora inventato un modo per costruirle!

### *I progetti e la loro duplicazione*

La soluzione di questo problema, dopo aver superato problemi di ben altra complessità, appare, sia concettualmente che materialmente, banale! Basta inventare due sole nuove macchine: una capace di fare un calco di ogni singola catena da bicicletta e l’altra che utilizza tale calco per fare copie della catena originale. Dal punto di vista operativo l’assemblaggio di queste successive copie è abbastanza facile. Basta avere a disposizione quattro nuove maglie con dentature complementari a quelle delle maglie che costituiscono le catene da bicicletta. Anzi, a

pensarci bene, non sono neppure necessarie quattro nuovi tipi di maglie. Si può ottenere lo stesso risultato se le quattro maglie originali (i nucleotidi) sono a due a due complementari! Le macchine posizioneranno di fronte a ciascuna maglia della catena stampo la maglia complementare; disposte le maglie corrette basterà unirle. Questo piccolo trucco permette di risparmiare sui pezzi, cosa gradita nel mondo della vita!

Durante questo processo abbiamo prodotto, en passant così quasi senza farci caso, una nuova struttura di grande importanza per la nostra astronave: il calco di tutte le catene da bicicletta. Questo calco, che sembrerebbe una semplice ciliegina sopra la torta, in realtà è la chiave di volta di tutto l'edificio che abbiamo costruito! Infatti, essendo fisicamente la matrice, lo stampo dei piani di costruzione (RNA messaggeri) di tutte le macchine cellulari (proteine), può considerarsi il loro progetto. In tutte le industrie manifatturiere, però, gli stampi sono un patrimonio prezioso e vengono costruiti con materiali molto robusti e difficilmente deteriorabili. Anche alla nostra astronave conviene depositare il proprio "know how" in una catena assemblata utilizzando maglie al cromo/vanadio (desossiribonucleotidi del DNA) anziché le solite maglie d'acciaio (ribonucleotidi del RNA). Per proteggere ulteriormente le dentellature, che sono cruciali per la trasmissione dell'informazione, è anche vantaggioso imballarle utilizzando una struttura complementare. Ed una catena complementare fatta dello stesso materiale è molto meglio di un semplice imballaggio di polistirolo. Questa doppia catena che abbiamo costruito ha la struttura che le consente di svolgere, nell'astronave, la stessa funzione svolta nella cellula dal DNA: contiene l'informazione per costruire, far funzionare e duplicare una macchina vivente. Essa è, infatti, il progetto per la costruzione di tutte le macchine che abbiamo fin qui inventato per rendere realizzabile la vita.

Come il DNA, la doppia catena da bicicletta in cromo/vanadio è il progetto per la costruzione:

- a) dei trasportatori (le macchine utensili che sono in grado di introdurre nell'astronave i materiali utili);
- b) delle proteine del catabolismo (le macchine capaci di estrarre dai materiali utili introdotti l'energia ed i vari componenti di base);
- c) delle proteine dell'anabolismo (le macchine capaci di usare l'energia ed i vari componenti di base per costruire tutti i pezzi necessari all'assemblaggio ed al funzionamento dell'astronave);

- d) delle proteine del ribosoma (le macchine che, nel loro insieme, formano la catena di montaggio di tutte le macchine dell'astronave);
- e) delle proteine che, copiando il DNA stesso (lo stampo-progetto), sintetizzano i piani di produzione di tutte le macchine dell'astronave (le catene da bicicletta-RNA messaggeri);
- f) delle proteine che sintetizzano il DNA, cioè delle macchine capaci di fare copie dello stampo-progetto dell'astronave.

Si configura in questo modo il cosiddetto “dogma centrale” secondo il quale l'informazione contenuta nel DNA serve per formare gli RNA messaggeri che servono per formare le proteine che svolgono i diversi compiti (trasporti, degradazione di materiali, sintesi di componenti, sintesi di macchine, sintesi di piani di esecuzione) che, in ultima analisi, consentono di sintetizzare i pezzi che servono per costruire il DNA. Si chiude, così, il cerchio che consente l'auto-costruzione, l'auto-funzionamento e l'auto-duplicazione che caratterizzano la vita!

Ogni nuova astronave riceverà in dote una copia della doppia catena ed anch'essa diverrà viva!

### ***Ottimizziamone il funzionamento***

#### ***L'economicità***

Costruendo la nostra macchina vivente abbiamo visto come doveva essere fatta la cellula primordiale, la forma più semplice di organismo vivente. Ci siamo anche resi conto di come la sua esistenza sia stata resa possibile dall'adozione del principio dell'economicità. Il risultato finale che è stato ottenuto, a ben pensarci però, è lungi dall'essere economico!

Abbiamo detto, infatti, che nella cellula tutta l'informazione genetica contenuta nel DNA viene trascritta negli RNA messaggeri e tradotta nelle proteine che fanno funzionare la cellula. I meccanismi molecolari di cui si avvalgono la trascrizione (sintesi degli RNA messaggeri) e la traduzione (sintesi delle proteine) sono meccanismi generali, sono cioè validi per tutti i geni.

#### **Gene**

Un gene è l'unità fondamentale dell'informazione per la costruzione degli organismi viventi. Un gene è definito biochimicamente come quel segmento di DNA che porta l'informazione necessaria per ottenere un prodotto biologico funzionante, sia esso una proteina o un RNA.

Teoricamente, quindi, tutti i geni hanno uguali possibilità di essere trascritti e tradotti. Questa assenza di ogni discriminazione comporterebbe la contemporanea sintesi di tutte le proteine della cellula in un numero uguale di copie. Poiché la sintesi di una proteina è un processo che richiede un grande dispendio di energia, la costante sintesi di tutte le proteine drenerebbe una buona parte delle risorse della cellula. A fronte di questi pesanti costi vi sarebbe il costante inutilizzo o il sotto utilizzo di molte di esse. Un caso esemplare si potrebbe verificare se la “dieta” fosse costituita quasi esclusivamente di Uno: i trasportatori e le catene di smontaggio delle Panda diverrebbero preda della ruggine.

Apparentemente, quindi, l'economicità, che è stata fondamentale per la costruzione della cellula, sembra essere assente nella sua gestione! L'economicità di gestione, infatti, è incompatibile con un principio fondamentale al quale la cellula deve sottostare per vivere: la flessibilità.

### *La flessibilità*

Per flessibilità si intende la capacità dell'organismo di affrontare ogni evenienza adattandosi alle possibili variazioni dell'ambiente esterno. La flessibilità è possibile se l'organismo ha a disposizione tutte le macchine proteiche che gli permettono di svolgere le reazioni chimiche necessarie ad affrontare e risolvere le diverse situazioni che incontra. Come abbiamo già puntualizzato, però, il principio della flessibilità (avere tutte le macchine che prima o poi saranno necessarie) non è certo in accordo con il principio della economicità (avere solo le macchine che servono in un certo momento).

Avendo ormai capito che l'economicità è uno degli irrinunciabili pilastri su cui si fonda la realizzazione della vita, non sorprende che si siano evoluti dei sistemi per far convivere la capra con i cavoli, l'economicità con la flessibilità!

Se si considera il modo con cui è conservata ed utilizzata l'informazione necessaria per la costruzione delle macchine cellulari ci si rende conto di come l'incompatibilità fra flessibilità ed economicità sia superabile. Infatti, poiché la cellula ha a disposizione sia i progetti di tutte le proprie macchine (i geni) sia le strutture necessarie per assemblarle (rRNA, tRNA, mRNA) essa è in grado di costruirle tutte in qualunque momento. Quindi le ha anche quando fisicamente non le ha! Poiché questo equivale a dire che la cellula possiede sempre tutte le proprie macchine, essa è flessibile! Come può essere anche economica? Basta che abbia un sistema che le

permetta di mettere in produzione solo le macchine di cui ha effettivamente bisogno in un dato momento. Perciò, per poter gestire in modo sia flessibile che economico le attività della cellula, è sufficiente inventare un meccanismo di regolazione che “blocca” o “sblocca” i geni producendo in ogni istante solo le macchine necessarie fra le tante disponibili sul “menù”.

Purtroppo questa regolazione non è favorita dal modo in cui l’informazione genetica, nella sua totalità, è organizzata nella cellula. Infatti, le informazioni per le diverse proteine non sono separate in migliaia di corte molecole di DNA ma sono unite a formare un lunghissimo filamento. Da questo punto di vista, il DNA è paragonabile ad un disco long play che accoglie diversi brani musicali uno di seguito all’altro. Questo tipo di organizzazione fornisce dei vantaggi nell’immagazzinamento delle informazioni ma crea dei problemi durante il loro utilizzo. Il susseguirsi delle diverse canzoni sul long play rende difficoltoso il recupero di una canzone localizzata in una zona centrale del disco. E’ assai difficile posizionare la puntina del giradischi proprio nel punto iniziale della canzone e spesso capita o di ascoltare la coda della canzone precedente o di perdere l’inizio di quella che si desidera. Questo non è grave nel caso dell’ascolto del disco ma essenziale nel caso dell’uso dell’informazione genetica. Infatti se si trascrive un segmento di DNA eccedente o carente rispetto a quello che contiene l’informazione per la proteina, l’RNA messaggero ottenuto contiene un eccesso o un difetto d’informazione. Questo comporta la costruzione di una proteina più lunga o più corta del normale che difficilmente si ripiega nel modo giusto e quindi non è in grado di svolgere la propria funzione. Perché l’informazione contenuta nel DNA sia utilizzata correttamente è necessario che l’inizio dei geni sia facilmente distinguibile. Nel disco, l’inizio di un motivo si vede per la presenza di una zona in cui la traccia è più liscia. Nella lunga catena di DNA, l’inizio dei geni è contrassegnato da una zona nella quale la sequenza delle maglie forma una particolare dentellatura. Questa zona, detta promotore, costituisce il segnale che permette di individuare l’inizio dei geni. Ad esso si lega la proteina (l’RNA polimerasi) che ha il compito di copiare il gene e da qui parte la sintesi dell’RNA messaggero. Evidentemente l’RNA polimerasi, è in grado non solo di distinguere, nel lunghissimo filamento di DNA, le dentellature del promotore ma anche di fissarsi su di esse.

Il riconoscimento dell’inizio dei geni è la condizione necessaria per la loro corretta utilizzazione.

*Si ottengono modificando il parco macchine ...*

Per rendere tale utilizzazione anche economica occorre un ulteriore meccanismo in grado di far fronte a due esigenze. La prima è distinguere i geni che devono essere sempre attivi (costitutivi) da quelli che servono saltuariamente (regolati); la seconda è attivare o disattivare i geni regolati a seconda della necessità che si ha di essi.

Il primo problema è risolto dando ai geni costitutivi una struttura standard (solo il promotore) ma dotando i geni regolati di una struttura “optional”. Questi geni, oltre al promotore che è comune a tutti i geni, hanno anche una seconda dentellatura con funzioni regolatrici. La risoluzione del secondo problema è basata sulla diversificazione di questa seconda dentellatura, rendendola così paragonabile ai codici che nei computer identificano certe classi di file (sys. com. exe. bat. doc. xls. txt. ecc). Nel caso della nostra astronave, ad esempio, tutti i geni che servono ad introdurre e distruggere le Panda avranno uno stesso codice che quindi significa “Panda” mentre avranno un codice che significa “Uno” quelli necessari per compiere le stesse funzioni sulla Uno. Come la sequenza del promotore attira a sé la proteina RNA polimerasi, così ciascuna di queste sequenze regolatrici attira e lega a sé una specifica proteina: sulle sequenze che significano “Panda” si lega una proteina specifica che possiamo chiamare “PANDA”; allo stesso modo sulle sequenze “Uno” si lega la proteina “UNO” .

Vediamo ora come queste differenze fra i geni costitutivi ed i geni regolati permettono la loro diversa utilizzazione.

Nei geni costitutivi il legame della RNA polimerasi al promotore è seguito dalla copiatura dei geni e quindi dalla produzione delle proteine che essi codificano. Poiché il promotore è sempre disponibile, la polimerasi si può legare in qualsiasi momento e perciò la produzione delle proteine costitutive è costante. Anche nei geni regolati l’RNA polimerasi si lega liberamente al promotore ma la presenza delle proteine regolatrici (ad esempio “PANDA” e “UNO”) sul DNA funziona come un macigno sulla ferrovia che impedisce al treno (la polimerasi) di avanzare. L’uso dei geni regolati è quindi impedito da queste proteine che agiscono, facendo un altro paragone, come lucchetti. Se il blocco durasse sempre, la produzione delle proteine che essi codificano non avverrebbe mai. Perché si possa esercitare la regolazione, deve esistere un meccanismo che permetta la rimozione dei lucchetti. La chiave è costituita da una piccola molecola che, legandosi al proprio lucchetto, lo apre favorendo il suo distacco dal gene. Geni

che sono bloccati dallo stesso tipo di lucchetto/macigno vengono “liberati” dalla stessa chiave mentre geni che hanno lucchetti/macigni diversi sono “liberati” da chiavi diverse.

Definito il meccanismo per sbloccare i geni, resta da capire in che modo esso riesca ad essere in sintonia con le esigenze della cellula: cioè in che modo esso attivi non dei geni a caso ma quelli necessari in quel momento.

Scusandomi per il gioco di parole, si può dire che la chiave che permette di ottenere comportamenti coerenti è la chiave del lucchetto! Essa funziona come sensore di una particolare situazione ed attiva i geni necessari per affrontarla e risolverla.

Per capirci meglio facciamo un esempio. Immaginiamo che la nostra macchina vivente, muovendosi nello spazio, passi da una zona priva di Panda ad una che ne è ricca. Se la cellula fosse intelligente sbloccherebbe i geni che codificano per il trasportatore e la catena di smontaggio di questa possibile fonte di energia e di pezzi di base. Malgrado la cellula non sia intelligente, cioè non sia in grado né di “capire” di avere una esigenza né tanto meno di “comandare” il da farsi, essa agisce come se lo fosse. Vediamo come.

Prima di tutto individuiamo il sensore della nuova situazione: chi meglio delle Panda indica la presenza delle Panda? Queste automobili, quindi, svolgono il ruolo di molecole chiave. Malgrado l’assenza sulla superficie cellulare dei propri trasportatori e sfruttando la propensione all’errore di tutte le cose, alcune Panda riescono ad intrufolarsi all’interno della cellula. Muovendosi e sbattendo a caso con le proteine cellulari, prima o poi interagiscono con i lucchetti/macigni PANDA che hanno una toppa nella quale esse possono entrare. Una volta entrate nei propri lucchetti le chiavi li aprono e, aprendoli, permettono il loro allontanamento dai geni che essi controllano (nell’esempio i geni che hanno le informazioni per la produzione dei trasportatori e delle catene di smontaggio delle Panda).

Come risultato finale di questo sistema di regolazione la cellula ha risposto ad un cambiamento ambientale (disponibilità di Panda) con un comportamento coerente (produzione delle macchine cellulari che permettono di utilizzare le Panda).

Proseguendo nel nostro esempio, cosa succederebbe quando la nostra macchina vivente, nel suo incessante cammino, si allontanasse dalla zona ricca di Panda ed entrasse in una zona in cui abbondano le Uno?

Man mano che la cellula distrugge le Panda che ha introdotto, sempre più lucchetti/macigni PANDA, ormai privi di chiave, si riposizionano e fissano sul DNA tornando a bloccare i geni. Cessa così la produzione delle catene di smontaggio delle Panda. Le catene che erano state costruite precedentemente, divenute ormai inutili per mancanza di materia prima, vengono distrutte ed i loro componenti riciclati per la costruzione di altre catene di smontaggio. Intanto alcune Uno, entrate abusivamente, si legano ai lucchetti/macigni UNO e sbloccano i geni che producono le proprie catene di smontaggio. Da questo momento la cellula può usare le Uno come nuove fonti di energia e di pezzi di base!

Con questi meccanismi di regolazione la cellula varia il proprio parco macchine proteiche al variare delle condizioni nell'ambiente esterno. Avrete senz'altro notato che anche questa nuova capacità della cellula è resa possibile dal possesso di un piccolo patrimonio di nuove macchine (le proteine regolatrici, i lucchetti/macigni nel nostro esempio) che contribuiscono insieme alle altre proteine alla costruzione di una efficiente macchina vivente. Quindi, non solo la costruzione della struttura ed il funzionamento della cellula dipendono dal suo corredo di macchine ma anche il suo comportamento.

### *...e l'efficienza delle macchine*

Ma nella gestione della gigantesca astronave cellulare, non tutti i problemi di regolazione possono essere risolti in modo economico con un meccanismo di controllo simile a quello appena descritto. La cellula, infatti, non deve solo affrontare le grandi scelte strategiche costruendo o smantellando interi impianti, in risposta alla disponibilità delle materie prime. Deve anche adattare la produttività degli impianti esistenti alle esigenze quotidiane. Un esempio pratico può chiarire questo concetto. Le membrane, come del resto ogni parte della componentistica cellulare, subiscono continuamente dei danni e perciò la cellula mantiene sempre in funzione le catene che costruiscono i fosfolipidi di ricambio. E' intuitivo che la richiesta di questi pezzi varia in funzione della frequenza e l'entità dei danni che non sono né costanti né prevedibili. E' altrettanto intuitivo che la richiesta di fosfolipidi aumenta enormemente quando la cellula sta per duplicarsi e deve dotare la cellula figlia, oltre che del DNA, anche della membrana. Se la produttività delle catene di montaggio che costruiscono queste molecole fosse costante e svincolata dalle esigenze, la cellula si comporterebbe, a seconda dei momenti, in modo antieconomico (quando produce in eccesso) o a dir poco autolesionista

(quando produce in difetto). Entrambi sono comportamenti incompatibili con la vita della cellula che ha sviluppato, perciò, meccanismi che le permettono di controllare la velocità delle proprie macchine produttive, gli enzimi.

Per capire come si possa far lavorare più velocemente o più lentamente un enzima ricordiamo in che modo esso funziona. Un enzima è una proteina che accelera una reazione chimica favorendo il posizionamento e l'orientamento dei reattivi all'interno di una propria nicchia, detta sito attivo. Poiché la forma e le caratteristiche chimiche della nicchia sono le dirette responsabili di questo processo è evidente che qualunque evento che le alteri, influisce sulle capacità catalitiche dell'enzima. Se si verificano distorsioni tali da sfavorire l'orientamento dei reattivi, la reazione avviene più lentamente; al contrario, se il sito attivo diviene più efficiente la reazione è accelerata. Questa è la base strutturale del meccanismo che permette di controllare la velocità delle reazioni, cioè di controllare quanti prodotti sono costruiti nell'unità di tempo. Questi meccanismi di regolazione, per essere vantaggiosi, devono essere innescati in concomitanza con particolari e specifiche esigenze della cellula. Ma, come abbiamo avuto occasione di dire varie volte, la cellula non è un essere intelligente e quindi né capisce di avere una esigenza né comanda il da farsi. Queste due funzioni, il capire ed il comandare, sono ottenute, ancora una volta grazie all'azione di sensori cioè di molecole che cambiano la propria concentrazione dentro alla cellula in particolari situazioni e fungono da spie di quelle situazioni. Queste molecole sono dette molecole regolatrici o effettori o messaggeri e modificano la struttura degli enzimi alterandone così l'attività. La molecola regolatrice, muovendosi a caso nella cellula e sbattendo a caso contro gli enzimi cellulari, interagisce prima o poi con l'enzima che deve regolare. Gli enzimi regolati, a differenza di quelli che non sono regolati, hanno nella propria struttura proteica una seconda nicchia nella quale entra la molecola regolatrice. L'interazione dell'enzima con la molecola regolatrice induce cambiamenti nella struttura del sito attivo che di conseguenza funziona o meglio (attivato) o peggio (inibito). Questo meccanismo di regolazione è detto allosterismo, dal greco sito diverso, poiché la nicchia in cui entra la molecola regolatrice è diversa da quella in cui entrano i reattivi.

Per regolare la velocità di una catena di lavorazione non è necessario agire su tutti i suoi enzimi: è sufficiente che il primo acceleri o rallenti la propria velocità perché tutti i successivi si adeguino all'alterato flusso dei pezzi che esso produce. Per questo motivo la cellula riesce a regolare la

complessa rete di reazioni del metabolismo agendo solo su un numero limitato di enzimi situati in posizioni strategiche.

#### Metabolismo

Il metabolismo è l'insieme di tutte le reazioni che permettono ad un essere vivente di vivere.

Grazie ai due meccanismi che abbiamo descritto la cellula modifica il proprio parco macchine e/o l'efficienza delle proprie macchine, rispondendo in modo coerente ad eventuali cambiamenti nell'ambiente. La presenza di strutture che le permettono di adattarsi è stata un elemento non secondario nella conquista della vita.

## L'EVOLUZIONE FISICA DELLA VITA

### ***Il fine della vita***

Come abbiamo visto, ogni passaggio nella lenta costruzione della vita è stato casuale e non finalizzato. Per questo motivo ci aspetteremmo che la macchina vivente che ne è originata non avesse un fine, uno scopo. Ma la realtà invece è ben diversa!

Per capire questa incongruenza immaginiamo di unire dei pezzi a caso e di ottenere fortunatamente una macchina capace di compiere una operazione meccanica: ad esempio tornire. Nella costruzione di questo tornio non c'è stato un fine ma ora che la macchina esiste essa viene usata per compiere tale operazione. A questo punto se ci chiedessimo: "qual'è lo scopo di questa macchina? a cosa serve?" risponderemmo "a tornire" e la useremmo a tale fine. Quale conclusione possiamo trarre da tutto questo? Che la struttura ha generato la funzione e la funzione il fine. La casuale costruzione della macchina vivente ha ottenuto come risultato una struttura che sa costruire e perpetuare la vita e questo è divenuto il suo fine, il suo scopo. La macchina vivente, a differenza del tornio del nostro esempio, ha però una caratteristica peculiare: si è generata da sola e non ha bisogno di nessun operatore per fare quello che sa fare. Ciò l'ha resa completamente autonoma ed incontrollabile nel suo procedere verso il raggiungimento della sua meta. Dalla sua comparsa sulla terra, la prima macchina vivente ha quindi spontaneamente seguito questa sua innata tendenza-capacità-scopo: costruire la vita, costruire forme di vita sempre più perfezionate, cioè in grado di spargere con sempre maggior efficienza la vita nello spazio e nel tempo.

### ***Gli strumenti per raggiungere lo scopo***

I passaggi evolutivi che si sono susseguiti e che hanno permesso alle macchine viventi di costruire i milioni di forme di vita che abitano ed abitano la terra, sono stati molteplici. Al contrario sono solo due gli strumenti che sono stati utilizzati e che hanno permesso di ottenere tutti questi risultati: le mutazioni e la selezione naturale. Per poter ben capire come si è verificata l'evoluzione della vita è necessario capire come funzionano questi due strumenti.

### ***Le mutazioni***

Da quanto abbiamo detto parlando del DNA risulta evidente che la duplicazione della sua doppia scala è un momento critico per la corretta conservazione ed il corretto trasferimento

dell'informazione genetica. Questa operazione viene essenzialmente svolta da un enzima, la DNA polimerasi, che malgrado abbia una eccezionale capacità di correggere i propri errori, non è però infallibile; infatti si lascia dietro un numero di appaiamenti sbagliati, certamente esiguo ma sempre eccessivo, dal punto di vista delle esigenze della cellula. Per ricondurre tale numero entro valori accettabili, la cellula dispone di un ulteriore apparato di enzimi che pattugliano avanti e indietro i due DNA neosintetizzati allo scopo di individuare ed eliminare eventuali malappaiamenti. Questa azione di riparazione, fondamentale per la salvaguardia della integrità strutturale del DNA, avviene prima che si svolgano le fasi successive della divisione cellulare che, definitivamente ed irreparabilmente, segregano i due DNA in due cellule diverse. Grazie all'azione combinata delle macchine polimerizzanti, che danno un DNA prodotto praticamente perfetto, e delle macchine riparatrici, che eliminano i rari errori compiuti, la duplicazione del DNA viene finalmente completata con un grande sospiro di sollievo. Il sospiro che si alza metaforicamente in questo momento è giustificato da ciò che la duplicazione di ogni DNA rappresenta per la vita. E' questo un momento critico non solo per la vita della cellula che si divide, o per quella dell'organismo che si forma, ma per la Vita, quella con la V maiuscola! Ogni vivente è l'ultimo recipiente di un testimone che gli è stato consegnato dai genitori che l'hanno ricevuto dai nonni che, a loro volta, l'avevano ricevuto dai bisnonni seguendo una catena che si perde nelle nebbie del tempo passato. La Vita, come somma di tutte le vite individuali, dipende dalla correttezza del passaggio di quel testimone: ogni errore che intacca e corrode i progetti delle macchine proteiche che sono alla base della vita, contribuisce a fare ripiombare la dinamica e complessa organizzazione della materia vivente nella fissità e semplicità della materia inanimata.

La duplicazione del DNA è quindi un momento critico poiché in esso la Vita rimette in gioco, rischiando di perderlo, il patrimonio di progetti che è stato accumulato in miliardi di anni di evoluzione.

Doppiato con successo il Capo Horn della duplicazione, la successiva navigazione del DNA nell'Oceano Pacifico dell'esistenza quotidiana della cellula, non è per nulla pacifica. I quaranta ruggenti e i cinquanta urlanti sono in agguato. Ogni cellula è, infatti, una enorme e complessa fucina in cui avvengono costantemente migliaia di reazioni chimiche che producono molecole e condizioni ambientali tali da danneggiare la struttura del DNA. Questa molecola, come una vera doppia scala, è formata da pezzi solidi, robusti e ben saldati fra di loro, ma non per questo è

immune dall'usura e dai danneggiamenti causati dalle intemperie e da altre casualità: il legame che unisce il gradino alla ringhiera si può dissaldare; i gradini possono venire corrosi così da alterarne la forma; anche incrostazioni causate da varie molecole possono modificarne la forma; due gradini successivi possono venire in parte fusi e saldati fra di loro dal fulmine, molto ricco di energia, come i fotoni della luce ultravioletta... Questi danneggiamenti sono altrettanto pericolosi di quelli che si verificano durante la duplicazione: essi, oltre a venire trasferiti alle generazioni future, influiscono negativamente anche sulla vita dell'organismo che li ha subiti. Per primo egli pagherà le conseguenze dell'alterazione del progetto di una delle sue macchine biochimiche.

Nel corso dell'evoluzione, per salvaguardare il più possibile l'integrità strutturale del DNA anche nella fase cellulare che intercorre fra due successive duplicazioni, è stata seguita una semplice strategia che si basa sulla pragmatica consapevolezza dell'inevitabilità del verificarsi del danno. Per risolvere il problema che prima o poi si verificherà, si sono evolute attività enzimatiche capaci di ripararlo. Nelle cellule sono presenti delle proteine che, anche in questa fase della vita cellulare, costantemente pattugliano il DNA allo scopo di scoprire eventuali alterazioni nella sua struttura. L'individuazione di un danno scatena complessi meccanismi che coinvolgono altre proteine che, con fiamma ossidrica e pezzi di ricambio alla mano, ripristinano la struttura corretta.

La quantità di proteine che la cellula mette in campo per riparare il DNA è correlata all'entità del danno; questa capacità non è però illimitata. Se l'estensione del danno è tale da eccedere la capacità della cellula di farvi fronte è evidente che solo parte di esso verrà corretto e, di conseguenza, si verificherà una mutazione nella struttura del DNA.

#### Mutazione

Una mutazione è una modificazione strutturale del patrimonio genetico, cioè del DNA, di un organismo. Le mutazioni più comuni comportano o la trasformazione di una base in un'altra (ad esempio una adenina può divenire una guanina) o l'inserimento/delezione di una base. In natura le mutazioni avvengono spontaneamente o sono indotte da particolari agenti chimico-fisici detti mutageni (come alcune sostanze chimiche, le radiazioni ultraviolette, le radiazioni ionizzanti...). L'alterazione della sequenza del DNA porta alla sintesi di un RNA che contiene una o più triplette diverse da quelle originali. Se il nuovo ed il vecchio codon codificano per lo stesso amminoacido, la proteina che viene sintetizzata è uguale a quella originale e quindi non si verifica alcuna alterazione nel funzionamento della cellula. Al contrario, se l'RNA con la nuova tripletta codifica per una proteina con una sequenza amminoacidica diversa, questa diversità si ripercuote sulla struttura terziaria che la proteina assume nello spazio. La nuova proteina difficilmente mantiene la capacità di svolgere, in modo ottimale, la reazione o la funzione alla quale era preposta nell'economia della

cellula. Questo comporta alterazioni nella via metabolica di cui faceva parte e, quindi, alterazioni nel metabolismo cellulare. Poiché questa alterazione è scritta nel DNA, le cellule figlie della cellula in cui si è verificata la mutazione la ereditano e anche loro hanno comportamenti biochimici alterati.

Mutazioni si verificano frequentemente quando l'organismo vivente si trova ad affrontare condizioni nuove, in cui il carico di potenzialità dannose è superiore a quello su cui è stato calibrato il sistema di riparazione. Ad esempio, la quantità di luce ultravioletta a cui gli organismi viventi sono in grado di far fronte è quella che è arrivata sulla terra durante i milioni di anni in cui lo strato di ozono è rimasto intatto. Se esso dovesse "bucarsi" o se noi esagerassimo nell'abbronzatura, i sistemi di riparazione sarebbero sotto dimensionati, non più in grado di affrontare e risolvere con ragionevole successo i danni causati dall'aumentato bombardamento di raggi UV. Un altro esempio, ed anch'esso di grande attualità, è fornito dal carico di sostanze tossiche che ingeriamo con gli alimenti. Non tutti sanno che i vegetali, nel corso dell'evoluzione, hanno disperatamente cercato di difendersi dai loro consumatori avvelenandoli! A loro volta i consumatori, come contro mossa, hanno aumentato le loro capacità di riparare i danni prodotti dalle tossine ingerite. Questo equilibrio dinamico, che si è mantenuto per milioni di anni, è adesso squilibrato dal carico tossico industriale che si somma a quello naturale degli alimenti. In entrambi i casi, poiché il verificarsi di danneggiamenti al DNA supera le normali capacità di riparazione, è evidente che la rimozione del danno non sarà completa. A dire il vero, anche in presenza di un carico normale di eventi dannosi la correzione non è sempre perfetta ed un numero infinitamente piccolo di alterazioni può sfuggire alla correzione.

La cellula che subisce una mutazione del proprio DNA acquisisce un genotipo, cioè la struttura dei geni, diverso da quello che aveva ricevuto dalla cellula genitrice; sarà questo nuovo genotipo quello che essa trasferirà alla propria prole. La presenza di un genotipo diverso influisce sul fenotipo della cellula, cioè sul suo aspetto fisico.

#### Genotipo e fenotipo

Il genotipo è l'insieme dell'informazione genetica di un organismo e cioè l'insieme dei suoi geni e cioè del suo DNA. Il fenotipo è la manifestazione visibile del genotipo: in senso lato, è l'aspetto. Ad esempio, il colore degli occhi è una caratteristica fenotipica (aspetto) che è sostenuta dalla presenza o meno di proteine e quindi di geni (genotipo) che

sintetizzano il pigmento che dà il colore all'occhio. Il fenotipo, però non dipende solo dal genotipo ma anche dall'ambiente. Ad esempio, si può essere privi di un arto per un difetto genetico o per averlo perso in un incidente.

Per meglio chiarire quale sia la relazione fra genotipo e fenotipo e come questo incida sul destino di una mutazione, utilizziamo la solita similitudine fra macchine biochimiche e macchine meccaniche. Immaginiamo un certo numero di artigiani che hanno ricevuto uguali progetti per la costruzione delle macchine che permettono di costruire un stesso modello di robot. Incidentalmente il progetto del trapano a colonna di alcuni di essi subisce una alterazione: il simbolo che rappresentava, ad esempio, la punta del trapano si è alterato ed ora appare come il simbolo che indica un altro pezzo. A seconda della natura di questo nuovo pezzo si possono verificare almeno tre situazioni. Nella stragrande maggioranza dei casi il nuovo pezzo è talmente diverso dall'originale da alterare gravemente la struttura e l'attività della macchina fino al punto di renderla inservibile. A volte, invece, il nuovo pezzo non è molto diverso dall'originale, ad esempio è una punta solo un po' più corta; in questo caso la macchina continuerà a fare un foro anche se non completamente pervio. Può anche capitare che la sostituzione fornisca la macchina di un pezzo tale da cambiare la lavorazione, ad esempio, al posto della punta potrebbe essere inserito un utensile che non solo fora ma svasa il foro.

A causa delle mutazioni nei progetti del trapano a colonna, i robot costruiti dalla nostra comunità di artigiani difficilmente avranno tutti lo stesso aspetto! Rispetto al robot standard si potranno avere abbozzi di robot che non hanno potuto essere ben assemblati per mancanza di buchi; robot apparentemente normali, anche se c'è stata qualche difficoltà di assemblaggio a causa dei buchi non completamente aperti; robot dalle superfici più lisce perché i nuovi fori svasati accolgono più profondamente le viti. Queste differenze di aspetto, che nel mondo dei viventi sono dette fenotipi, sono chiaramente attribuibili a differenze nei progetti delle macchine necessarie per la costruzione del robot, progetti che nei viventi sono detti genotipi.

### ***La selezione naturale***

L'origine-causa della variabilità fra i robot, come del resto fra gli individui di una stessa specie, è quindi la mutazione che ha reso il genotipo di ciascuno di essi diverso da quello degli altri. Per il meccanismo con cui si verificano, le mutazioni sono assolutamente casuali. Potendo produrre tutte le teoriche e possibili varianti di un genotipo, esse sono il motore della variabilità! Ma qual'è il

destino dei robot varianti prodotti dai nostri artigiani? Dipende dal giudizio del mercato. I robot abortivi o gravemente mal funzionanti non avranno certo un gran successo commerciale e, a causa del fallimento degli artigiani che li producono, sicuramente spariranno dal commercio. I robot che si discostano un poco da quelli standard, senza per questo dare prestazioni inferiori, condivideranno con essi la stessa quota di mercato. Probabilmente, invece, saranno molto richiesti, ed un po' alla volta soppianteranno gli altri, i robot con le superfici più lisce poiché saranno giocattoli meno pericolosi per i bambini. Gli esseri viventi mutanti, come i robot, sono sottoposti ad una selezione, detta selezione naturale, che ne determina il destino.

#### Selezione naturale

La selezione naturale è il fenomeno per cui, all'interno di una popolazione, gli individui più adatti a sopravvivere o a riprodursi vengono favoriti rispetto agli altri che sono destinati a scomparire. La selezione operata dall'ambiente sulle popolazioni è stata descritta per la prima volta da Charles Darwin nel 1858. Secondo questa teoria, il meccanismo della selezione naturale è il risultato della interazione fra due fenomeni: 1) nell'ambito di ciascuna specie esistono fra gli individui molte differenze; 2) i rapporti di questi diversi individui con l'ambiente (clima, prede, predatori, altri membri della specie dello stesso o di diverso sesso ecc) determinano la sopravvivenza del più adatto. La selezione naturale fu paragonata da Charles Darwin all'opera di selezione esercitata per secoli dall'uomo sulle diverse specie animali e vegetali per ottenere il progressivo miglioramento delle colture e degli allevamenti (selezione artificiale).

Le mutazioni casuali avvenute nel DNA hanno prodotto delle varianti del fenotipo che vengono selezionate in base alla loro capacità di conservare e perpetuare la vita. Sotto questo aspetto esse possono essere classificate in negative, se hanno caratteristiche peggiorative, neutre se sono praticamente indistinguibili dal fenotipo originale detto selvaggio, e positive se sono migliorative. Il giudizio "morale" che viene espresso dalla selezione naturale non è assoluto ma relativo alle condizioni ambientali di vita dell'organismo mutante; quella che viene giudicata, infatti, è la sua capacità di sopravvivere nel suo ecosistema.

Per chiarire il concetto farò un esempio. Immaginate che fra una popolazione di insetti muniti di ali saltuariamente compaia, in seguito a mutazione, un individuo privo di questi arti. A causa della vita grama che conduce per questa sua deformità, ha minori probabilità degli altri di arrivare alla età matura e quindi di riprodursi. La selezione naturale lo ha giudicato come una variante peggiorativa per quell'ambiente ed in pratica, impedendogli di riprodursi, lo ha eliminato. Immaginate ora che

l'insetto protagonista del nostro esempio viva anche in posti particolari, come un prato situato su una scogliera battuta dai venti. La vita per gli insetti di questo insediamento è assai dura: molti che si alzano in volo per andare alla ricerca del cibo sono trascinati e dispersi in alto mare dalle fortissime raffiche. La probabilità degli insetti normali, provvisti di ali, di raggiungere l'età adulta è talmente bassa da essere inferiore a quella, pur sempre scarsa, del mutante privo di ali. Egli ha perciò una maggiore probabilità dei normali di riprodursi e la popolazione, col passare del tempo, si arricchisce sempre più dei suoi discendenti. In questo ambiente la selezione naturale ha giudicato il fenotipo "non avere le ali" meno penalizzante, in altre parole, migliorativo rispetto al normale. Ad esso viene attribuito dalla selezione naturale il premio in palio: la possibilità di trasferire alle generazioni future i propri geni.

Nei due esempi che abbiamo fatto una stessa mutazione ha prodotto una identica variante fenotipica che è stata però diversamente valutata dalla selezione naturale. I due giudizi hanno differenziato il destino dei mutanti e delle popolazioni a cui essi appartengono: in un caso il mutante è stato eliminato e l'aspetto generale della popolazione non è cambiato; nell'altro il mutante ha pian piano soppiantato i normali modificando l'aspetto della popolazione. Se ne deduce che il destino della popolazione non è dipeso solo dal verificarsi della mutazione, condizione pur sempre indispensabile, ma anche dalla selezione naturale che, come un timone, ha indirizzato la scelta verso la produzione di una forma di vita più adatta all'ambiente. Nel primo ambiente la forma più adatta è l'originale mentre nel secondo è il mutante. L'alterazione del fenotipo come risposta adattativa ad un certo ambiente è indicata col termine evoluzione.

Questi esempi spero servano a correggere un preconcetto che molti hanno, e cioè che l'evoluzione sia un perfezionamento delle specie animali e vegetali. Questa è una definizione assoluta che prevede l'esistenza di una forma di vita perfetta alla quale asintoticamente tende l'evoluzione dei viventi. Secondo questa definizione il nostro insetto senza ali, come del resto la talpa, cieca e praticamente focomelica, sarebbero certo meno evoluti dei loro antenati. In realtà l'evoluzione, come la selezione naturale che ne è alla base, non premia secondo una "morale" assoluta ma secondo una "morale" relativa dettata dalle caratteristiche dell'ambiente. E' quindi assurdo porsi il quesito se sia più evoluto un cavallo o un delfino o un gabbiano o ... un uomo! Ciascuno di essi è una splendida macchina biochimica che si è evoluta in modo tale da conservare e preservare sempre meglio la vita nel proprio ambiente naturale.

### ***L'evoluzione degli organismi unicellulari***

Individuati i meccanismi biochimici ed ambientali che sono alla base dell'evoluzione, vediamo ora quali sono state le tappe che, dal primo ancestrale organismo vivente, hanno portato a tutte le forme di vita che ci circondano.

L'individuazione di queste tappe è stata possibile analizzando il materiale genetico degli organismi oggi viventi. Infatti, come abbiamo detto, ogni vivente conserva nel proprio DNA il patrimonio di progetti che si sono successivamente aggiunti o che sono stati modificati nel corso dei miliardi di anni della sua evoluzione. I progetti più antichi sono quelli comuni a tutti! Ad esempio, i progetti per conservare l'informazione genetica e per utilizzarla sono uguali in tutti gli organismi viventi a dimostrazione che essi derivano da un antenato comune che è il tronco dell'albero della vita.

### ***La prima grande "scelta": duplicarsi velocemente ... o no***

Questo antenato aveva un enorme patrimonio genetico che si era accumulato convertendo in DNA sia gli RNA che gli servivano per la sintesi delle proteine (RNA messaggeri, di trasferimento e ribosomiali) sia i resti dei vecchi RNA catalitici, i ribozimi. In realtà, una buona parte di questo DNA era da buttare poiché, come abbiamo visto, dava informazioni per sintetizzare molecole, i ribozimi che avevano ormai fatto il loro tempo. Questa parte del DNA non solo era "inutile" ma costituiva anche una palla al piede! Infatti, per duplicarla ci voleva molto tempo e ciò rallentava la velocità di duplicazione cellulare.

Divisione dopo divisione, nel DNA di alcuni discendenti si verificarono delle mutazioni che li resero un po' diversi dall'antenato. Il loro DNA aveva perso dei pezzi! Ovviamente la selezione naturale falcidiò quei discendenti che avevano perso DNA utile e che, quindi, non erano più in grado di sintetizzare molecole necessarie per la vita. Al contrario, i mutanti che avevano perso pezzi "inutili" di DNA non solo non subirono alcun danno, ma anzi, furono in grado di duplicarsi più velocemente dei normali. Questo permise loro di avere più discendenti e di sopraffare numericamente gli altri più lenti a riprodursi. E' un po' come succede ai nostri giorni. A causa di molteplici condizionamenti, la popolazione della società più industrializzata si riproduce in tarda età e poco, e sarà ben presto sopravanzata dalla popolazione dei paesi del terzo mondo che hanno una velocità di duplicazione di gran lunga superiore.

Da quel tronco comune, quindi, nella notte dei tempi si originarono due rami: i discendenti che continuavano a duplicarsi lentamente e quelli che, invece, avevano acquisito la capacità di duplicarsi velocemente. Divisione dopo divisione, alcuni mutanti veloci persero altro DNA “inutile” e divennero ancora più veloci nel dividersi. Il ramo dei veloci originò quindi due rametti: i veloci ed i velocissimi!

Questa “strategia della velocità di duplicazione” si mostrò ben presto per quel che era: molto furba ma poco intelligente! E come tutti sanno la furbizia è miope perché per un piccolo ed effimero vantaggio nel presente ipoteca il futuro! I velocissimi rimasero con pochissimo DNA, lo stretto indispensabile, e questo precluse loro la possibilità di inventare nuove macchine. Infatti, la tecnica più rapida ed economica per produrre una nuova macchina, come ben sanno i giapponesi che per anni hanno fotografato macchine ed impianti industriali in tutto il mondo, è quella di migliorare una macchina vecchia già inventata da qualcuno. L’unico modo che ha una cellula per seguire questa strategia è quello di migliorare dei geni che già possiede e che, come tali, sono poco utili. Ma questo è possibile solo se la cellula non li ha buttati!

La situazione genetica dei velocissimi e la loro sorte è riassumibile con il noto proverbio: “ Con poco si fa poco”! Con le loro poche ed antidiluviane macchine biochimiche, questi organismi detti Archibatteri, non poterono competere con gli altri che, nel frattempo, avevano inventato nuove macchine e colonizzato nuovi ambienti. Essi rimasero perciò confinati e continuano a vivere solo in ambienti simili a quelli in cui si è originata la vita: temperature elevate, assenza di ossigeno ecc.. Pensate che alcuni di questi organismi vivono nella solfatara di Pozzuoli ad una temperatura che si riteneva incompatibile con la vita.

### *L’evoluzione dei “veloci”*

I veloci, che nel loro complesso si chiamano Eubatteri, si fermarono in tempo e non procedettero oltre nel processo autolesionista di perdere il DNA. Mutazioni successive hanno lavorato sul loro DNA diversificandolo e generando almeno cinque rami. Nei mutanti che hanno dato origine a queste ramificazioni, il DNA disponibile è stato riarrangiato ed ha permesso la produzione di nuove macchine, alcune delle quali assolutamente eccezionali. In generale la loro strategia evolutiva si è indirizzata ad ottenere il massimo di energia possibile dall’ambiente: solo procurandosi tanta energia era possibile battere in velocità i velocissimi. Infatti la velocità di duplicazione del DNA

non dipende solo dalle dimensioni di questa molecola ma anche e soprattutto dalla disponibilità dei pezzi e dell'energia per assemblarla.

Definita la strategia, gli Eubatteri sperimentarono diverse tattiche per procacciarsi quanta più energia possibile. Alcuni, grazie al riarrangiamento di parte del DNA "inutile" che avevano ancora a disposizione, produssero nuove macchine capaci di rompere un numero sempre più elevato di legami chimici negli alimenti ottenendo da essi molta dell'energia che vi era immagazzinata. Parte di questa energia non venne persa sotto forma di calore ma, grazie a nuove proteine anch'esse ottenute dal DNA "inutile", venne utilizzata per trasportare dei protoni dall'interno all'esterno della membrana cellulare. A causa della diminuzione dei protoni all'interno e del loro aumento all'esterno, ai due lati della membrana si ottenne una diversa concentrazione di cariche elettriche positive: si produsse, cioè un gradiente "elettrico".

La vita era riuscita a trasformare l'energia chimica in energia elettrica! La vita aveva inventato già miliardi di anni fa quello che noi abbiamo inventato alla fine del 1800: le centrali elettriche. Nei nostri impianti l'energia ottenuta da varie fonti viene trasformata in un gradiente elettrico (diversa concentrazione di elettroni) che viene mantenuto nei due fili che arrivano ad ogni presa di corrente. Quando si collegano i due fili, gli elettroni si muovono dal filo in cui sono più concentrati all'altro generando la corrente elettrica (elettroni che corrono). Se nella presa di corrente infiliamo la spina di un elettrodomestico, gli elettroni che passano attraverso il suo motore vengono utilizzati per compiere un lavoro. Come la differenza di potenziale elettrico della presa di corrente fornisce energia per il funzionamento delle nostre macchine (lavatrice, frigorifero, asciugacapelli, trapano ecc..), così la differenza di potenziale elettrico fra i due lati della membrana fornì l'energia per far funzionare nuove macchine biochimiche. Alcuni Eubatteri usarono il gradiente "elettrico" per far funzionare delle nuove proteine, ottenute dal DNA "inutile", che permisero loro di muoversi e quindi di procurarsi più cibo. Queste proteine, assemblandosi insieme, formavano una struttura simile ad una porta girevole incastrata nella membrana cellulare; al suo perno centrale erano attaccate altre proteine che, nel loro complesso formavano una struttura simile ad una frusta. Quando la porta veniva messa in moto, spinta dal flusso dei protoni che la attraversavano per tornare dall'ambiente più concentrato a quello più diluito, la sua rotazione faceva girare la frusta che, a sua volta, come un elica, muoveva la cellula. Questo dispositivo consentiva alle cellule che lo avevano, di spostarsi velocemente alla ricerca di molecole di cui cibarsi. Altri Eubatteri usarono

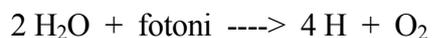
il gradiente “elettrico” per sintetizzare l’ATP, cioè per caricare le pile della cellula. Grazie al DNA “inutile” avevano infatti ottenuto delle proteine che funzionavano come una specie di pressa: nella sua tasca l’ADP, cioè la pila scarica, e il fosfato venivano compressi fino a fondersi generando l’ATP. L’energia era fornita dai protoni che, facendo ruotare la porta girevole, determinavano la rotazione di una versione raccorciata della frusta che, a sua volta, faceva alternativamente aprire e chiudere la ganasce della pressa.

Altri Eubatteri, sempre usando parte del DNA “inutile”, sintetizzarono delle proteine che, per generare il gradiente “elettrico”, non usavano l’energia chimica estratta dalle molecole di cibo ingerito ma l’energia del sole. La vita ha quindi inventato le centrali fotoelettriche miliardi di anni prima di noi! Questi Eubatteri avevano dei pigmenti che captavano, come fossero antenne, i fotoni ed usavano la loro energia per mettere in moto il complesso sistema che portava alla generazione del gradiente “elettrico”. Con il gradiente essi sintetizzavano il solito ATP, in pratica trasformando l’energia solare in energia chimica. Gli Eubatteri che trasformavano l’energia del sole in energia chimica, detti Eubatteri foto-autotrofi, presero ben presto un grande vantaggio e colonizzarono tutti gli oceani. Anche gli Eubatteri che estraevano energia dalle molecole organiche, detti Eubatteri eterotrofi, non se la passavano male. Le carcasse in decomposizione dei loro cugini autotrofi morti costituivano, infatti, una enorme massa di materiale organico da cui attingere energia. La capacità che entrambi avevano di trasformare in un gradiente elettrochimico la maggior parte dell’energia che si procacciavano e di accumularla poi sotto forma di ATP, li rendeva imbattibili nella lotta per la vita. Ancora oggi la grande disponibilità di energia a basso costo è uno dei principali fattori che controllano e governano lo sviluppo ed il successo di una nazione.

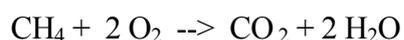
#### Autotrofismo ed eterotrofismo

L’autotrofismo e l’eterotrofismo sono i due diversi modi con cui i viventi si procacciano le sostanze e l’energia di cui abbisognano per costruire e far funzionare il proprio organismo. Gli organismi autotrofi, detti anche produttori, assumono dall’ambiente sostanze inorganiche (acqua, anidride carbonica ecc.) e le trasformano in sostanze organiche. L’energia necessaria viene ottenuta dal sole (organismi foto-autotrofi) o da reazioni chimiche inorganiche (organismi chemio-autotrofi). Le piante sono i più importanti organismi autotrofi. Gli organismi eterotrofi, detti anche consumatori, usano come fonti di molecole e di energia le sostanze organiche prodotte dagli organismi autotrofi. Gli animali ed i funghi sono i principali organismi eterotrofi.

Con tutta questa energia a disposizione gli Eubatteri ebbero ben presto ragione degli Archibatteri. Particolarmente agguerriti erano gli Eubatteri che captavano l'energia del sole. Essi, infatti, non solo avevano a disposizione una fonte inesauribile di energia ma, con lo smontaggio della molecola dell'acqua,



producevano, come molecola di scarto, l'ossigeno che per gli Archibatteri era veleno puro. Come conseguenza della enorme espansione degli Eubatteri foto-autotrofi, che si protrasse per milioni di anni, si ebbe una enorme produzione di ossigeno che si diffuse negli oceani e nell'atmosfera. L'ossigeno è una molecola un po' particolare che ha la grande capacità di ossidare e quindi di distruggere le molecole organiche. Ad esempio la semplicissima molecola del metano può reagire con l'ossigeno per dare anidride carbonica ed acqua.



Questa propensione dell'ossigeno a distruggere le molecole organiche lo rende pericoloso per gli organismi viventi che basano la propria esistenza sulla integrità delle molecole di cui sono fatti. All'inizio, quando di ossigeno ce n'era poco e si diluiva negli oceani, il pericolo era modesto ma quando esso cominciò ad accumularsi la vita rischiò grosso.

Solo gli organismi che riuscirono ad evolvere, grazie al solito DNA "inutile", delle proteine capaci di controllare le forme attive dell'ossigeno, i cosiddetti e ben noti radicali liberi, poterono affrontare il pericolo. Gli altri organismi lo sfuggirono rintanandosi in ambienti non raggiunti da questa molecola. Che i radicali dell'ossigeno siano temibili credo siano noto a tutti grazie alla pubblicità che da una parte ci elenca i danni che essi fanno alla nostra pelle, ai nostri capelli ed in generale alla nostra salute e che dall'altra ci consiglia l'uso o l'ingestione di sostanze, gli altrettanto ben noti antiossidanti, che ci proteggono da essi.

La maggior parte degli Eubatteri non solo si attrezzò per proteggersi ma riuscì a fare di necessità virtù inventando nuovi enzimi che, non solo ritrasformavano l'ossigeno in acqua ma con questo processo aumentavano la quantità di energia ottenibile con il gradiente "elettrico". Questi organismi che utilizzano l'ossigeno per migliorare le rese energetiche delle loro reazioni sono detti aerobi mentre sono anaerobi quelli che non utilizzano questa molecola.

L'aerobiosi e l'anaerobiosi sono i due diversi modi con cui i viventi si liberano degli idrogeni, prodotto finale della degradazione degli alimenti. Come abbiamo detto in precedenza, nei legami chimici c'è energia, soprattutto nei legami fra carbonio ed idrogeno. Nelle cellule, per rendere disponibile l'energia, questi legami vengono scissi e gli idrogeni che si ottengono vengono momentaneamente immagazzinati su delle molecole trasportatrici che funzionano come camion. Sfortunatamente le cellule possiedono un numero limitato di camion per cui, per poter assicurare la continuità della degradazione degli alimenti, i camion devono essere prontamente vuotati. Negli organismi anaerobi, che cioè non usano l'ossigeno, gli idrogeni vengono scaricati attaccandoli a delle molecole semplici che vengono poi eliminate come scarti. Questo processo si chiama fermentazione. Sono organismi fermentanti i lattobacilli dello yogurt che eliminano l'acido lattico, o i lieviti del vino che eliminano l'etanolo o quelli dell'aceto che eliminano l'acido acetico. Il processo fermentativo è poco efficiente, dal punto di vista energetico: le cellule, infatti, si liberano di molecole che contengono ancora molta energia nei loro legami chimici. La fermentazione somiglia, se mi è concesso un paragone, all'eliminazione nelle discariche, di materiali di rifiuto ancora ricchi di energia. Negli organismi aerobi, invece, gli idrogeni vengono scaricati legandoli all'ossigeno con la formazione di acqua. In questo processo, detto respirazione, gli idrogeni vengono ossidati o, come si dice comunemente, vengono bruciati. Il processo della respirazione somiglia, se mi è concesso un altro paragone, alla combustione dei rifiuti negli inceneritori urbani. La respirazione, oltre ad essere meno inquinante, è energeticamente molto più favorevole della fermentazione poiché permette di ottenere anche l'energia contenuta nei rifiuti. Tutti gli organismi viventi, noi compresi, che privati dell'ossigeno muoiono, sono organismi aerobi e quindi respiranti.

La trasformazione in aerobi della maggior parte degli Eubatteri sembrò la mossa vincente che li avrebbe consacrati definitivamente come vincitori nella lotta per la vita. Infatti, grazie all'ossigeno essi non solo avvelenavano gli organismi anaerobi ma avevano a disposizione ancora più energia.

### ***La strategia dei "lenti": l'organizzazione***

E gli altri? I lenti cosa stavano facendo?

Anche i lenti, che più scientificamente sono detti Urcaeroti e dai quali noi deriviamo, subivano mutazioni; avendo molto DNA "inutile" su cui agire, su di essi l'evoluzione poté fare molti esperimenti. Ciò portò ad una grande produzione di nuove macchine che non solo erano in grado di fare meglio vecchie reazioni ma, soprattutto, ne sapevano fare di nuove. Ma con tutto quel DNA, RNA, e con tutte quelle vecchie e nuove proteine che facevano tantissime reazioni, nella cellula doveva esserci un casino eccezionale. E in questi organismi la vita sfruttò la disponibilità di DNA per sperimentare una nuova strategia evolutiva: mettere un po' d'ordine e ce n'era probabilmente bisogno!! L'evoluzione negli Urcaeroti puntò, quindi, sull'organizzazione. Come sanno tutti gli

imprenditori, l'organizzazione non è un parametro secondario nel successo di una qualunque struttura produttiva. Essa infatti assicura di ottenere il massimo risultato con il minimo sforzo ed il minimo rischio.

Si organizza il DNA

Si cominciò con l'organizzare il DNA. Come sappiamo il DNA è una molecola che contiene tutto il patrimonio genetico dell'organismo. Il DNA che gli Eucarioti avevano ricevuto dal loro antenato era come un lunghissimo foglio di carta formato A4 che conteneva non solo tutti i progetti e le istruzioni per costruire e far funzionare la cellula ma anche i tantissimi progetti su cui l'evoluzione stava lavorando. Questo lunghissimo foglio era srotolato e sparso per tutta la cellula, come del resto è ancora il DNA degli Archi- ed Eubatteri. Recuperare da esso i progetti desiderati doveva essere un bel problema. Possiamo ben immaginare la scena: Dov'è quella certa pagina? eppure era lì! l'ho vista poco tempo fa! dove si sarà cacciata? In nessuna fabbrica e neppure nella più modesta bottega artigianale i progetti delle macchine vengono lasciati in giro col rischio che vengano rovinati e siano irrecuperabili al momento del bisogno! Grazie alle mutazioni subite dal DNA "inutile" comparvero delle nuove proteine capaci di assemblarsi in modo da costituire delle strutture simili alle cartelline di un classificatore. La prima cartellina accoglieva un certo numero di pagine ben piegate del DNA; quando essa era piena, le pagine successive andavano a riempire la seconda cartellina e così via. Le cartelline, disponendosi le une di seguito alle altre, raccoglievano in modo ordinato ed in poco spazio tutto il DNA. La comparsa di altre proteine permise di costruire delle specie di cassette che contenevano gruppi di cartelline e delle specie di classificatori che contenevano gruppi di cassette. Grazie a questa strategia l'informazione genetica contenuta nel DNA occupò meno spazio e risultò ordinata e più facilmente gestibile. Questa complessa struttura formata da DNA e proteine è detta cromatina.

Cromatina

La cromatina è una struttura complessa costituita da DNA e proteine. Vi si possono distinguere diversi livelli di organizzazione. Il primo è il nucleosoma. Esso è costituito da otto proteine dette istoni che si uniscono a formare una struttura globulare, una specie di perla, intorno alla quale può ruotare un segmento di DNA lungo circa 200 coppie di basi. A questo livello di organizzazione la lunga molecola di DNA, avvolgendosi successivamente intorno alle perle, forma una struttura simile ad una collana. Al secondo livello di organizzazione, la collana si arrotola intorno ad un torsolo proteico centrale costituito da un nono istone. Si forma così una specie di torciglione. Per assemblare il terzo

livello di organizzazione, lungo il torciglione si localizzano delle proteine che si dispongono ad una certa distanza le une dalle altre e, come spille, lo fissano ad una impalcatura proteica centrale. In questo modo i torciglioni, assumono l'aspetto di ampi fiocchi, che si irradiano dall'impalcatura, rivestendola. Questa struttura è il cromosoma.

Si organizza il "territorio"

Dopo aver organizzato il DNA si proseguì con un tipo di organizzazione che un sociologo potrebbe definire una "corretta politica del territorio". Le notizie frequentemente riportate dalla stampa di gravi incidenti che causano l'intossicazione, il ferimento ed anche la morte di persone ed animali ci ha resi consci di una grave realtà della nostra società: la presenza e la dislocazione sul territorio di fabbriche e di realtà produttive che possono essere una minaccia per la sicurezza dei territori circostanti. Sono tristemente noti i casi di fabbriche da cui sono fuoriuscite nubi di sostanze nocive che si sono sparse sugli agglomerati urbani limitrofi intossicando gli abitanti; di enormi serbatoi di combustibile che sono esplosi seminando la morte fra gli abitanti delle case adiacenti. Pure note sono le ricorrenti morie di pesci, nei fiumi, causate da scarichi incontrollati di fabbriche e di allevamenti; e i gravi problemi ecologici causati dall'affondamento di petroliere che riversano migliaia di tonnellate di petrolio grezzo nei mari; e gli incidenti autostradali che causano il rovesciamento di cisterne piene di sostanze tossiche nei fiumi ecc.

La grave carenza, e spesso la mancanza, di sistemi per limitare l'incontrollata distribuzione sul territorio di sostanze tossiche, rischia di rendere sterile e morta la terra. Il problema dell'inquinamento, simile a quello che sta minacciando l'esistenza della vita stessa sul nostro pianeta, fu incontrato, affrontato e risolto durante l'evoluzione della cellula Urcariote. I prodotti delle sempre più numerose reazioni chimiche che avvenivano nella cellula non erano sempre inoffensivi, a volte erano tossici e nocivi. Essi potevano perciò causare l'inattivazione di enzimi e il danneggiamento del DNA. Furono perciò evolutivamente avvantaggiati alcuni Urcarioti che svilupparono un sistema per isolare il DNA dalle zone industriali ed inquinanti della cellula. Il DNA venne avvolto da una membrana e confinato ed isolato in una zona "sicura", una sorta di rocca, a cui si accede attraverso pori, simili a porte, a livello dei quali viene esercitato un controllo sul traffico. L'organello che contiene il DNA è detto nucleo.

Ma le sostanze tossiche che si liberavano da lavorazioni pericolose avrebbero comunque potuto danneggiare la cellula distruggendo i suoi enzimi. Per ovviare a questo problema queste lavorazioni furono confinate in zone della cellula opportunamente attrezzate ad affrontare i problemi che esse

comportano. Queste zone contengono gli enzimi necessari per le lavorazioni a rischio e sono separate dal resto della cellula da una membrana. Tutte le porzioni della cellula che sono circoscritte da una membrana e che svolgono compiti particolari sono dette organelli subcellulari; esse hanno nomi specifici in relazione al tipo di operazioni che in esse si compiono. Le molecole che dovevano subire trasformazioni chimiche che generano intermedi tossici venivano trasportate al loro interno; qui reagivano e i prodotti tossici generati non potevano più sfuggire. Ad esempio nei perossisomi avvengono delle reazioni che producono acqua ossigenata (perossido di idrogeno), una molecola assai pericolosa per il funzionamento della cellula. E' evidente che il confinare la sua produzione all'interno di questo organello cellulare assicura al resto della cellula una più adeguata protezione. Le sostanze tossiche prodotte all'interno degli organelli subcellulari non solo vi rimanevano intrappolate ma potevano anche venire trasformate in sostanze non più tossiche. L'acqua ossigenata, all'interno del perossisoma viene distrutta e trasformata nell'innocua acqua ad opera di sistemi enzimatici che "bonificano" la cellula da questa molecola.

Vennero costruiti anche altri organelli, detti lisosomi, che possono essere paragonati alle officine di demolizione delle macchine danneggiate e non più funzionanti. In essi, infatti, avvengono, fra le altre, reazioni di smantellamento degli enzimi che non sono più in grado di compiere i compiti per i quali erano stati costruiti. Per fare questo i lisosomi contengono speciali enzimi capaci di digerire le proteine. E' evidente che se questi enzimi fossero liberi nella cellula, rischierebbero di danneggiare indiscriminatamente non solo le proteine danneggiate ma anche quelle perfettamente funzionanti.

I lisosomi ed i perossisomi, per svolgere in sicurezza le funzioni che sono loro affidate, sono dei compartimenti chiusi circondati da membrane che ne isolano il contenuto dal resto della cellula che è detto citoplasma. Ma ogni medaglia ha il suo rovescio! La presenza della membrana impedisce agli enzimi che operano all'interno degli organelli di raggiungere il posto di lavoro. Come potevano questi enzimi arrivare a destinazione?

Per potere approvvigionare i lisosomi ed i perossisomi delle loro macchine dovettero evolversi degli organelli speciali: il reticolo endoplasmico e l'apparato del Golgi. Nel loro insieme essi costituiscono un complesso canalicolare che permette di convogliare verso gli altri organelli, ed eventualmente fino all'esterno, le proteine che devono svolgere là la loro azione. Il reticolo endoplasmico ha l'aspetto di un complesso intreccio di gallerie e cunicoli che si snodano in zone abbastanza centrali della cellula. In esso si svolge un intenso flusso di molecole che si spostano

dirigendosi verso altri organelli subcellulari. Alcune porzioni di questi cunicoli possono staccarsi, con il loro contenuto, dal sistema principale e, come ascensori, si possono spostare e fondersi con altri complessi di gallerie situati in zone più periferiche. Gli ascensori possono, ad esempio, raggiungere i complessi di gallerie dell'apparato del Golgi, che prende il nome dallo scienziato italiano che per primo lo descrisse un secolo fa. L'apparato del Golgi si trova localizzato verso la periferia della cellula e anche dalle sue gallerie si staccano dei grossi ascensori che possono raggiungere altri compartimenti. Alcuni ascensori si fondono con i lisosomi, altri, interagendo con la membrana plasmatica, riversano il loro contenuto all'esterno della cellula. In questo modo il sistema di corridoi, di gallerie e di ascensori costituito dal reticolo endoplasmico e dall'apparato del Golgi permette di portare le proteine alle loro destinazioni finali.

Da quanto detto appare evidente che la cellula Urcariota assunse un aspetto molto strutturato: oltre al citoplasma, la regione non particolata, essa si arricchì di diversi tipi di organelli subcellulari. Questo risultato venne ottenuto ben presto nel corso dell'evoluzione degli Urcarioti e fu il frutto del lavoro combinato delle mutazione e della selezione naturale. Man mano che le reazioni si complicavano, solo le cellule che avevano un sistema efficiente di regolazione del territorio vivevano, le altre incorrevano in "incidenti" che le facevano morire o perdere competitività nella lotta per la vita.

Si dice che l'esperienza dei padri non è di grande utilità ai figli che preferiscono sbagliare per conto proprio. Ma quando l'uomo, con le proprie azioni, mette a repentaglio il destino di tutto il pianeta forse sarebbe necessario e doveroso trarre il più possibile insegnamento da un maestro che ha milioni di anni di esperienza sulle spalle.

Si organizza uno "scheletro"

La cellula Urcariotica non era più un sacchetto in cui si svolgevano, uniformemente distribuite, le diverse reazioni. Ormai diventata enorme, si era strutturata in organelli subcellulari che delimitavano parte del territorio ed in cui avvenivano le lavorazioni particolari. L'esistenza di queste strutture pose il problema della loro collocazione nello spazio interno. Alcuni organelli, infatti, occupano posizioni fisse e ben definite mentre altri si spostano in modo non casuale verso i lisosomi o la membrana plasmatica. Questi problemi di collocazione e di traffico vennero risolti costruendo una fitta rete di proteine filamentose che attraversano tutto lo spazio intracellulare e che

servono sia per ancorare le strutture fisse che per muovere, come su binari, le strutture mobili. Questa rete, detta citoscheletro, controlla anche la forma ed i movimenti della cellula.

#### Citoscheletro

Il citoscheletro è una estesa organizzazione di filamenti che danno alla cellula la sua forma, la capacità di muoversi e sono responsabili della collocazione e dei movimenti interni dei suoi organelli. I componenti più importanti del citoscheletro sono i microtubuli che costituiscono la rete di supporto che guida i movimenti della cellula e degli organelli. Essi hanno l'aspetto di tubi le cui pareti sono formate da spirali di una proteina detta tubulina. Esistono anche dei microfilamenti costituiti da una proteina detta actina. Essi, interagendo con un'altra proteina, detta miosina, formano delle strutture contrattili che sono responsabili di molti tipi di movimenti cellulari.

Ma per costruire tutte queste strutture e per farle funzionare ci voleva molta energia! I nostri antenati svilupparono un nuovo modo di procurarsi il cibo: si mangiavano in un sol boccone i malcapitati che si avvicinavano troppo!

Il processo che permetteva agli Urcarioti di inghiottire particelle grandi come i piccoli Archi- ed Eubatteri, è detto endocitosi e fu reso possibile dalla presenza negli Urcarioti degli organelli e dei filamenti del citoscheletro. Quando un batterio toccava una specifica regione della membrana dell'Urcariote, questa sprofondava trascinandolo nella invaginazione. Successivamente i lembi esterni della fossa si saldavano fra di loro formando una vescicola in cui veniva intrappolata la preda. La vescicola veniva poi trascinata dal citoscheletro e fatta fondere con i lisosomi che, con i loro enzimi, digerivano il batterio.

Come nel caso degli Eubatteri, ci aspetteremmo che tutte queste diverse mutazioni avessero diversificato gli Urcarioti dando origine a diversi rami evolutivi. Apparentemente non è così! Si evolse infatti un unico tipo di Urcariote che, mutazione dopo mutazione, divenne una enorme macchina vivente, con una organizzazione interna molto complessa, che si cibava di batteri. Per ottenere un simile risultato non fu solo sufficiente che si verificasse una innumerevole quantità di mutazioni ma fu altresì necessario che esse si accumulassero sullo stesso DNA. Come è possibile che tutte queste mutazioni, che certamente avvennero in individui diversi, siano confluite in un unico DNA divenendo patrimonio comune della specie? Sapendo come i viventi trasmettono il loro patrimonio genetico alle generazioni successive questo evento è altamente improbabile! a meno

ché... un'altra fantastica invenzione non abbia permesso agli Urcarioti di ottenere questo risultato: una forma, anche se arcaica, di sessualità.

#### Si inventa il "sesso"

Tutti noi abbiamo nozioni più o meno precise sulla sessualità e ne conosciamo gli aspetti anatomici, comportamentali e morali ma ben pochi sanno cosa essa sia veramente e cosa abbia significato per la diffusione e forse per la sopravvivenza stessa della vita. La sessualità è il processo attraverso il quale due individui della stessa specie si scambiano pezzi di materiale genetico dando origine ad individui con nuove caratteristiche genotipiche e fenotipiche. Un esempio un po' surreale ci permetterà di meglio comprendere la funzione e l'importanza della sessualità. Immaginiamo di avere una specie unicellulare (i nostri Urcarioti sono un esempio quanto mai calzante) i cui individui assomigliano ai cavernicoli dei cartoons di B.C. Questa popolazione è costituita da due ceppi in tutto identici eccetto che per due caratteristiche dovute a mutazioni casuali: gli individui di un ceppo possono fagocitare particelle grossolane di cibo poiché hanno potenti denti mentre gli altri, essendo sdentati, assorbono solo gli alimenti liquidi; in compenso, però questi ultimi sono ricoperti di una fitta pelliccia mentre gli altri sono nudi come vermi. Se le condizioni ambientali sono tali da fornire cibo solido e liquido e una temperatura adeguata, entrambi i ceppi prosperano. Se però mancasse il cibo liquido, gli individui del ceppo che utilizza solo quell'alimento morirebbero; mentre morirebbero gli individui dell'altro ceppo se venisse un gran freddo. Questo non sarebbe grave per la specie, nella sua totalità, poiché almeno un ceppo sopravviverebbe perpetuando nei suoi discendenti il patrimonio genetico comune acquisito dalla specie nel corso della sua evoluzione. Se però si verificasse l'evento funesto di un freddo polare che trasforma in solidi i cibi liquidi, entrambi i ceppi morirebbero e sarebbe la fine per quella specie. Ciò sarebbe veramente il colmo poiché in realtà la specie, nel suo complesso, ha le informazioni per costruire le strutture (i denti e la pelliccia) necessarie ad affrontare e superare tale evento. Le informazioni, sfortunatamente, si trovano in individui diversi. La sessualità è il meccanismo vincente che ha permesso di risolvere questo problema. Infatti, nel caso in cui un individuo di un ceppo dia una copia del proprio DNA ad un individuo dell'altro ceppo e che i due DNA si ricombinino a formare un figlio con entrambe le informazioni utili, la specie avrà a disposizione un nuovo individuo ibrido con caratteristiche tali (denti e pelliccia) da permettergli di sopravvivere e di far sopravvivere la

specie. E' evidente l'utilità di questo meccanismo che permette ad una specie di combinare le mutazioni utili e così di aumentare le proprie possibilità di vincere la battaglia per la vita.

E' veramente avvilente che la sessualità, questo meraviglioso stratagemma inventato dalla vita per far prevalere la vita stessa sulle avversità, sia nella nostra cultura così spesso riduttivamente identificata con il solo aspetto meccanico dell'accoppiamento e che anche questo sia demonizzato da certa morale. Ed è altrettanto avvilente che uomini illuminati da "intelligentissimi" alieni ripudino la sessualità ed affidino il futuro destino dell'uomo alla clonazione. A loro, come del resto ai loro ispiratori stellari, il triste specchio dell'evoluzione degli Archi ed Eubatteri non ha insegnato nulla!

Ma ci vuole anche un colpo di ...fortuna

Lo sviluppo della complessa organizzazione che ho descritto richiese milioni di anni durante i quali gli Urcarioti assistettero al trionfale sviluppo degli Eubatteri ed alla progressiva ed ineluttabile disfatta degli Archibatteri. Anche gli Urcarioti, a dire il vero, non se la cavavano molto bene: la loro organizzazione solo in parte compensava la scarsa disponibilità di energia che, come abbiamo detto, è fondamentale per ogni tipo di sviluppo. Il problema non era tanto dovuto alla loro natura eterotrofa (ottenevano i materiali e l'energia necessaria per vivere dal cibo che ingerivano) poiché c'era una grande disponibilità di batteri da predare. Il vero problema era la loro natura anaerobia (buttavano, come prodotti di scarto, molecole che contenevano ancora moltissima energia) che li rendeva energeticamente poco efficienti. Il loro destino sarebbe stato sicuramente segnato se non si fosse verificato un evento eccezionale! Un giorno, circa un miliardo e mezzo di anni fa, un Urcariote inghiottì un Eubatterio eterotrofo aerobio e non riuscì a digerirlo. Non è ben chiaro se fosse lui che aveva dei problemi digestivi o se fosse il batterio che era particolarmente coriaceo. La situazione divenne piuttosto imbarazzante quando fu chiaro che l'Urcariote non solo non riusciva a digerire ma neppure a vomitare il batterio che si trovò lì intrappolato per sempre. Fortunatamente né l'Urcariote né il batterio subirono danni da questo incidente ed ognuno poté continuare la propria vita anche se con qualche adattamento contingente. In particolare il batterio, anziché approvvigionarsi di cibo dall'ambiente esterno, lo prelevava direttamente dal citoplasma dell'Urcariote. Questo prelievo non causava eccessivi danni all'Urcariote poiché la maggior parte delle molecole sottratte sarebbe stata comunque eliminata come prodotti di scarto. Il batterio, grazie

alla sua particolare batteria di enzimi, che utilizzavano l'ossigeno come accettore di idrogeni, era in grado di estrarre da esse anche l'energia residua. In pratica nel citoplasma dell'Urcariote avvenivano le reazioni anaerobiche ed i prodotti di scarto, anziché essere espulsi, passavano dentro al batterio che faceva le reazioni aerobiche. In questo modo veniva estratta tutta l'energia dagli alimenti assunti dall'Urcariote. Il batterio che, suo malgrado, si trovava in una situazione simile a quella di chi sguzza dentro un gigantesco tegame di minestra, ne approfittava producendo una quantità di ATP ben superiore alle sue esigenze energetiche. Grato, passava l'eccesso dell'ATP prodotto all'Urcariote che lo ospitava. Come risultato dell'incidente che gli aveva fatto ingerire un Eubatterio indigesto, l'Urcariote aveva acquisito un ospite che aumentava di diciotto volte le sue capacità di ottenere energia dagli alimenti! E questo fece la differenza fra l'estinzione ed il successo evolutivo! Infatti, gli altri Urcarioti, quelli cioè che non erano stati "miracolati", a causa dello squilibrio che esisteva fra le modeste disponibilità e le forti richieste energetiche associate alla loro massa ed alla loro complessa organizzazione, si estinsero. Al contrario, il nuovo organismo prodotto da questa simbiosi poté utilizzare le grandi disponibilità energetiche del batterio per far funzionare la fantastica organizzazione ereditata dall'Urcariote. Nessuno fu più in grado di competere con lui nella lotta per la vita. Egli divenne il progenitore degli Eucarioti, gli organismi che, grazie a queste due caratteristiche, hanno permesso l'esplosione della vita sulla nostra terra.

#### Simbiosi

La simbiosi è l'associazione fra due o più organismi di specie diversa, detti simbionti. Quando i simbionti traggono reciproco vantaggio dall'associazione e nessuno degli individui delle due specie è più capace di vivere isolato, la simbiosi viene detta mutualistica.

L'evoluzione degli Eucarioti dapprima tese all'ottimizzazione della macchina vivente unicellulare generando organismi sempre più atti a sopravvivere nel proprio ambiente. Il primo passo fu una sempre più stretta integrazione con l'Eubatterio ospite che divenne parte integrante della cellula in cui svolse le funzioni di centrale energetica; in questa sua veste egli, a tutti gli effetti, è considerato un nuovo organello cellulare detto mitocondrio.

#### Mitocondrio

Il mitocondrio è un organello presente in molte copie nelle cellule eucariotiche. Deriva dalla fagocitosi incompleta di un Eubatterio da parte di una cellula urcariotica. La sua origine è confermata dalla sua organizzazione interna che comprende un DNA, degli RNA messaggeri, di trasferimento e ribosomiali che permettono sia la sua riproduzione che la sintesi delle proteine necessarie al suo funzionamento. Ad ulteriore conferma della sua origine, esso ha due membrane: una più interna che corrisponde a quella propria del batterio ed una esterna che corrisponde alla membrana plasmatica coinvolta nella fagocitosi. Nel mitocondrio avvengono una serie di reazioni che permettono la degradazione completa degli alimenti ottenendo da essi grandi quantità di energia. Queste reazioni, che utilizzano come accettore di idrogeni l'ossigeno, nel loro complesso sono dette catena respiratoria. Il mitocondrio svolge la funzione di centrale energetica della cellula eucariotica.

Con l'organizzazione e l'energia si è pronti a conquistare il mondo!

Successivamente vennero acquisite nuove ed utili attività enzimatiche e venne migliorata l'organizzazione strutturale della cellula con la comparsa di altri organelli cellulari. Queste nuove attività e queste nuove strutture permisero di migliorare funzioni importanti per la vita quali la protezione, la locomozione, l'alimentazione, la sessualità. Ad esempio, ben presto comparvero pellicole superficiali deformabili ma elastiche e formazioni scheletriche interne o esterne per proteggere l'organismo. La locomozione per la ricerca del cibo venne ottenuta grazie all'attività di particolari organuli subcellulari come gli pseudopodi, le cilia ed i flagelli. Anche queste strutture, molto più complesse di quelle degli Eubatteri, con i loro movimenti ondulatori determinano il movimento dell'acqua e quindi, per reazione lo spostamento della cellula. Particolari funzioni sensitive, di conduzione e di difesa, vennero acquisite grazie a masserelle di pigmenti sensibili alla luce che funzionano da fotorecettori, a fibrille che conducono e coordinano impulsi sensitivi e motori, a bastoncelli superficiali che vengono espulsi a scopo difensivo ed offensivo. Grazie a queste nuove e sofisticate strutture le cellule assunsero l'aspetto di un organismo miniaturizzato. Ma soprattutto fondamentale per il destino della vita fu un'altra provvidenziale fagocitosi mal riuscita. Un Eucariote inghiottì un Eubatterio e non riuscì a digerirlo! Questo Eubatterio, a differenza di quello che aveva dato origine agli Eucarioti, era foto-autotrofo e conferì questa caratteristica al suo ospite. Da quel momento si sviluppò un nuovo ramo evolutivo degli Eucarioti che dette origine alle piante. In questi Eucarioti l'Eubatterio si è trasformato in un organello cellulare detto cloroplasto che, usando l'energia del sole, trasforma l'acqua e l'anidride carbonica in molecole organiche che servono sia come materiale da costruzione sia come fonti di energia.

### Cloroplasto

Il cloroplasto è la sede della fotosintesi negli organismi eucarioti. Deriva, come i mitocondri, da una parziale fagocitosi di un Eubatterio che però, nel caso del cloroplasto era un foto-autotrofo. Nei cloroplasti si realizza l'attività fotosintetica. In breve, la fotosintesi prevede diverse fasi: a) i fotoni provenienti dal sole sono captati da particolari pigmenti ed utilizzati per scindere l'acqua in elettroni, protoni ed ossigeno; b) gli elettroni vengono utilizzati per creare un gradiente "elettrico" di protoni che serve per la sintesi di ATP; c) altri idrogeni, ottenuti dalla scissione dell'acqua, vengono caricati su dei trasportatori e scaricati su molecole di anidride carbonica ottenendo così la sintesi di molecole organiche complesse. Queste reazioni chimiche possono essere così riassunte:



### ***L'evoluzione degli organismi pluricellulari***

In seguito, sia gli animali che i vegetali, procedendo sulla strada della costruzione di forme di vita sempre più perfezionate, cominciarono ad utilizzare una nuova strategia organizzativa: anziché rendere complessa una singola cellula inserendovi molti organelli diversi, resero complesso l'organismo inserendovi molte cellule diverse. Le primordiali cellule, sia animali che vegetali, scoprirono che l'unione fa la forza e che la divisione del lavoro migliora la vita!

### ***I nuovi strumenti a disposizione***

#### La coesione fra cellule

Il primo passo verso la costruzione di un organismo pluricellulare fu l'invenzione del meccanismo biochimico che permette di tenere unite fra loro le cellule. Esso si verificò quando, grazie alle solite mutazioni del DNA "inutile", alcune cellule riuscirono a costruire coppie di proteine che si comportavano come i due elementi omologhi dei bottoni automatici. Queste proteine si localizzavano sulla membrana e si estendevano verso il mondo esterno. Quando una cellula che aveva acquistato questa nuova caratteristica si divise, generò cellule figlie che avevano sulla superficie le sue stesse proteine "adesive". Le proteine "femmina" su una cellula legarono le proteine "maschio" sull'altra, incollando le cellule ed impedendo loro di disperdersi nell'ambiente. Poiché il meccanismo di adesione non era casuale ma avveniva solo fra cellule che avevano sulla superficie i due elementi della stessa coppia adesiva, esso permise anche una sorta di "riconoscimento" fra cellule.

Come conseguenza del nuovo meccanismo di adesione, si formarono degli aggregati di cellule derivate da una cellula progenitrice comune che assunsero forme diverse (a bastoncino, a sfera con una cavità centrale ecc.), a seconda della diversa localizzazione sulla membrana delle proteine adesive. Questi aggregati multicellulari non ebbero però grande successo evolutivo. In fondo erano solo più grandi delle singole cellule costitutive e non avevano nessun'altra caratteristica biochimica che li avvantaggiasse in modo decisivo nella lotta per la vita. A questo primo passo dovettero quindi seguirne altri perché si potesse verificare la grande rivoluzione evolutiva che portò alla invenzione degli organismi pluricellulari.

Il differenziamento: cellule uguali ma diverse  
Ma che cosa ha un organismo pluricellulare in più di uno multicellulare?

Prima di tutto diciamo cosa hanno in comune. In entrambi i casi le cellule che li costituiscono hanno tutte lo stesso DNA essendo derivate per successive divisioni da una singola cellula progenitrice. Ed ora vediamo cosa hanno di diverso. Mentre in un organismo multicellulare le cellule costitutive sono tutte uguali fra di loro, in un organismo pluricellulare le cellule hanno strutture e svolgono funzioni diverse. Ad esempio, nell'uomo ci sono almeno una trentina di tipi di cellule, fra cellule epiteliali, connettivali, cartilaginee, ossee, sanguigne, linfoidi, nervose e muscolari che derivano tutte dalla cellula uovo fecondata. Queste cellule, pur avendo lo stesso DNA, hanno una composizione proteica differente che permette loro di diversificarsi, sia morfologicamente che funzionalmente, le une dalle altre.

Negli organismi pluricellulari la diversificazione fra cellule è stata resa possibile da un nuovo meccanismo biochimico: il differenziamento. In realtà questo meccanismo non è proprio nuovo, ma è solo una più drastica applicazione di un meccanismo che abbiamo già incontrato parlando della regolazione che la cellula è in grado di esercitare sui propri geni..

Descrivendo il funzionamento della cellula primordiale abbiamo visto in che modo essa concili il principio della flessibilità con quello della economicità. Pur disponendo di un ampio patrimonio di geni che le permettono di affrontare le diverse situazioni, in ogni momento essa esprime solo certe proteine e blocca l'espressione dei geni il cui prodotto proteico non è in quel momento necessario. Questo meccanismo, che permette l'accensione e lo spegnimento dei geni durante la vita della cellula, viene utilizzato anche per ottenere il differenziamento delle cellule degli organismi

pluricellulari. Mentre la cellula progenitrice (nell'uomo l'uovo fecondato) ha la potenzialità di utilizzare tutti i geni contenuti nel suo DNA, le cellule che derivano da essa, pur contenendo lo stesso patrimonio genetico, possono utilizzarne solo parte. Esse sono in grado di gestire, oltre ai geni deputati alle funzioni metaboliche comuni a tutte le cellule, solo i geni che portano le informazioni per la sintesi delle proteine necessarie alla loro specializzazione. Il resto del DNA è bloccato e non utilizzabile. In questo modo è stato possibile generare cellule che sono strutturalmente e funzionalmente diverse pur avendo la stessa origine e lo stesso patrimonio genetico. Negli organismi superiori questa specializzazione delle cellule è ottenuta per tappe, durante lo sviluppo embrionale. In breve, cellule toti-potenti danno origine a cellule multi-potenti che danno origine alle cellule specializzate. Mentre una cellula toti-potente ha a disposizione tutte le informazioni contenute nel proprio DNA e può formare tutte le cellule dell'organismo, una multi-potente ha una parte del proprio DNA bloccato e può dare origine solo alle cellule di alcuni tipi di tessuti. Le cellule specializzate possono usare solo il DNA che permette di formare cellule uguali a sé stesse; alcune, addirittura, non hanno più a disposizione le informazioni per duplicarsi e non possono produrre cellule figlie. Le cellule toti- e multi-potenti sono dette cellule staminali.

#### La comunicazione fra cellule

Ciascun tipo di cellula svolge un proprio compito e tutte insieme collaborano alla organizzazione ed al funzionamento dell'organismo pluricellulare. Ma, come insegna il racconto biblico della torre di Babele, per costruire una struttura complessa è necessario il coordinamento delle diverse attività e ciò è possibile solo se c'è comunicazione fra i partecipanti all'impresa. L'acquisizione della comunicazione fra cellule è quindi stata l'altra grande conquista che ha permesso alla vita di fare il salto evolutivo verso la pluricellularità.

Per capire i meccanismi che le cellule utilizzano per comunicare fra di loro, bisogna prima chiarire cosa è e come avviene la comunicazione. La comunicazione è il processo che permette il trasferimento di una informazione da un mittente ad un destinatario. Se faccio un breve elenco delle comunicazioni che ho fatto o ricevuto negli ultimi cinque minuti (il cane che abbaia, il suono della campana alla porta, un sorriso di benvenuto, buon giorno, c'è questa raccomandata da firmare, una carezza al cane ecc) forse qualcuno mi dirà che sto sbagliando. Apparentemente, infatti, ben poco di ciò che ho descritto è comunicazione. Ma se lo analizziamo meglio credo che nessuno possa

negare che il cane mi comunicava che era arrivato qualcuno, che quel qualcuno mi comunicava la sua presenza suonando la campana, sorridendogli io gli comunicavo che era il benvenuto, concetto rafforzato dalle parole buon giorno, il postino mi informava di una azione che dovevo eseguire e, accarezzando il cane lo informava del fatto che era un amico.... Questa breve analisi, oltre a dimostrare che la comunicazione è un fenomeno molto più ampio di quello che pensavamo, dovrebbe permetterci di cogliere molti aspetti della comunicazione stessa.

Primo fra tutti, che quando noi comunichiamo, cioè inviamo una informazione, in realtà noi inviamo un segnale. Alcuni di questi segnali sono suoni (il cane che abbaia, il suono della campana, le parole scambiate) altri sono atteggiamenti (il sorriso, la carezza). Perché dico che sono segnali? Perché ciascuno di essi, di per sé, non significa nulla: è solo un suono o un atteggiamento, persino le parole sono solo suoni! Siamo noi che attribuiamo loro un significato, cioè associamo ad ogni segnale una informazione, un messaggio.

Secondo, che per costruire il segnale usiamo degli strumenti che lo producono modificando la propria struttura (il viso, le corde vocali, la campana).

Terzo, che il segnale emesso dal mittente raggiunge il destinatario attraversando lo spazio che li separa. Se per i segnali sonori questo è ovvio, lo è molto meno per quelli luminosi. Ma se consideriamo che al buio, per quante smorfie facciamo, nessuno riceve i nostri messaggi visivi, dovrebbe risultare evidente che essi sono stati trasmessi sotto forma di onde luminose (elettromagnetiche) che hanno viaggiato dal mittente al destinatario.

Quarto, che il ricevente deve avere degli strumenti (occhi, orecchi) per percepire il segnale; senza di essi è tagliato fuori dal flusso della comunicazione.

Quinto, che il ricevente deve avere altri strumenti (ad esempio il cervello) per convertire il segnale in messaggio; senza di essi riceve il segnale ma non lo capisce.

Comunicare, quindi, non è così semplice come sembra! E la complessità è soprattutto legata al fatto che per comunicare sono necessari degli strumenti che sia il mittente che il destinatario debbono avere. E che strumenti!

Queste considerazioni potrebbero farci dubitare del fatto che semplici cellule abbiano potuto intraprendere, con successo, il difficile cammino della comunicazione. Ma la vita ci ha già stupito diverse volte con la sua capacità di risolvere problemi complicatissimi inventando semplici soluzioni.

Anche per affrontare questa nuova sfida la cellula si affida al principio dell'economicità, all'autarchico "con quel che si ha si fa". Quindi nessun nuovo meccanismo, ma nuove applicazioni di meccanismi vecchi e ben collaudati!

Il segnale? In fondo è solo qualcosa che viaggia dal mittente al destinatario. C'è qualcosa che la cellula produce e che si comporti in questo modo? Certo, sono tanti i materiali di scarto che vengono emessi nell'ambiente esterno e che, presumibilmente, vanno a collidere con le cellule vicine. Perché non usarli come segnali? Ad esempio, la molecola X, eliminata quando la cellula è ben sazia, potrebbe essere il segnale di "benessere"; altre molecole, prodotte in diverse condizioni, potrebbero essere le spie che riferiscono alle cellule vicine come sta la cellula "mittente". Abbiamo così risolto il problema della produzione e dell'invio del segnale.

E per riceverlo? E' necessario un sensore, cioè una struttura capace di captarlo. C'è qualche struttura che la cellula già possiede e che sappia captare molecole? La vita stessa della cellula è basata sul legame specifico di molecole con proteine: i trasportatori, gli enzimi, le proteine regolatrici, tutti legano molecole. Per affrontare e risolvere il nuovo problema basterebbe, quindi, dotarsi di proteine, collocate sulla membrana cellulare, che avessero, nella propria struttura, una nicchia che riceve la molecola segnale. Se ogni recettore cellulare fosse selettivo, cioè captasse un solo tipo di molecola segnale fra i tanti con cui collide, ciò avrebbe importanti conseguenze pratiche. Da una parte, sarebbe il patrimonio di recettori di cui è dotata la cellula a definire se essa è destinataria di una molecola segnale oppure no. Dall'altra, sarebbe il patrimonio di recettori di cui è dotata la cellula a selezionare le molecole segnale che essa riconosce, discriminandole fra le tante riversate nell'ambiente dalle cellule mittenti. In poche parole, in base al proprio patrimonio di recettori una cellula sarebbe in grado di scegliere sia di chi è "corrispondente" sia chi sono i suoi "corrispondenti".

Risolti i problemi della trasmissione e della ricezione del segnale, rimane quello della comprensione!

Per poter capire come le cellule lo affrontino, bisogna aver chiaro che la comunicazione fra cellule non avviene per scambiarsi informazioni filosofiche e per arricchirsi culturalmente ma per indurre dei comportamenti biochimici nelle cellule riceventi. In questo contesto la comprensione è la capacità di rispondere ad un messaggio ricevuto con un comportamento coerente, cioè con la giusta risposta metabolica.

Possiede la cellula dei meccanismi che le permettono di cambiare il proprio comportamento biochimico, in risposta a segnali provenienti dall'ambiente? Certo! Tutti i suoi meccanismi di regolazione si sono evoluti a questo scopo, sia quelli con cui modifica il proprio parco macchine sia quelli con cui ne altera l'efficienza. Non c'è quindi bisogno di inventare nuovi meccanismi per comunicare, basta adattare opportunamente quelli già esistenti. In pratica basta che l'interazione fra il segnale ed il recettore influenzi l'attività delle proteine coinvolte nella regolazione cellulare. Se la risposta richiede una modifica del parco macchine, il recettore induce il distacco della proteina di regolazione (lucchetto/macigno) dal DNA, liberando così i geni giusti. Se invece la risposta prevede un cambiamento dell'efficienza delle macchine, il recettore induce nella loro struttura cambiamenti tali da accelerarne o rallentarne l'attività. In entrambi i casi la cellula varia il proprio comportamento metabolico in risposta al segnale ricevuto!

Quando dico comportamento non intendo solo sintesi o degradazione di molecole. Le cellule con cui abbiamo a che fare sono già abbastanza evolute da avere anche altre attività che possono essere influenzate da un segnale. Fra queste c'è il movimento! Molto spesso i segnali hanno lo scopo di influenzare i movimenti di altre cellule. In questo caso il recettore riesce ad alterare la struttura dell'apparato locomotore indirizzando la cellula ricevente verso il luogo da cui proviene lo stimolo. Questo tipo di comunicazione somiglia a quella che, nel nostro mondo, potremmo chiamare olfattiva: il naso, come il recettore, percepisce un odore e ci guida, seguendone la scia, nella direzione in cui esso è più intenso.

Grazie all'invenzione del differenziamento e della comunicazione cellulare la vita poté fare il grande salto verso la costruzione degli organismi pluricellulari formati da più tipi di cellule che si dividono il lavoro e si scambiano informazione per coordinarsi.

### *Costruiamo l'albero genealogico*

Descrivere l'evoluzione degli organismi pluricellulari non è facile per due motivi. Prima di tutto, perché le similitudini che di solito si usano sono solo parzialmente adeguate. Anche quella che rappresenta la storia della vita sotto forma di un albero genealogico descrive l'albero già adulto e non il suo crescere nel tempo. Volendo utilizzarla, è quindi necessario premettere alcune "istruzioni per l'uso".

Immagineremo che lo sviluppo dell'albero della vita sia come quello di un albero vero. La differenza più saliente sarà il fatto che verranno prodotte nuove specie anziché nuove cellule. L'accrescimento sarà ottenuto grazie alla comparsa, ad ogni apice vegetativo, di specie evolutivamente più avanzate di quelle sottostanti ma ancora molto simili ad esse. La lunghezza di ogni ramo, perciò, dipenderà dal numero di successive e modeste miglierie evolutive che lo hanno allungato nel tempo. La comparsa dei rami laterali si avrà quando si genereranno specie che, per una qualche loro caratteristica, si diversificano molto da quelle da cui sono derivate. Come in un albero vero il diametro di un ramo dipende da quanta chioma si è sviluppata da esso, così il successo di un ramo evolutivo sarà correlato al numero di specie che da esso si sono originate. La contemporanea presenza nella struttura dell'albero della vita sia di specie esistenti che di specie estinte sarà rappresentata, rispettivamente, con zone verdi e turgide e con zone lignificate, come negli alberi veri.

Il secondo motivo che rende difficile la descrizione dell'evoluzione degli organismi pluricellulari è la sua vastità. Si tratta, infatti, di un processo che è durato miliardi di anni e che ha prodotto miliardi di specie. Se ci limitiamo a considerare il presente e le specie "visibili" che popolano la terra (dall'uomo al baobab, dal verme solitario alla violetta, dall'ape alla orchidea, dalla sogliola al cedro del libano, dall'elefante alla margherita, dalla pulce al fungo porcino) tutti sono organismi pluricellulari. Se immaginiamo che ognuna di queste specie viventi sia una cellula verde della chioma dell'albero della vita, è intuitiva l'impossibilità di descrivere tutti i percorsi che, partendo dal seme, hanno portato all'evoluzione di ciascuna di esse. Per questo motivo la descrizione che mi accingo a fare dell'evoluzione degli organismi pluricellulari prenderà in considerazione solo le più importanti tappe che hanno portato alla specie di cui facciamo parte, l'*Homo sapiens*. Scaleremo, perciò, l'albero genealogico della vita seguendo un'unica direttrice: quella che, procedendo dal tronco, sale al ramo primario, poi al secondario e poi, ramo dopo ramo, giunge all'apice verde al quale apparteniamo. Pur focalizzando la nostra attenzione su questo percorso, alle principali biforcazioni farò, comunque, una breve descrizione degli itinerari divergenti che hanno portato agli altri importanti gruppi di animali.

### *Le grandi linee dell'evoluzione degli organismi animali pluricellulari*

Come abbiamo visto, l'albero genealogico della vita ebbe origine da un unico seme: la cellula primordiale, che, nella notte dei tempi, iniziò il proprio sviluppo generando un primo piccolo cespuglio. Alcuni rami morirono (i tanti tentativi sbagliati), altri rimasero deboli e stentati (gli Archibatteri e gli Eubatteri). Uno divenne sempre più forte e robusto (gli Eucarioti) e si biforcò ben presto in due rami (gli animali e le piante) che crebbero e si svilupparono indipendentemente l'uno dall'altro.

Tutto è cominciato con il collasso di un pallone

Il ramo animale, oltre a produrre parecchi rami costituiti da specie unicellulari, ne generò alcuni in cui gli individui si univano a formare una struttura multicellulare. Uno di questi rami generò il primo e più semplice animale pluricellulare, probabilmente, partendo da un organismo multicellulare a forma di pallone che collassò. Si formò così un sacco a doppia parete con una apertura verso l'esterno. La parete esterna, detta ectoderma, era formata da cellule con funzioni difensive e sensoriali; quella interna, detta endoderma, da cellule con funzioni digestive che delimitavano la cavità gastrovascolare. Da questo ramo, che diventerà il tronco dell'albero genealogico degli animali pluricellulari, si svilupparono diversi rametti. Mentre la maggior parte di essi ebbe scarsa discendenza e si estinse, tre, ancora oggi, hanno apici verdi. Due dettero origine ad organismi che, pur essendosi ulteriormente evoluti, hanno mantenuto l'originale piano costruttivo. Dei due, i meno evoluti sono i Poriferi (le spugne) che non sono cambiati molto dal quell'antico progenitore. Ma anche i Celenterati, pur essendo più complicati dimostrano chiaramente la loro origine. Anch'essi hanno l'aspetto di un sacco a doppia parete anche se questo si è arricchito, intorno alla bocca, di numerosi tentacoli. Parte delle cellule hanno acquistato caratteristiche contrattili e provocano la contrazione e la deformazione del corpo facendo così muovere l'animale. Altre cellule hanno acquisito caratteristiche sensitive e conduttrici e si comportano come cellule nervose. Alcuni Celenterari (fra cui le meduse, le anemoni di mare ed i coralli) si sono impegnati ancora di più nell'evoluzione ed hanno veri e propri organi di senso statici e visivi, oltre che cellule tattili. Hanno anche vere e proprie cellule muscolari e vere e proprie cellule nervose. Anche il loro aspetto generale è spesso complesso. In molti casi le grandi dimensioni sono ottenute dilatando le dimensioni della cavità gastrovascolare (anemoni di mare); in altri producendo, per gemmazione, nuovi individui che non si staccano ma si differenziano assumendo forme e funzioni molto diverse.

I grandi rami di corallo sono formati da questi individui riuniti in colonie. Ma sia i Poriferi che i Celenterati, per quanto grandi e complessi, hanno, come l'antico progenitore, due soli strati di cellule che delimitano una cavità che funziona da intestino! Essi perciò, chiaramente dimostrano di essere i diretti discendenti di quei due rametti che, nel corso dell'evoluzione, si sono limitati a costituire solo un modesto ciuffo verde vicino alla base del grande tronco.

Il pallone collassato si arricchisce di una imbottitura interna  
 Il terzo ramo, pur originandosi anch'esso dall'antico progenitore, se ne diversificò per una mutazione. Negli organismi mutanti, alcune cellule, duplicandosi, si infilarono fra l'ectoderma e l'endoderma e produssero un terzo strato detto mesoderma. Questo evento, apparentemente insignificante, fu invece la base strutturale per un successivo enorme salto evolutivo. Per capirne l'importanza vi ricordo che già in due occasioni abbiamo visto come la "creatività" dell'evoluzione tragga vantaggio dall'avere a disposizione una gran massa di materiale su cui lavorare. L'esplosione evolutiva degli organismi unicellulari Urcarioti è stata possibile grazie alla disponibilità di una grande quantità di DNA; allo stesso modo, l'evoluzione degli organismi pluricellulari ha avuto origine quando fu disponibile la gran massa di cellule degli organismi multicellulari!

La disponibilità di questo nuovo strato di cellule permise, all'evoluzione successiva, di ottenere specie con una complessità strutturale ben maggiore. Queste cellule, che riempivano come una imbottitura lo spazio fra l'intestino e l'esterno, furono il materiale di base che permise alle nuove informazioni genetiche acquisite di "esprimersi" inventando nuove strutture e nuove funzioni. Ma anche i due vecchi strati di cellule si dettero da fare per svolgere funzioni sempre più specializzate e per organizzarsi in strutture anatomiche più adatte a svolgere la loro funzione. Caso esemplare è quello dello sviluppo della cavità gastrovascolare. A quei tempi i processi chimici della digestione si svolgevano dentro le cellule digestive che rivestivano questa cavità: per endocitosi esse inglobavano le particelle alimentari, le scomponevano nelle molecole semplici costitutive da inviare poi alle altre cellule. Per svolgere in modo ottimale il loro compito, il numero delle cellule digestive dovette aumentare in proporzione al numero di cellule mesodermiche ed ectodermiche da nutrire. Con l'aumento delle dimensioni dell'organismo, la cavità gastrovascolare aumentò la propria superficie, dapprima divenendo più lunga e successivamente sviluppando dei diverticoli

lateralmente. Questa soluzione permise anche alle cellule dell'imbottitura di venire nutrite adeguatamente. Le sostanze di rifiuto eliminate da queste cellule "interne" non potevano, però, venire allontanate dall'acqua che lambiva solo le cellule situate alla superficie dell'organismo. Si dovette perciò evolvere un apparato canalicolare interno che raccoglieva i rifiuti e li convogliava all'esterno. Ovviamente, man mano che gli organismi divennero più grandi e più complessi, la necessità di cibo aumentò. Non si poteva certo confidare che esso piovesse dal cielo (pardon, dal mare!) e si evolsero, perciò, delle strutture che permisero di procurarselo in modo attivo. Comparvero organi di senso per sentirlo ed una ben organizzata struttura muscolare per andarlo a prendere. Il controllo nervoso del movimento non poteva più essere svolto da cellule nervose sparse un po' qua ed un po' là. Si formò un sistema nervoso controllato da una specie di cervello in cui si "decideva" il comportamento dell'animale. Grande impegno venne anche dedicato alla costruzione di organi, ovari e testicoli, per la produzione di cellule germinali. Tutti gli organismi pluricellulari, infatti, per riprodursi usano delle cellule specializzate, genericamente detti gameti, che devono essere prodotti e convogliati all'esterno. Fu, quindi, necessario costruire anche gli ovidotti ed i dotti deferenti.

*Scavare buchi nel pieno o riempire una cavità?*

Come si capisce da questa breve descrizione, la disponibilità di un terzo strato di cellule permise al terzo ramo evolutivo di svilupparsi e di irrobustirsi, prendendo il sopravvento sugli altri. Ma ben presto venne il momento in cui anch'esso si divise in rami. Le divergenze si verificarono sul modo di organizzare, all'interno dell'organismo, gli organi in costruzione. Tutti gli organi che si stavano formando trovavano collocazione nello spazio compreso fra la superficie esterna dell'organismo e la parete interna del suo tratto digerente. Alcuni organismi riempirono questo spazio con una massa cellulare nella quale venivano "scavati" i diversi organi che man mano si evolvevano. Questa scelta non deve essere stata molto vantaggiosa poiché ai nostri giorni, fra tutti gli animali viventi, solo i Platelminiti (il verme solitario è uno dei più noti) hanno questo tipo di organizzazione interna. E questo ramo, che pur è giunto fino a noi, non ha certo un gran vigore! Altri organismi sperimentarono un'altra soluzione: ricavarono fra l'intestino e la muscolatura esterna una cavità simile ad un sacco, detta celoma, nella quale erano contenuti, indipendenti gli uni dagli altri, gli organi interni. L'indipendenza dei muscoli della parete del corpo, del tratto digerente e di tutti gli

altri organi impedì che il movimento di ciascuno di essi interferisse con le funzioni degli altri. Inoltre la presenza di un liquido nel celoma permise la circolazione di prodotti di rifiuto, di gas e sostanze nutritive. Fra gli organismi che scelsero questa nuova organizzazione degli organi interni, molti non furono in grado di portarla alle estreme conseguenze. La maggior parte di questi rametti sviluppò solo un abbozzo di celoma e si estinse ben presto; pochi di essi sono giunti fino a noi e non sono certo un grande esempio di successo evolutivo (fra essi ci sono i Nematelminti, i vermi dei bambini). Il ramo che si dotò di un vero e proprio celoma, grazie ai vantaggi che esso offriva, ebbe un successo ben maggiore e divenne l'asse principale dell'evoluzione animale. La maggior parte degli animali viventi, noi compresi, derivano da questo.

Ma, man mano che questo ramo cresceva ed aumentavano le dimensioni corporee dei suoi discendenti divenne sempre più pressante la necessità di ottenere il massimo dagli alimenti ingeriti. Come abbiamo visto, il problema era stato risolto, fino ad allora, aumentando la superficie della cavità gastrovascolare ma questa strategia non era percorribile all'infinito! La soluzione vera fu l'acquisizione da parte delle cellule endodermiche della capacità di secernere fuori dalla cellula alcuni enzimi digestivi. Si ebbe così una digestione in parte extracellulare ed in parte intracellulare: grandi quantità di alimenti potevano venire parzialmente digeriti nel lume intestinale e successivamente assorbiti dalle cellule entro le quali si completava la digestione. Ma se questa strategia permetteva di digerire più velocemente gli alimenti aveva però gravi controindicazioni: gli alimenti parzialmente digeriti si venivano a trovare nella cavità gastrovascolare che aveva una unica apertura attraverso la quale non solo entrava il cibo ma uscivano anche eventuali scorie. E' facile capire che questa commistione di funzioni rendeva la resa di questa cavità, in termini di captazione delle sostanze nutritive, non certo ottimale. Molto materiale che avrebbe potuto ancora essere assimilato veniva, infatti, eliminato con le scorie.

Una questione di orifizi ...

Il passo evolutivo successivo fu, quindi, il miglioramento dell'apparato digerente trasformando la cavità gastrovascolare in un tubo digerente. Tubo significa che il tratto intestinale deve avere due aperture: una che funzionava da bocca ed una da ano! Poiché la bocca c'era già, sarebbe stato sufficiente aprire, in fondo alla cavità, una apertura che comunicasse con l'esterno. E così fece la maggior parte degli organismi. Ma ce ne furono alcuni, fra cui i nostri antenati, che fecero

l'opposto: l'apertura esistente divenne l'ano ed il nuovo orifizio divenne la bocca. Se a questo punto posso permettermi un commento, debbo dire che questo nodo dell'evoluzione ha sempre costituito per me la esemplificazione più lampante dell'ineluttabilità del fatto che c'è sempre qualcuno che deve fare le cose al contrario degli altri ... e non sempre ciò è male!

Al ramo dei Protostomi (quelli con la bocca al posto dell'apertura originale) appartengono quasi tutti i gruppi di animali oggi viventi (dagli Anellidi ai Molluschi, agli Artropodi); al ramo dei Deuterostomi (quelli con la bocca dall'altra parte) appartengono i Cordati (di cui noi facciamo parte) e gli Echinodermi (per intenderci i ricci e le stelle di mare che, sorprendentemente, sono nostri parenti abbastanza stretti). Come si intuisce da questo breve elenco di gruppi animali, sia i Protostomi che i Deuterostomi hanno avuto un grande successo evolutivo e fra di essi, se si vuol quantificare tale successo in base al numero di specie oggi viventi, non vi è dubbio che i Protostomi costituiscono il ramo che si è sviluppato di più. Basta pensare alla vastità del gruppo dei Molluschi: dai Gasteropodi (patelle, lumache, conchiglie di vario genere...), ai Bivalvi (cozze, vongole...), ai Cefalopodi (seppie, calamari, polpi...). Per non parlare degli Artropodi, che costituiscono il gruppo zoologico quantitativamente prevalente, a cui appartengono i Crostacei (denti di cane, gamberetti, aragoste...), gli Aracnidi (scorpioni, ragni, zecche, acari...), gli Insetti (non c'è bisogno che vi rammenti chi sono).

Il ramo dei Deuterostomi è più gracile e, se noi fossimo *super partes*, lo considereremmo sicuramente secondario. Ma poiché è quello a cui apparteniamo, abbiamo la tendenza a considerarlo di gran lunga il più importante.

Ben presto il ramo dei Deuterostomi si divise: il ramo che dette origine agli Echinodermi se ne andò per il suo triste destino mentre il ramo dei Cordati si avviò verso un brillante futuro.

,... e di spina dorsale

L'antenato dei Cordati possedeva delle cellule vacuolizzate che formavano una sorta di cordone dorsale che costituiva l'asse del corpo. Questa semplice struttura rigida interna, permise una rivoluzione nel modo di muoversi nell'acqua. Molti degli animali di cui abbiamo parlato finora si muovono grazie a contrazioni ritmiche che causano l'espulsione dell'acqua da una cavità, determinando, per reazione, lo spostamento del corpo. Così si muovono le meduse per contrazione della muscolatura dell'ombrello ed i polpi per espulsione dell'acqua dalla cavità del mantello. Più

frequente è il movimento prodotto dalla contrazione del sacco muscolo-cutaneo o quello prodotto dall'accorciamento ed allungamento della muscolatura del tronco. In questo tipo di movimento il corpo viene percorso longitudinalmente da onde di contrazione. Questo tipo di movimento, però, è possibile solo se l'animale sfrutta le asperità del terreno come punti d'appoggio. Senza di esso, infatti, la contrazione dei muscoli porta solo all'accorciamento del corpo di questi animali "flosci", cioè privi di una struttura interna rigida. Si muovono in questo modo gli Anellidi (il lombrico), le larve degli Insetti (i bruchi) e molti Gasteropodi (le lumache) che però, per quanto si è detto, sono confinati a muoversi su di una superficie. Anche gli animali che si muovono con l'aiuto degli arti, come i Crostacei e gli Insetti, si spostano sul terreno.

La comparsa della corda dorsale permise di sviluppare un nuovo tipo di locomozione. Essendo la corda una struttura rigida ma elastica, può essere arcuata dalla contrazione di muscoli attaccati alle sue estremità e paralleli ad essa. Quando la muscolatura del corpo si contrae alternativamente a destra e a sinistra, si ha un incurvamento della corda, e cioè dell'asse dell'animale, verso l'uno o l'altro lato; gli spostamenti alterni in senso laterale fanno sì che la parte posteriore del corpo si comporti da organo propulsore. Questo tipo di movimento affrancò dal contatto con la terra gli organismi che lo utilizzavano aprendo loro le porte di un nuovo ambiente in cui era più facile mangiare e più difficile essere mangiati. Nuotando, infatti, poterono raggiungere e cibarsi dell'enorme quantità di plancton (l'insieme delle forme larvali degli altri animali) che galleggia più o meno passivamente nel mare. Nuotando, inoltre, poterono entrare in un ambiente in cui le occasioni di scontro con animali concorrenti o, peggio, con animali predatori drasticamente diminuivano. Tutto ciò costituì un indubbio vantaggio che certamente li favorì nella lotta per la vita.

Come abbiamo già visto in precedenza, ogni nuova invenzione non compare repentinamente. Sono sempre molti i tentativi. Solo i migliori sono premiati con un sostanziale vantaggio evolutivo mentre gli altri, che ci hanno provato ma hanno prodotto soluzioni insoddisfacenti, o si estinguono o languono. I Tunicati e gli Acranii sono i rametti striminziti che hanno una corda ma non sono riusciti a trasformarla in un organo efficiente. I Vertebrati, invece, rinforzarono la corda con uno scheletro formato da segmenti detti vertebre, la resero sempre più adatta a svolgere la propria funzione. Questa strategia fu sicuramente vincente, come è dimostrato dallo sviluppo che ha avuto questo ramo.

Malgrado le differenze fondamentali che distinguono i gruppi appartenenti ai Protostomi ed ai Deuterostomi, i problemi che essi dovettero affrontare, durante la successiva evoluzione, furono molto simili ed anche le strategie generali usate per superarli lo furono.

Per non allontanarmi dalla linea evolutiva che ha portato all'*Homo sapiens* descriverò quelle adottate dai Vertebrati. La digestione divenne sempre più extracellulare grazie alla secrezione di un numero sempre maggiore di enzimi che trasformavano gli alimenti in composti più semplici e solubili e quindi più facilmente diffusibili ed assimilabili. Alcuni di questi enzimi, però, agivano bene in ambiente acido mentre altri richiedevano condizioni opposte. Per poter svolgere al meglio la funzione digestiva fu quindi necessaria una specializzazione di zone ben distinte del tratto digerente. Comparvero, così, non solo lo stomaco e l'intestino ma anche ghiandole digestive come le salivari, il fegato ed il pancreas. Man mano che aumentavano le dimensioni corporee divenne sempre più problematico sia far giungere a tutte le cellule le sostanze nutritive e l'ossigeno sia allontanare da esse l'anidride carbonica e le sostanze di rifiuto. Per risolvere questi problemi si evolse un apparato circolatorio, un sistema chiuso e continuo di tubi entro i quali scorre uno speciale tessuto circolante detto sangue. Il flusso venne mantenuto da porzioni speciali dei vasi sanguigni che si contraggono e pulsano come un cuore primitivo. L'ossigeno disciolto nell'acqua venne raccolto da capillari che erano a contatto con la superficie del corpo. Ma la quantità di ossigeno che si scioglieva spontaneamente nel sangue non era sufficiente per l'approvvigionamento di tutte le cellule. Per migliorare il trasporto comparve una proteina che capta l'ossigeno: l'emoglobina. Anche questo trucco escogitato per migliorare la respirazione cutanea, a lungo andare non si dimostrò sufficiente. Vennero sviluppati apparati respiratori specializzati in cui veniva enormemente aumentata la superficie in cui i capillari erano a contatto con l'ambiente esterno. Essi sono denominati branchie e sono situati in una parte del corpo in cui l'acqua ricca di ossigeno si rinnova continuamente. Nei diversi animali la loro localizzazione è assai diversa: in alcuni sono sulla superficie del corpo, in altri all'inizio dell'apparato digerente. La rimozione dei prodotti di scarto venne svolta da strutture filtranti sempre più complesse e sempre più simili ai reni.

A causa dell'aggiunta successiva di tutti questi organi ed al loro successivo aumento di complessità, le dimensioni degli animali andarono sempre più aumentando. Ciò creò parecchi problemi che in parte vennero superati aumentando ulteriormente le dimensioni degli organi ed in

parte ricorrendo ad un nuovo piano organizzativo: anziché aumentare le dimensioni di un organo unico si ebbe la ripetizione degli organi. Questo fu particolarmente vantaggioso per la locomozione: avere ripetuti parecchie volte i segmenti di corpo che portano gli organi di locomozione è certamente un vantaggio sia per procacciarsi il cibo che per sfuggire ai pericoli. Con questi stessi intenti (procacciarsi il cibo e sfuggire ai pericoli) si svilupparono ulteriormente anche gli organi di senso. Oltre ai recettori viscerali, che percepiscono le sensazioni provenienti dall'interno (cioè dagli apparati digerente, respiratorio, circolatorio ecc.), si formarono veri e propri organi deputati a percepire stimoli provenienti dall'esterno. Organi per la percezione della pressione e dei movimenti dell'acqua, organi olfattivi e gustativi, organi visivi, organi uditivi e statici captavano i segnali esterni e li inviavano al sistema nervoso. Anche questo si perfezionò differenziandosi nel sistema nervoso centrale, che riceve i segnali e li elabora, e nel sistema nervoso periferico che conduce gli ordini all'apparato locomotore. Per ottenere comportamenti sempre più sofisticati finalizzati alla risoluzione dei problemi contingenti, il sistema nervoso divenne sempre più complesso.

Ma anche le mascelle fanno la differenza

Riprendendo l'ascensione dell'albero della vita, vediamo come avvenne l'evoluzione del ramo dei Vertebrati. Avevamo lasciato i nostri antenati che scorrazzano nel mare grazie al nuovo sistema di propulsione. Ma la loro vita non era tutta rosa e fiori! Infatti, appena si fermavano riprecipitavano negli abissi spinti dalla pressione della colonna d'acqua che li sovrastava e che, schiacciandoli, ne aumentava la densità. Perché potessero "fermarsi" liberamente nei mari si dovette evolvere la vescica natatoria con funzione idrostatica, cioè con il compito di equilibrare il peso specifico dell'animale con quello dell'acqua. Quando essa si dilatava, diminuiva il peso specifico del pesce che, quindi, risaliva. Se invece essa si contraeva, calava il peso specifico ed il pesce sprofondava. Le variazioni di diametro della vescica, originatasi come diverticolo della parete intestinale, erano ottenute mediante la secrezione o il riassorbimento di gas provenienti dai vasi sanguigni che ne ricoprivano le pareti. Grazie a questa nuova struttura i Vertebrati poterono veramente dominare i mari!

Ma muoversi liberamente in un elemento è un mezzo non è un fine. Il fine primario è procurarsi il cibo e la struttura anatomica dei Vertebrati deputata a ciò era abbastanza carente. Avevano una

bocca imbutiforme, adatta a raccogliere il cibo dal fondo non certo ad afferrare prede in movimento. Da questi primi Vertebrati, detti Agnati, si staccò un nuovo ramo, gli Gnatostomi, che svilupparono, a contorno della bocca, due mascelle che rendevano più facile la cattura del cibo. Gli Agnati, cioè privi di mascelle, pagarono duramente questa mancanza e si estinsero ben presto. Unici sopravvissuti sono i Ciclostomi di cui fa parte la lampreda che con la sua bocca a ventosa si attacca ad altri animali e succhia da essi il nutrimento.

La maggiore facilità con la quale si procuravano il cibo assicurò ai primi Gnatostomi, precursori dei pesci, un grande sviluppo che si concretizzò, non solo in una esplosione demografica ma anche nella comparsa di tantissime nuove specie. Ma ben presto l'ambiente che avevano colonizzato non fu più il paradiso in cui c'era cibo per tutti ed i pericoli erano pochi; si trasformò sempre più un inferno in cui bisognava lottare per ogni boccone e chi soccombeva diveniva cibo a sua volta.

L'emigrazione verso nuovi mondi è sempre stata uno strumento per sfuggire all'amaro destino a cui si va incontro in patria. La storia delle emigrazioni dell'umanità verso terre lontane, ricche e poco abitate ne è testimone. Per gli abitanti del mare il nuovo mondo non era neanche tanto lontano: cominciava subito lì, sul bagnasciuga. In quanto a ricchezza non c'erano dubbi: la quantità di insetti e di crostacei che vi abitavano, cibandosi di alghe, molluschi o pesci spiaggiati, era sotto l'occhio, si fa per dire, di tutti. I pericoli poi erano modesti: gli insetti terrestri, per le loro caratteristiche costruttive, non possono essere di grandi dimensioni e quasi sempre un nemico piccolo è un piccolo nemico. Ma c'era un problema: bisognava essere attrezzati anatomicamente per poter conquistare il nuovo mondo. La comparsa di nuove strutture anatomiche che permettessero di uscire dal mare e colonizzare le terre emerse fu, a questo punto, la carta vincente dell'evoluzione.

Ci si attrezza per la conquista delle terre emerse

In tanti ci provarono. Alcuni erano proprio senza speranza. Erano quelli che avevano irrobustito la corda con vertebre cartilaginee. Il loro scheletro era sì in grado di spostare il corpo nell'acqua, essendo il suo peso sostenuto dal liquido spostato, ma non certo di sostenerlo sulla terra! Questi pesci dovevano comunque essere degli efficienti nuotatori se un loro ramo (gli Elasmobranchi a cui appartengono gli squali) è giunto fino a noi. Ma indubbiamente la terra non era per loro.

Altri pesci, detto Osteoitti, avevano rafforzato le vertebre con strutture ossee molto più robuste e fra questi si devono cercare i pionieri che abbandonarono le acque per vivere sulle terre emerse. Perché gli Osteoitti pionieri potessero compiere il gran passo furono, però, necessarie molte altre trasformazioni, prime fra tutte quelle che permisero di respirare l'ossigeno contenuto nell'aria. La vescica natatoria, con la sua capacità di assorbire gas, si dimostrò un buon punto di partenza su cui lavorare per ottenere una struttura facente funzione di polmone! Ma mancavano i dotti che la mettessero in comunicazione con l'ambiente esterno, cioè le coane, che sono la condizione indispensabile per permettere l'inspirazione dell'aria e per tentare, con qualche speranza di successo, la conquista delle terre emerse.

E' sulle coane che avvenne la grande discriminazione. Molte specie, fra cui gli Osteoitti antenati di tutti i pesci ossei che oggi esistono, non riuscirono a dotarsene e furono per sempre relegati a vivere nell'ambiente acquoso. Altri, invece, svilupparono una comunicazione fra le fossette olfattive e la cavità boccale. Erano pronti a far capolino sulla terra!

Tutti, penso, abbiate visto in televisione documentari in cui sono presentati pesci di acque tropicali che, durante i mesi caldi, quando le pozze in cui vivono si prosciugano o sono meno ossigenate, respirano per mezzo di una sorta di polmone. Essi appartengono ai Dipnoi (dal greco respiro due volte), uno dei tanti rami che si svilupparono per affrontare l'avventura terrestre. A differenza di tanti altri che si sono estinti, esso è giunto fino a noi. Ma è un ramo molto modesto che non ha dato una grande progenie: lo dimostra il fatto che, a parte questo nuovo meccanismo respiratorio, per il resto l'animale è, a tutti gli effetti, simile ad un antico pesce, anzi ha persino poca ossificazione nelle sue vertebre.

Ma da chi deriviamo noi? Da nessuno dei rami o rametti di cui abbiamo parlato: da un altro ramo che aveva acquisito non solo la capacità di respirare ma anche quella di muoversi sulla terra. I nostri antenati sono i Labirintodonti che avevano irrobustito l'asse delle pinne formando i tre segmenti degli arti che caratterizzano i Tetrapodi (i vertebrati terrestri). Essi sono ormai estinti, surclassati dai milioni di specie terrestri a cui hanno dato origine: specie che si dotarono di nuove strutture anatomiche e con queste tentarono nuove vie evolutive. La maggior parte di queste specie si infilarono in vicoli che prima o poi si dimostrarono ciechi. Ad esempio, gli antenati degli Anfibi (rane, rospi, salamandre ...), che pur avevano acquisito sia una pelle abbastanza adatta a resistere alla disidratazione sia degli arti abbastanza efficienti, si arenarono per la mancanza di strutture che

permettessero loro di svincolarsi dall'acqua nella fase della riproduzione. Come i loro discendenti, avevano, infatti, bisogno dell'acqua non solo per la fecondazione ma anche per le prime fasi del loro sviluppo embrionale (i girini stanno nelle pozze e respirano con le branchie come i pesci). Questa schiavitù li costrinse a vivere in un *habitat* molto limitato e, di fatto, impedì loro di approfittare della maggior parte delle opportunità alimentari offerte dalle terre emerse.

Un mare tascabile per lo sviluppo embrionale

Se ci furono tanti perdenti ci fu anche qualche vincitore! Alcune specie riuscirono a dotarsi di quelle caratteristiche che permisero loro di superare questo scoglio evolutivo. I nostri antenati, ad esempio, acquisirono organi copulatori che permisero l'introduzione dei gameti maschili nel corpo della femmina. Questa fecondazione interna poteva avvenire ovunque. Essi acquisirono anche un nuovo e rivoluzionario tipo di sviluppo embrionale che li svincolò completamente dalle zone umide. Durante le fasi precoci dello sviluppo, alcune cellule davano origine ad una membrana, detta amnios, che circondava l'embrione; lo spazio compreso fra l'amnios e l'embrione veniva riempito dal liquido amniotico divenendo, in questo modo, il laghetto personale nel quale l'embrione si sviluppava. L'uovo fecondato internamente poteva ora essere deposto e svilupparsi ovunque, si fa per dire, anche nel bel mezzo di un deserto!

Gli antichi Amnioti ebbero perciò la possibilità di trasferirsi sulle terre emerse. Ma un conto è sopravvivere in un nuovo ambiente, un conto è viverci e prosperare. Uno dei grossi problemi che incontrarono le specie pioniere fu l'evaporazione: la pelle all'aria si seccava disidratando l'animale. Furono sicuramente favorite, nella conquista del nuovo ambiente, le specie che riuscirono a modificarla trasformando gli strati cellulari più esterni in strutture cornee. In questo modo il corpo dell'animale venne ricoperto da un mantello di protezione che impediva la perdita di acqua dai tessuti sottostanti. L'organizzazione dello strato corneo in squame, inoltre, produsse dei minuscoli anfratti in cui veniva trattenuto un sottile strato di aria (con una camicia addosso, d'estate si sta molto meglio).

Mettere a punto questi sistemi dovette richiedere un certo tempo e non tutte le specie che ci avevano provato ci riuscirono. Furono molte le defezioni: ad esempio, nelle prime fasi dell'evoluzione dei Rettili, gli Ittiosauri ed i Sauropterigi trovarono più semplice tornare a vivere nel mare. Quelli che ce la fecero si trovarono davanti paludi, pianure, foreste .. Ogni ambiente

terrestre era un mondo da colonizzare e loro modificarono la propria struttura corporea per conquistarli tutti. Divennero grandi, piccoli, erbivori, carnivori, a quattro zampe, a due zampe...! Non è certo necessario che mi dilunghi nel raccontarvi l'esplosione evolutiva dei Rettili. Tutti avete sicuramente visto bellissimi filmati che documentano il successo di questi animali che divennero, per milioni di anni, gli incontrastati dominatori delle terre emerse.

Un nuovo ambiente da conquistare: la notte

C'era però un ambiente che risultava particolarmente ostico da conquistare, off limits. Non era un ambiente geografico ma temporale: la notte.

Per capire l'enormità del problema è sufficiente ricordare che la velocità delle reazioni chimiche dipende dalla temperatura (quanto più è freddo tanto più le reazioni sono lente) e ricordare che gli organismi viventi sono complessissime macchine chimiche. Da questi due dati di fatto risulta evidente che durante la notte, quando la temperatura si abbassa, gli animali rallentano la loro attività. Questo problema, ovviamente, era sempre esistito ma solo in questo momento divenne drammatico. Fino ad allora gli animali erano vissuti nei mari ed avevano risentito poco dei cambiamenti di temperatura che si verificano durante la giornata. La temperatura dell'acqua, infatti, è molto costante (se ciò non fosse vero, il bagno in mare a mezzanotte avrebbe meno estimatori). Ma altra cosa è l'atmosfera! I Rettili, che erano e sono eterotermi (la loro temperatura corporea varia in funzione di quella esterna), non erano attrezzati per la vita notturna. Ma in fondo chi glielo faceva fare di divenire notturni: c'erano tanti ambienti meno ostili a disposizione!

Fra i discendenti dalle prime forme rettiliane c'erano però degli animali, piccoli e mingherlini che per queste loro caratteristiche venivano cacciati e scacciati dai paradisi nei quali gli altri Rettili spadroneggiavano. La loro unica possibilità di sopravvivenza era quella di rifugiarsi nell'ambiente inaccessibile ai loro nemici. Lo fecero modificando il proprio corpo e rendendolo adatto ad avere una vita attiva anche durante la notte. Grazie alla comparsa nella pelle di uno strato di cellule adipose, diminuirono la dispersione del calore corporeo. L'opera di coibentazione venne ulteriormente migliorata trasformando le squame in peli. Ma questi "sistemi passivi" non sarebbero stati sufficienti se non si fosse contemporaneamente evoluto un sistema attivo. Una aumentata vascolarizzazione della pelle permise di portare più alimenti ed ossigeno alle cellule che, dalla loro combustione, liberarono grandi quantità di calore. Equipaggiati con questo innovativo tipo di pelle,

che aveva sia le funzioni di una coperta che di un termoforo, i nostri antenati omeotermi (la cui temperatura corporea è mantenuta abbastanza costante indipendentemente dalla temperatura esterna) furono in grado di affrontare la vita notturna.

Ma era vita grama! L'omeotermia poteva essere conservata solo ingerendo grandi quantità di alimenti e questo ebbe parecchie conseguenze. Essa limitò la crescita corporea (più crescevano più si dovevano nutrire) e ne fece dei carnivori (il contenuto calorico della carne è molto superiore a quello dei vegetali) piccoli ed aggressivi. Poiché di notte è buio e la vista è di scarso aiuto, per cacciare, dovettero sviluppare soprattutto l'udito e l'olfatto. Per lo stesso motivo, per riconoscersi fra partner sessuali, non si dotarono di livree appariscenti ma di ghiandole che liberavano odori particolari. La rivoluzione che la vita notturna aveva prodotto negli organi di senso ebbe importanti ripercussioni anche nel cervello. La parte del cervello che riceveva gli stimoli ed i segnali olfattivi e che li elaborava ed integrava si sviluppò molto di più di quella corrispondente dei Rettili. Questi nostri antenati costituirono il rametto dei Teriapsidi che, per milioni di anni, crebbe stentatamente all'ombra del grande ramo dei Rettili che, come abbiamo detto, si sviluppò enormemente.

Per non parlare del cielo

Col passare del tempo le terre emerse non furono più il paradiso in cui c'era cibo per tutti ed i pericoli erano pochi: si trasformarono sempre più un inferno in cui bisognava lottare per ogni boccone e chi soccombeva diveniva cibo a sua volta. E' questo un adagio che abbiamo già sentito e che, ancora una volta, fa presagire grandi cambiamenti all'orizzonte! Alcuni Rettili cercarono di vincere la loro battaglia per la vita divenendo sempre più grandi, altri sempre più aggressivi, altri correndo sempre più velocemente, altri ... librandosi nell'aria (ambiente, forse non più ricco di cibo ma di certo meno pericoloso). Per ottenere questo risultato dovettero principalmente trasformare gli arti anteriori in ali ed alleggerire lo scheletro. Questa via venne tentata da parecchi gruppi ed anche il cielo divenne alquanto affollato. Alcuni dei rettili volanti, probabilmente i più piccoli e mingherlini, per non venire sopraffatti dai più grandi svilupparono anch'essi la strategia dell'omeotermia. Anziché in peli le loro squame si trasformarono in piume e penne che, oltre a svolgere la funzione di coperta termica, servirono anche per aumentare la superficie portante dell'ala. Essi divennero i primi Uccelli e, potendo volare dall'alba al tramonto, riuscirono ad occupare una nicchia spazio temporale non colonizzata dai loro agguerriti concorrenti.

A questo punto la situazione era ormai ben definita: i Rettili eterotermi erano i dominatori durante il giorno mentre gli Uccelli ed i Terapsidi omeotermi cercavano di conquistare il cielo e la terra nelle ore in cui i Rettili erano inattivi. Per milioni di anni le cose andarono avanti così.

Una secrezione apparentemente inutile: il latte

Ma non dovete pensare che nulla accadesse. Infatti, durante i milioni di anni di predominio dei Rettili, l'evoluzione andò avanti e dai Terapsidi si svilupparono i nostri primi antenati Mammiferi. Cosa hanno di particolare i Mammiferi che li contraddistingue da tutti gli altri animali? Hanno delle ghiandole (le mammelle) che producono il latte col quale nutrono i propri piccoli. Per capire come sia avvenuto questo ulteriore salto evolutivo è necessaria una breve premessa.

Tutti i cambiamenti anatomici e funzionali che avevano permesso all'originale organismo pluricellulare di evolversi nei milioni di specie che erano vissute fino ad allora, erano stati possibili grazie alla comparsa di nuovi geni capaci di produrre nuove proteine. Ma, per quanto il DNA originale fosse tanto e per quanto tanto di questo DNA fosse "inutile", è difficile pensare che ce ne fosse ancora del disponibile per produrre nuovi geni. In realtà, la quantità di DNA a disposizione di uno qualunque degli animali di questo antico mondo era molto maggiore a quella del suo primo antenato. Da dove era venuto tutto quel DNA? La risposta è più semplice di quanto ci si possa aspettare: dal DNA stesso! Infatti, ogni tanto, si erano verificati degli errori per cui era stata sintetizzata una copia di un pezzo di doppia catena di DNA ed il nuovo pezzo si era unito alla vecchia catena, allungandola. Questo "doppione", pur contenendo un gene o un pezzo di esso, era DNA "inutile" poiché produceva una proteina di cui l'organismo non aveva bisogno perché già l'aveva. Su di esso potevano lavorare le mutazioni, cambiandolo fino a renderlo capace di produrre una nuova proteina in grado di svolgere qualche nuova utile funzione.

Il "doppione" responsabile dell'origine dei Mammiferi deriva da un gene che anche oggi produce una antichissima proteina salivare ad azione antibatterica, il lisozima. Opportunamente modificato, il "doppione" produsse una proteina grazie alla quale il galattosio, anziché attaccarsi a delle proteine, si attaccava al glucosio producendo un nuovo zucchero, il lattosio. Nell'animale che aveva subito questo straordinario evento, alcune ghiandole cominciarono a produrre un liquido zuccherino: il primo latte!

A dire il vero, all'inizio avere il latte non era di nessun vantaggio. I nostri antenati, come i Rettili e gli Uccelli, deponavano uova dalle quali nascevano animali già perfetti anche se in miniatura (pensate ai cocodrillini o alle tartarughine di tanti documentari). Questi piccoli animali non avevano bisogno di una dieta particolare poiché erano perfettamente in grado di nutrirsi mangiando gli stessi alimenti di cui si cibavano i loro genitori. La produzione di latte, all'inizio, non fu quindi vantaggiosa, anzi, fu quasi un fastidio.

Ma l'evoluzione ha spesso fatto tesoro del vecchio proverbio "Impara l'arte e mettila da parte". E venne anche il momento in cui il latte fece la differenza. Oltre alle mutazioni favorevoli, a volte, anzi molto spesso, si verificano anche mutazioni incompatibili con la vita. Una di queste è la deposizione di uova che si schiudono prematuramente e fanno nascere immaturi destinati a morire perché non in grado di nutrirsi. Quando questa mutazione si verificò in femmine che producevano il latte, essa non fu letale. I neonati, infatti, leccando questo cibo liquido e molto energetico, poterono aumentare le proprie probabilità di sopravvivenza. In pratica, la disponibilità di latte rese compatibile con la vita un accorciamento dello sviluppo embrionale. Ma che vantaggio ebbe la specie dall'aver nel proprio patrimonio genetico una simile mutazione?

Qualche vantaggio deve certamente esistere poiché, durante l'evoluzione di vertebrati, tali mutazioni sono sempre state premiate. Per capirne il motivo consideriamo che nei primi Vertebrati (pesci ed anfibi) lo sviluppo delle uova fecondate avveniva nell'acqua. A causa della bassa temperatura, lo sviluppo era piuttosto lento e le uova rischiavano di essere divorate tutte prima che qualcuna riuscisse a schiudere. Per assicurare la propria sopravvivenza, ogni specie dovette perciò aumentare il numero di uova fecondate in funzione della durata della vita embrionale. E' evidente che ogni combinazione di mutazioni che faceva nascere discendenti vitali in tempi più brevi era vantaggiosa, poiché richiedeva minori investimenti. Questa strategia di fondo venne perseguita già nei Rettili che accelerarono lo sviluppo embrionale aumentando la temperatura delle uova, ad esempio deponendole in nidi ricavati nella sabbia calda o circondandole con foglie che, decomponendosi, liberano calore. Questa strategia venne ulteriormente perfezionata negli organismi omeotermi (Uccelli e primi Mammiferi), tenendo l'embrione ad una temperatura elevata e fissa, grazie alla cova. Ma l'indubbio rischio a cui erano sottoposti i genitori, fermi per giorni e giorni alla mercé dei predatori, fu un motivo in più per premiare ulteriormente l'accorciamento dello sviluppo embrionale.

Questa è la logica evolutiva che permise ai Terapsidi dotati di latte di avvantaggiarsi nella lotta per la vita. Non dovete pensare, però, che questa mutazione stravolgesse completamente il comportamento dei primi Mammiferi. Essi, come fanno ancor oggi i loro diretti discendenti Monotremi (Ornitorinco ed Echidna), continuarono a deporre le uova ed alla precoce schiusa dei feti li nutrono con il latte. Per il resto continuarono, come gli altri Terapsidi, a cacciare di notte cercando di sopravvivere allo strapotere dei Rettili.

Il colpo di scena che ha favorito il successo dei Mammiferi  
Questa più o meno era la situazione all'alba del giorno nel quale si rivoluzionò il destino della Vita. Una enorme meteora cadde sulla Terra ed il polverone che sollevò oscurò per lungo tempo il sole. La temperatura si abbassò drasticamente ed i Rettili cominciarono a morire come mosche. I primitivi Uccelli e Mammiferi banchettarono, al freddo, con i loro cadaveri!

La catastrofe aveva stravolto i rapporti di forza fra gli animali. Gli unici che non ne risentirono furono i Pesci che, pur essendo eterotermi, vennero protetti dall'elevato calore specifico dell'acqua che limita le escursioni termiche. Ad essi rimase il dominio dei mari. La scomparsa dei grandi Rettili permise l'enorme espansione degli Uccelli e dei Mammiferi che, da allora, non ebbero più ostacoli per il dominio incontrastato della terra e dell'aria.

Essi cominciarono a diversificarsi andando ad occupare le nicchie spazio temporali che si erano liberate. Non avendo più a disposizione i Rettili cominciarono a predarsi fra di loro; in particolare si cibano di uova e di neonati inetti. In questa lotta per la vita risultarono avvantaggiati i Mammiferi che avevano cambiato il loro comportamento da oviparo a viviparo. Questi Mammiferi, anziché deporre le uova e compiere lo sviluppo embrionale al di fuori del corpo materno, lo fecero avvenire al suo interno. In alcuni la gestazione era molto breve; gli embrioni nascevano piccoli e poco sviluppati e dovevano completare il loro sviluppo attaccati ai capezzoli all'interno di una tasca detta marsupio. I discendenti di questo ramo evolutivo sono i Marsupiali. Ovviamente questa strategia evolutiva, che aumentava le probabilità di sopravvivenza della prole, ebbe un grande successo evolutivo ed essi si diffusero ovunque. Ma nella lotta per la vita non ci sono mai vincitori definitivi; basta che qualcuno acquisisca una struttura anatomica più vantaggiosa per rimettere in discussione tutte le posizioni acquisite. La stella dei Marsupiali tramontò quando comparvero altri Mammiferi che erano riusciti a rendere ancora più sicura e priva di rischi la gestazione. Il capostipite era stato

un piccolo Mammifero che si cibava di insetti. In questo nostro antenato si era evoluto un innovativo modo di proteggere gli embrioni fino al termine dello sviluppo: egli (o sarebbe più corretto dire ella) aveva sviluppato una struttura, la placenta, che permetteva di rifornire di nutrienti e di ossigeno il feto fino a quando lo sviluppo embrionale non fosse stato completato. I suoi discendenti, i Placentali, grazie alla loro migliore efficienza riproduttiva, dimostrarono sul campo di essere meglio equipaggiati per sopravvivere nella lotta per la vita. In breve tempo soppiantarono ovunque i Marsupiali eccetto in quelle terre, ad esempio l'Australia, che si erano staccate dagli altri continenti prima della loro comparsa.

Ciò che successe in seguito può essere ben descritto dal vecchio adagio "Il vincitore piglia tutto". I Placentati, trovando sulla propria strada concorrenti poco competitivi, ebbero in pratica, il libero accesso a tantissimi ambienti. E non c'è ambiente nel quale non tentarono di penetrare. Non solo cercarono di occupare ogni ambiente terrestre (dalle pianure alle foreste, dai ghiacci polari alle sabbie desertiche) ma si spinsero anche nei mari e nei cieli. Per potere conquistare ambienti così diversi dovettero modificare la struttura del loro corpo. Se si osserva una balena, un pipistrello, una antilope, una talpa, una tigre o un orso ci si rende conto di quanto ciascuno abbia seguito una propria strategia evolutiva che gli ha consentito di essere anatomicamente sempre più adatto a vivere nella propria nicchia ecologica. Questa tendenza evolutiva, che ha portato alla specializzazione, non solo ha differenziato i diversi placentati fra di loro ma, soprattutto, li ha differenziati dall'antico progenitore comune. In generale, si può dire che tanto più una specie si è specializzata tanto più è evoluta.

Il risultato della radiazione evolutiva dei Placentali è stato lo sviluppo di ben quindici rami: uno dei meno evoluti è il nostro, quello dei Primati. Infatti, malgrado noi consideriamo noi stessi e l'ordine a cui apparteniamo come i più evoluti, i più progrediti ed i più perfetti, non vi è nulla di più falso. Questa non brillante collocazione si basa su ciò che ho appena detto: cioè che i Primati sono poco specializzati ed anatomicamente ancora molto simili agli ancestrali insettivori da cui sono derivati. I nostri antenati abitavano sugli alberi e si nutrivano, di frutta, insetti e piccoli uccelli. E non vi è dubbio che l'uomo sarebbe ancora in grado di farlo mentre ciò sarebbe impossibile per un cavallo, una foca o un elefante.

*Sic stantibus rebus*, cioè data questa sostanziale somiglianza fra noi ed i nostri antenati, non dovete aspettarvi di incontrare grandi stravolgimenti percorrendo il ramo evolutivo che da loro porta all'uomo!

Gli antenati dell'uomo

Cominciamo col vedere come erano fatti i nostri antenati. Erano plantigradi (cioè appoggiavano tutto il piede per camminare), avevano cinque dita prevalentemente prive di artigli, gli occhi frontali e la coda. Come ho detto, queste caratteristiche li rendevano particolarmente adatti ad una vita arboricola. L'assenza degli artigli permetteva di saltare, afferrare e mantenersi aggrappati ai rami, nonché di catturare piccole prede. La sovrapposizione dei due campi visivi, prodotta dalla disposizione frontale degli occhi, dava una visione del rilievo e della profondità assai vantaggiosa per potersi muovere in modo sicuro fra i rami. Anche la coda era vantaggiosa poiché aiutava a mantenere l'equilibrio durante i movimenti funambolici sugli alberi.

Da questi antenati dei Primati si svilupparono tre rami. Due di questi, i Lemuridi ed i Tarsioidei, sono di scarso interesse se non per le trasmissioni televisive naturalistiche che parlano di animali in via di estinzione. L'altro ramo, gli Antropoidei, comprende quelle che normalmente sono dette scimmie. I primi Antropoidei non avevano cambiato le loro abitudini di vita arboricola ma solo affinato alcuni aspetti anatomici per meglio adattarsi ad essa. Avevano migliorato la struttura della mano, le capacità visive e, soprattutto, la struttura del cervello.

Lo strumento vincente: il cervello

Poiché l'evoluzione del cervello è l'aspetto saliente della linea evolutiva che ha portato all'uomo, è indispensabile fermarci un attimo per acquisire qualche informazione di base sulla funzione e sulla struttura di questo organo.

Spiegare come è fatto un cervello a chi non lo sa, non è facile! E' enormemente più difficile dello spiegare come è fatto un qualunque altro organo. Infatti mentre tutti hanno una idea, anche se vaga, dell'anatomia e del funzionamento del tubo digerente (formato da bocca, esofago, stomaco, intestino, ano; dove avviene la digestione degli alimenti) o dell'apparato respiratorio (naso, trachea, bronchi, polmoni; in cui l'ossigeno passa nel sangue mentre l'anidride carbonica viene eliminata) o di una mano (carpo, metacarpo, falangi, falangine, falangette, muscoli, legamenti; che serve ad afferrare) ecc.. praticamente nessuno sa distinguere le diverse parti del cervello e sa cosa fanno. Ed

il cervello non aiuta! Il suo dramma è che non somiglia ad una bicicletta, con i suoi pochi pezzi meccanici semplici e comprensibili, ma somiglia alla centrale di controllo dell'impianto elettrico di un immane grattacielo: una grande stanza piena di pannelli lindi ed ordinati che nascondono, però, un immane intrigo di fili e circuiti elettrici.

Cominciamo col vedere chi sono e come sono fatti i neuroni, cioè i fili che formano il sistema nervoso.

### Neuroni

I neuroni, cellule nervose eccitabili, sono l'unità morfologica e funzionale del tessuto nervoso. Ogni neurone è costituito da un corpo cellulare dotato di due tipi di prolungamenti: i dendriti che sono numerosi, brevi e ramificati e l'assone, un prolungamento singolo e lungo che termina con delle ramificazioni. I neuroni comunicano fra di loro scambiandosi delle molecole dette neurotrasmettitori. I dendriti sono le antenne riceventi: sono infatti in grado di ricevere i neurotrasmettitori che sono loro inviati dagli altri neuroni. Il segnale captato viene trasferito lungo l'assone che funziona come un filo elettrico e, come un filo elettrico, è circondato da una guaina isolante (la mielina) per impedire il verificarsi di corti circuiti. Quando lo stimolo elettrico arriva alle estremità dell'assone, questo, a sua volta, libera le molecole di neurotrasmettitori che vengono captate dai dendriti dei neuroni vicini. I singoli neuroni sono, fra di loro in relazioni di contiguità (sono cioè vicini) ma non di continuità (sono cioè unità distinte). Il sistema nervoso è quindi organizzato come un gigantesco e complesso impianto elettrico in cui, però, i fili non sono uniti fra di loro a livello delle scatole di derivazione; in questi punti il segnale, per passare da un neurone-filo al successivo neurone-filo, viene convertito in un segnale chimico. Per attivare un circuito elettrico non è sufficiente, quindi, che ci siano i neuroni-fili ma è anche necessario che fra essi avvenga lo scambio di molecole neurotrasmettitorie.

A seconda della grandezza, del numero, della forma e del modo in cui i dendriti e l'assone si ramificano, i neuroni vengono distinti in diversi tipi. Ogni tipo è specializzato e svolge funzioni diverse. In base alla lunghezza dell'assone i neuroni si dividono in due categorie. Alla prima appartengono quelli che hanno un assone molto lungo che serve a trasportare il segnale elettrico per lunghe distanze: sono quelli che più assomigliano ai fili elettrici! Alla seconda appartengono, invece, quelli che hanno un assone relativamente breve e molto ramificato. Essi servono per formare delle strutture paragonabili ai piccoli e compatti circuiti integrati. Molti di questi circuiti integrati sono fatti come i transistori, cioè possono amplificare, variare o interrompere la corrente elettrica. La modulazione della loro capacità di far passare un segnale è regolata dalla concentrazione, all'interno del neurone, di molecole dette neuromodulatori. Il neurone modifica la concentrazione delle proprie molecole neuromodulatorie in risposta alle molecole neurotrasmettitorie che riceve. Infatti di neurotrasmettitori ce ne sono di tanti tipi; alcuni di questi agiscono inibendo, altri stimolando, la capacità del neurone di svolgere la propria funzione di conduttore di un segnale elettrico. Per capirci meglio facciamo un esempio. Immaginiamo di avere un neurone A che riceve su un proprio dendrite un segnale dal neurone B e lo trasmette, grazie al proprio assone, al neurone C. A, però, ha anche altri dendriti che possono ricevere

segnali chimici dai neuroni vicini X, ed Y. Quando X è eccitato, scarica su A un neurotrasmettitore inibitorio che diminuisce la capacità di A di condurre a C il segnale proveniente da B. Al contrario se è Y ad essere eccitato, esso scarica su A un neurotrasmettitore eccitatorio che favorisce la trasmissione a C del segnale proveniente da B. Grazie a questo sistema di modulazione, la maggior parte della rete di trasmissione nervosa è inattiva, cioè non fa passare gli stimoli provenienti dalle cellule sensoriali. A conferma di ciò basti la semplice osservazione che, normalmente, nessuno di noi “sente” il contatto dei vestiti con la pelle o i rumori di fondo. Solo quando vogliamo “sentire”, si ha il blocco dell’emissione di neurotrasmettitori inibitori, ed il segnale può arrivare al cervello.

Come i neuroni sono paragonabili ai fili elettrici ed ai circuiti integrati, così il sistema nervoso è paragonabile all’impianto elettrico di un edificio. Esso esercita il controllo su tutti gli impianti che assicurano il coordinato funzionamento della macchina vivente pluricellulare.

#### Sistema nervoso

Il sistema nervoso è l’insieme delle strutture che permettono ad un organismo vivente: a) di ricevere stimoli sia dal proprio interno che dall’ambiente esterno; b) di integrarli in modo tale da “capire cosa sta succedendo”; c) di trasmettere impulsi agli organi che, con la loro azione, daranno una risposta coerente. Di queste tre funzioni, quelle afferente ed efferente sono svolte dai neuroni del sistema nervoso periferico; quella centrale di integrazione dai neuroni del sistema nervoso centrale.

Il sistema nervoso riceve informazioni dall’ambiente interno/esterno utilizzando organi sensoriali concettualmente non dissimili dai sensori che percepiscono l’intensità della luce, la presenza di anidride carbonica, di gas, di fumo, in un edificio. I segnali captati vengono trasmessi attraverso lunghi fili (i neuroni sensori) a delle centraline formate dai neuroni che funzionano come circuiti integrati. In queste centraline avviene l’elaborazione dei dati; da qui partono i segnali che, viaggiando a ritroso lungo i fili costituiti dai neuroni motori, portano gli ordini agli impianti che con la loro azione modificano le caratteristiche dell’ambiente. Un esempio valga per tutti. I circuiti nervosi che fanno aumentare la frequenza degli atti respiratori sono simili ai circuiti elettrici che accelerano la velocità del ventilatore di un impianto di condizionamento dell’aria. Entrambi rispondono ad un aumento della concentrazione di anidride carbonica nell’ambiente interno.

Come succede per l’impianto elettrico di un edificio, le centraline che controllano i diversi impianti sono di solito vicine fra loro. Questa localizzazione permette di coordinare la loro azione, oltre che di razionalizzare e semplificare l’organizzazione della rete dei fili. Infatti un segnale che giunge ad

una centralina può essere facilmente condiviso dalle altre e ciò permette di dare risposte complesse che coinvolgono diversi impianti. Ad esempio, la presenza di fumo in una stanza, oltre l'allarme incendio, attiva anche gli altri impianti necessari per affrontare questa emergenza (acqua, porte antincendio, elettricità, ascensori ecc). Il centralone che gestisce il funzionamento di tutto l'edificio e che risulta dall'interconnessione fra le diverse centraline è, nel caso degli animali, il cervello.

Come l'impianto elettrico di un edificio si complica passando da un bungalow, ad una villetta unifamiliare, ad un piccolo condominio su su fino ad un grattacielo, così nel corso dell'evoluzione degli animali il sistema nervoso si è andato sempre più complicando. Da una rete continua di fili senza vere e proprie centraline (Celenterati); a cordoni nervosi con una unica centralina (Platelminti); a cordoni nervosi con la stessa centralina ripetuta ad ogni piano (Anellidi); a centraline diverse e localizzate in parti del corpo lontani fra loro (Artropodi); a centraline diverse riunite nella testa (Vertebrati). Nei Vertebrati, questa localizzazione ha permesso di gestire al meglio un sistema nervoso ormai divenuto molto complesso. Le centraline che hanno trovato collocazione nella testa sono quelle che controllano l'attività degli organi connessi con l'alimentazione, con la respirazione e con i movimenti dell'animale; quelle che ricevono gli impulsi gustativi, olfattivi, uditivi e visivi provenienti dagli organi sensori; quelle che usano i segnali ricevuti per fare una "rappresentazione" del mondo esterno; quelle che archiviano le esperienze passate. Nel cervello queste centraline sono raggruppate in cinque centrali principali: il midollo allungato, il cervelletto, il mesencefalo, il diencefalo ed il telencefalo; ciascuna di esse gestisce una parte del funzionamento dell'organismo. E' evidente che nei diversi Vertebrati queste centrali si sono variamente sviluppate in rapporto al compito che devono svolgere. Ad esempio, una mucca che compie pochi e ripetitivi movimenti ed ha pochi problemi di equilibrio, ha la centrale che controlla e coordina i muscoli (il cervelletto) molto meno sviluppata di quella di una scimmia che, in quanto ad agilità e a coordinazione motoria è seconda a pochi altri animali! Se il volume del cervelletto è in stretta relazione con la vivacità dei movimenti e con l'equilibrio del corpo, il mesencefalo è in preminente rapporto con la funzione visiva. Infatti negli Uccelli è molto più sviluppato che nei Mammiferi. La funzione originale del telencefalo era quella di ricevere gli impulsi olfattivi. Per questo si sviluppò particolarmente nei Mammiferi che, per sopravvivere nell'era dominata dai Rettili, si erano adattati a vivere di notte e confidavano soprattutto sull'olfatto per riconoscere il cibo, i nemici ed i partner sessuali. Ma per sopravvivere non è sufficiente

percepire un segnale/odore. È anche necessario riconoscerlo, capire se è vantaggioso o pericoloso, e comportarsi di conseguenza. Per assicurare il corretto comportamento a fronte dei diversi stimoli, il telencefalo si arricchì sempre più di circuiti integrati che permettevano di “giudicare” la situazione e di coordinare fra di loro le diverse azioni necessarie per affrontarla. Nel telencefalo dei Mammiferi si andarono man mano sviluppando sia funzioni di integrazione sensitivo-motoria necessarie per organizzare una risposta motoria coerente (avvicinarsi o scappare) sia funzioni integrative superiori, dette anche psichiche. Infatti, non può esserci risposta motoria coerente se non si è prima “capito” con che cosa si ha a che fare. I vantaggi offerti dalla presenza di questi nuovi circuiti fecero aumentare le dimensioni del telencefalo, in particolare si estesero le zone in cui erano svolte le funzioni integrative. Nel telencefalo dei Mammiferi si definirono quindi due zone: i vecchi centri olfattivi e le nuove zone alle quali, semplificando un po', possiamo dare il nome di corteccia cerebrale. Nei Mammiferi meno evoluti (Monotremi e Marsupiali) la porzione olfattiva è prevalente; questa situazione è stata mantenuta anche nei Placentali meno evoluti (Insettivori, Sdentati). Durante l'evoluzione dei Placentali, in concomitanza con l'evoluzione del resto del corpo, si ebbe anche una evoluzione del telencefalo. La corteccia divenne sempre più prominente poiché ad essa venivano man mano attribuite altre funzioni. Visto che era in grado di organizzare gli stimoli olfattivi in idee astratte (attrazione, dolore, piacere, paura ecc..) e che queste funzioni psichiche erano estremamente vantaggiose per la sopravvivenza della specie, le si richiese di organizzare in idee astratte anche gli altri stimoli. Dalle altre centrali (midollo allungato, cervelletto, mesencefalo, diencefalo) si proiettarono sulla corteccia dei fasci nervosi che portavano gli stimoli da elaborare. Così si svilupparono aree per la percezione, l'associazione e la memorizzazione anche degli stimoli visivi, sensitivo-motori, acustici. I circuiti integrati che le collegavano permisero all'animale di avere quella rappresentazione soggettiva della realtà che gli permetteva comportamenti diversi a seconda della natura e della intensità della percezione. Questi brevi cenni sulla struttura e sul funzionamento del cervello dovrebbero essere sufficienti per permettervi di capire ciò che è avvenuto durante l'evoluzione dell'uomo.

Cosa ha determinato l'evoluzione dell'uomo?

A parte alcuni dettagli secondari, l'evoluzione dell'uomo è caratterizzata da quattro grandi acquisizioni: la stazione eretta, il fine uso della mano, l'intelligenza ed il linguaggio. Tutto sarebbe

cominciato con la stazione eretta che avrebbe reso disponibili le mani per svolgere altre funzioni che non fossero quelle deambulatorie. Con le mani libere l'uomo avrebbe potuto sia portare il cibo ai membri del proprio gruppo familiare che afferrare oggetti da usare come strumenti. Ciò avrebbe permesso lo sviluppo dell'intelligenza e del linguaggio.

#### La stazione eretta

In quest'ottica l'acquisizione della stazione eretta sarebbe stata il *primum movens* e avrebbe giustamente meritato la rilevanza che i divulgatori scientifici le hanno data, testimoniata da un famoso poster ormai divenuto il testimonial del "cammino evolutivo dell'uomo". In esso l'ingentilirsi dei lineamenti dell'uomo è associato all'assunzione progressiva della stazione eretta. Ma quale fu il motivo che spinse i nostri progenitori ad alzarsi sugli arti posteriori? Il confronto con l'evoluzione di altri animali ci può aiutare a chiarire questo punto. Pensate ai giaguari che hanno cambiato le articolazioni della spalla per non spezzare la colonna vertebrale tutte le volte che atterrano ai cento all'ora sulle zampe anteriori; o ai cavalli che, per correre più velocemente, hanno allungato le zampe utilizzando il dito medio come prolunga; o alle balene che hanno ritrasformato in una pinna caudale le zampe posteriori. Da questo breve elenco un importante aspetto risulta evidente. Mentre per questi animali il cambiamento nella deambulazione ha portato ad indubbi vantaggi alla deambulazione stessa, per l'uomo esso è stato decisamente svantaggioso. Infatti, tutto si potrà dire del nostro nuovo modo di camminare fuorché che ci avvantaggi. Con le sole caratteristiche deambulatorie che abbiamo acquisito saremmo spacciati nella lotta per la vita. Per fortuna l'intelligenza ci salva! Ma non è realistico pensare che l'uomo, quando si alzò sulle gambe, fosse già intelligente.

Gli adattamenti evolutivi che ho usato come esempi, originano da mutazioni anatomiche che hanno permesso di migliorare un comportamento. Ma si conoscono anche mutazioni comportamentali che determinano un cambiamento nell'anatomia. Spesso, infatti, non è la struttura anatomica "scheletrica" che causa una modificazione del comportamento ma il contrario! Ad esempio, non è certamente stata la comparsa delle piume a far acquisire al pavone il comportamento "pavoneggiante" che usa per conquistare la sua partner sessuale; o la comparsa delle corna a determinare, nel cervo, i rituali combattimenti per la conquista delle femmine. Prima si è sviluppato il comportamento sessuale della dominanza e secondariamente si sono selezionati, fra gli individui,

quelli che avevano le caratteristiche anatomiche più adatte ad avere successo. Spesso, però, come nel caso dei due esempi fatti, i cambiamenti anatomici sessualmente vantaggiosi rendevano l'animale più vulnerabile nella vita di tutti i giorni. Perché queste mutazioni anatomiche secondarie potessero rimanere e fissarsi nella popolazione doveva esistere un giusto compromesso fra il vantaggio sessuale e lo svantaggio "quotidiano" che esse davano.

In quest'ottica, l'acquisizione della stazione eretta assume un significato ben diverso da quello deambulatorio. Essa, come le piume colorate o le grandi corna, sembra essersi evoluta come una caratteristica anatomica sessualmente premiante in un mondo nel quale la pubblicità è sempre stata l'anima del commercio! A sostegno di ciò non ci sono solo i comportamenti dei nostri parenti più stretti, le scimmie, che si alzano sulle zampe posteriori per dimostrare la loro prestanza fisica, ma anche i nostri stessi comportamenti. Mia nonna ha sempre detto che "L'altezza è metà della bellezza" e questo motto è ben corroborato dal fatto che gli individui alti sono considerati partner sessuali più appetibili, tanto che spesso bastano un paio di tacchi a spillo per trasformare una donna normale in un sex symbol. Nell'immaginario femminile poi, occupa un posto prominente Tarzan che si erge in tutta la sua altezza battendosi i pugni sul petto e urlando "OHHOHH"! E' anche correlato a questo aspetto della dominanza il fatto che, nelle società umane, la sottomissione si esprime con l'inchino, nei suoi diversi gradi di profondità.

E una volta in piedi?

Una volta in piedi, l'uomo avrebbe avuto a disposizione le mani per trasportare il cibo e ciò sarebbe stato fondamentale per rafforzare la socialità che, a sua volta, avrebbe favorito e promosso lo sviluppo del linguaggio e dell'intelligenza. Secondo questa ipotesi, ancora una volta sarebbe stato un cambiamento nell'anatomia il responsabile dello sviluppo di nuove funzioni e di nuovi comportamenti. E che comportamenti! Ma questa ipotesi cozza contro parecchi dati di fatto. Il mondo animale è pieno di specie che trasportano il cibo in vari modi (dalle cornacchie che lo afferrano col becco, agli scoiattoli che lo infilano nelle tasche delle guance) ma che sono ben lungi dall'essere sociali. Esistono anche specie sociali che trasportano il cibo senza l'uso delle mani (i lupi, ad esempio, che ingeriscono il cibo e poi lo rigurgitano). Esistono, inoltre, specie sociali che proprio non trasportano il cibo (i delfini, ad esempio). La correlazione fra mano e socialità sembra quindi una classica correlazione spuria! Anche la correlazione fra uso della mano ed intelligenza

non sembra molto solida. Infatti, malgrado la nostra mano sia cambiata poco rispetto a quella dei nostri antenati e parenti più stretti, la nostra capacità sia intellettuale che di usare strumenti è enormemente maggiore della loro. Se a tutto questo si aggiunge il fatto che esistono animali (ancora i delfini) che, pur non avendo mani e non usando strumenti, sono più intelligenti di molte scimmie .....!

E' difficile quindi sposare l'ipotesi che la mano sia stata il promotore della socialità e della intelligenza! Ma allora, cosa ha causato, durante l'evoluzione dell'uomo, l'esponentiale sviluppo delle funzioni intellettive?

Prima di procedere a chiarire questo punto vorrei sottolineare che lo sviluppo dell'intelligenza non è un fenomeno esclusivo dell'uomo. Chiunque abbia un animale da compagnia, cane, gatto, criceto che sia, vi giurerà che "E' così intelligente!" Ed in un certo senso questo è vero! Infatti, anche durante l'evoluzione degli altri Mammiferi la corteccia cerebrale e le aree integrative hanno aumentato le proprie dimensioni. L'incremento nel numero di neuroni ed i nuovi tipi di connessioni che si sono instaurati hanno permesso di organizzare quei circuiti che trasformano in sensazioni, sentimenti e comportamenti gli stimoli che provengono dagli ambienti esterno ed interno. Il risultato è stato, anche per loro, l'evoluzione dell'intelligenza, cioè della capacità di rappresentare soggettivamente la realtà, di valutarla criticamente e di assumere comportamenti adatti alle diverse circostanze. Quello che è peculiare nell'evoluzione dell'uomo è l'ENORME sviluppo dell'intelligenza e ciò che stiamo cercando di individuare sono le "cause" che lo hanno favorito.

#### Le cause dell'intelligenza

Quando confrontiamo l'uomo con i cetacei ad elevata encefalizzazione due cose li accomunano: la socialità ed il linguaggio. Ciò che questo dato di fatto suggerisce, e che altri dati di fatto sembrano confermare, è l'ipotesi che sia stato il linguaggio il promotore del percorso evolutivo che ha portato all'enorme sviluppo dell'intelligenza. Infatti, se ad un bambino non viene insegnato a parlare egli non sviluppa capacità intellettive, cioè non sa neppure pensare! Se si lede una area della corteccia cerebrale, detta di Wernicke, si ha sia una alterazione del meccanismo del linguaggio sia un decadimento delle facoltà intellettive, ed in particolare di quelle connesse con l'impiego dei simboli nell'espressione delle idee. Questi dati, oltre a provare l'esistenza di una connessione fra linguaggio ed intelligenza, indicano anche un punto anatomico in cui essi si intersecano.

L'area di Wernicke è una area associativa un po' particolare: funziona come una etichettatrice. Gli oggetti da etichettare sono i diversi circuiti nervosi che integrano immagini, suoni e sensazioni e le etichette sono i circuiti nervosi che corrispondono alle parole. In questa area, quindi, ai circuiti nervosi che identificano un oggetto vengono associati i circuiti nervosi/etichetta. Questa operazione fa sì che una parola, come una etichetta, identifichi il circuito nervoso che descrive "qualcosa" di cui noi abbiamo la percezione sensoriale. Ad esempio, nell'area di Wernicke, all'immagine di un animale peloso, di media taglia, che abbaia viene attribuita l'etichetta "cane". Vorrei sottolineare che i nostri circuiti nervosi/oggetto sono simili a quelli degli altri mammiferi i quali, però, mancando dell'area di Wernicke, percepiscono un cane ma non pensano "Ecco un cane"! Dall'area di Wernicke partono dei neuroni che raggiungono un'altra area della corteccia nervosa detta area di Broca. I suoi circuiti ed i suoi neuroni controllano ed innervano i muscoli della lingua, della faringe e della bocca che permettono di trasformare l'etichetta "cane" nel suono "cane". Si può quindi dire che nell'area di Wernicke le sensazioni si vestono di parole e si forma il pensiero mentre nell'area di Broca le parole si vestono di suoni e si forma il linguaggio.

Il meccanismo che ho descritto spiega il modo con cui nel cervello si associa un suono ad una idea. Ma quante associazioni possiamo fare? E' evidente che il numero delle idee e delle parole, cioè dei circuiti che si possono organizzare, dipende dal numero di neuroni presenti nelle giuste aree della corteccia cerebrale. Ed è l'enorme aumento di questi neuroni, che si è verificato durante l'evoluzione dell'uomo, che ha fornito le basi anatomiche per l'eccezionale sviluppo del nostro linguaggio e della nostra intelligenza.

Poiché da ciò che ho detto risulta che l'intelligenza dell'uomo è enormemente più sviluppata di quella degli altri Mammiferi e che nell'uomo essa è associata al linguaggio, viene naturale chiedersi "Non sarà questa associazione la causa dell'enorme sviluppo dell'intelligenza nell'uomo? E come può il linguaggio aver favorito tale sviluppo?"

Il ruolo promozionale del linguaggio

Cominciate col ripensare a Tarzan che si erge sulle gambe, si batte il petto ma non emette suono. Indubbiamente la potenza sessuale del suo messaggio sarebbe enormemente diminuita! Questo ci dice che anche nella nostra specie, come fra gli insetti, gli uccelli e gli altri mammiferi, il suono è una componente importante dei segnali di promozione sessuale. Ripensate, ora, in quali occasioni

avete parlato molto. Soprattutto da adolescenti quando cercavate di convincere i vostri possibili partner sessuali che voi eravate il migliore sulla piazza, corroborando le vostre argomentazioni con un po' di subdola denigrazione degli altri concorrenti. Sicuramente anche da bambini, quando cercavate di convincere i vostri genitori che voi avevate ragione e loro torto, o quando cercavate di convincerli che la colpa era dei vostri fratelli e che voi proprio non c'eravate. Nella vita di tutti i giorni quando parlate male del capufficio, dei colleghi, degli avversari politici... e bene di voi e dei componenti del vostro clan. Se analizzate la percentuale di parole che avete speso per scambiare messaggi materiali con il vostro prossimo (ho fame, dammi il sale) vi rendete certamente conto di quanto sia irrisoria rispetto a quella che avete speso per l'autopromozione. Queste considerazioni sull'uso del linguaggio dimostrano chiaramente che si tratta di uno strumento finalizzato soprattutto a favorire il "successo" di un individuo. Successo che fa aumentare le probabilità che egli si accoppi.

La promozione sessuale dell'uomo, quindi, non passa solo attraverso il messaggio visivo della stazione eretta ma anche attraverso quello sonoro del linguaggio. E questo secondo strumento di promozione è, evolutivamente parlando, molto meglio del primo poiché non ha controindicazioni! Infatti, mentre assumere l'andatura bipede per auto-promuovendosi sessualmente metteva a rischio la vita, vocalizzare in preda ai sentimenti amorosi non svantaggiava rispetto a gli altri che non lo facevano. Al contrario, l'acquisizione di migliori capacità linguistiche fece molto aumentare le probabilità di accoppiarsi e di trasferire i propri geni alle generazioni successive. Visti i vantaggi sessuali che il linguaggio conferiva, è evidente che ogni mutazione migliorativa fu selezionata positivamente rendendo la specie sempre più "chiacchierona". E venne il momento in cui nuove mutazioni estesero l'uso del linguaggio dalla promozione sessuale alla promozione sociale. Questo aumentò ancora di più le probabilità che i fortunati mutanti si accoppiassero e trasmettessero i geni del linguaggio alle successive generazioni.

Da quanto detto si può comprendere come il linguaggio sia stato il promotore della propria evoluzione. Ma poiché ogni miglioria nel linguaggio (sempre più etichette) era associata ad una miglioria nell'intelligenza (sempre più circuiti integrati) è probabile che il linguaggio, oltre a favorire il proprio successo evolutivo, abbia contestualmente favorito il successo evolutivo dell'intelligenza. Infatti gli individui dotati di un numero maggiore di circuiti integrati, cioè i più

intelligenti, avevano di solito un linguaggio migliore, si “vendevano” meglio e si riproducevano di più!

Questa ipotesi spiega perché nell'uomo l'intelligenza si sia sviluppata enormemente di più che negli altri Mammiferi. Mentre in questi ultimi l'intelligenza, per essere trasferita alle generazioni successive, poteva contare solo su sé stessa, nell'uomo si auto-promuoveva utilizzando, come strumento, la pubblicità vocale sessualmente premiante.

E la mano? Le idee suggeriscono spesso delle cose da realizzare! L'aver a disposizione lo strumento/mano, reso disponibile dalla stazione eretta, fu certamente utile, ed ogni mutazione che lo migliorava fu certamente vantaggiosa. In questa ottica è ragionevole pensare che l'intelligenza sia stata la causa dell'evoluzione della mano e non viceversa.

## L'EVOLUZIONE "METAFISICA" DELLA VITA

Quelli che ho descritto sono i principali passaggi che permisero alla evoluzione di costruire organismi viventi sempre più complessi ed efficienti. Frutto di questo incessante lavoro sono i milioni di tipi di organismi che hanno propagato la vita nel tempo e nello spazio. La vita infatti non si è solo evoluta per milioni di anni nell'ambiente in cui è nata, ma ha anche colonizzato nuovi ambienti. Uscendo dal mare, ha, dapprima, fatto sporadiche incursioni sulla terra con esploratori malamente equipaggiati. In seguito, grazie all'eccezionale miglioramento delle attrezzature, ha colonizzato in forze la terra ed il cielo. Se osserviamo in questa ottica qualunque organismo vivente, converremo che ognuno di essi è il risultato di complesse soluzioni ingegneristiche adottate per risolvere sempre nuove e particolari situazioni. I polmoni per estrarre l'ossigeno dall'aria, gli arti per sostenere il corpo sulla terra, la pelle ispessita per impedire l'evaporazione all'aria dei liquidi interni, le ali per sostenere il corpo nel volo ecc... non sono che alcuni lampanti esempi dell'evoluzione strutturale degli organismi viventi.

Ma l'evoluzione non si è fermata qui, il suo spirito creativo non si è limitato alla fisica, cioè alla costruzione delle macchine! Sempre al fine di meglio perpetuare la vita, da un certo punto in poi l'evoluzione è entrata nella "metafisica"! Nel linguaggio comune per metafisica si intende la parte della realtà che non si può conoscere con le leggi della fisica. In altre parole la metafisica è l'insieme dei fenomeni che non possono essere razionalmente spiegati dalle conoscenze acquisite dalle scienze sperimentali. E poiché per anni le sensazioni, i sentimenti, l'intelligenza sono stati inspiegabili con queste leggi, per anni si è ritenuto che queste espressioni superiori della vita fossero metafisiche. Ma non è così. Abbiamo già visto, parlando dell'evoluzione dell'uomo, come l'intelligenza sia il risultato dell'evoluzione di strutture materiali anatomicamente identificabili e come essa possa essere influenzata dalle loro alterazioni. Vediamo ora come sono anatomicamente organizzate le sensazioni ed i sentimenti e per quale motivo si siano evolute.

### ***Le sensazioni***

Abbiamo visto come, già a livello delle più semplici forme di vita, il "sentire" cosa stesse accadendo all'interno o all'esterno dell'organismo permetteva di attivare i comportamenti più adatti ad affrontare la situazione. Negli organismi unicellulari la gestione della vita di relazione era molto

semplice e quasi diretta: lo stimolo agiva come un interruttore che faceva scattare i percorsi metabolici intracellulari che davano la risposta comportamentale.

Le cose, ovviamente, si complicarono quando gli organismi divennero pluricellulari e gli stimoli vennero raccolti da cellule localizzate in organi distinti. Per far sì che i diversi segnali settoriali (concentrazioni di sostanze nel sangue e nei liquidi extracellulari, odori, suoni, immagini) potessero essere interpretati secondo una “visione” unitaria del fenomeno che stava accadendo, si dovettero evolvere parecchie strutture anatomiche. Prima di tutto i neuroni che ancora oggi trasferiscono i segnali provenienti dagli organi di senso a specifiche aree dette olfattive, visive, acustiche... In queste aree avviene una prima elaborazione che trasforma i segnali ricevuti in sensazioni (che tipo di odore, di colore, di suono...); da qui gli elaborati proseguono verso altre aree che li organizzano dando di essi una rappresentazione globale. Le singole sensazioni e la sensazione finale vengono memorizzate in apposite aree cerebrali a cui viene fatto riferimento ogni qual volta si vogliono identificare, per confronto, le sensazioni appena ricevute.

Senza l'integrità strutturale dei neuroni e dei circuiti nervosi che costituiscono queste vie non può esserci la percezione corretta del mondo esterno come ben sanno le persone che, per qualche patologia, hanno delle lesioni in tali strutture anatomiche. Il danno può essere a carico di neuroni localizzati in diversi punti della via di trasduzione e di elaborazione dello stimolo. Le patologie che ne risultano sono coerenti con tale localizzazione. Se si ledono i recettori o i neuroni afferenti, i segnali non vengono raccolti e non arrivano al cervello per cui non si può percepire quella parte del mondo esterno da cui provengono i segnali (ciò si verifica, ad esempio, nella cecità). Se la lesione è a carico dei circuiti delle aree integrative sensoriali, pur percependo singoli stimoli provenienti da un oggetto, non si riesce ad averne una rappresentazione globale (ad esempio, si percepiscono le sopracciglia, il naso, la bocca, gli occhi ma non si è capaci di organizzarli in un viso). Una lesione nelle aree di memoria impedisce di confrontare lo stimolo in arrivo con quelli già memorizzati (ad esempio, si vede una persona ma non la si riconosce o si sente una parola ma non la si associa ad alcun oggetto).

La complessa rete nervosa che abbiamo descritto permette di percepire una situazione che si sta verificando intorno a noi. Ma sapere che abbiamo davanti Giuseppe (tanto per fare un nome a caso), non costituisce una informazione sufficiente per avere una reazione corretta. E' chiaro, infatti, che la presenza di Giuseppe può avere conseguenze assai diverse sulla nostra vita a seconda

che egli sia un amico o un nemico. Dobbiamo, perciò, compiere un'altra operazione nervosa: giudicare Giuseppe, cioè classificarlo. Il circuito che lo ha identificato deve integrarsi con altri circuiti in cui sono memorizzati gli amici e i nemici; da questo confronto si ha l'identificazione di Giuseppe, non più solo come "oggetto concreto" (Giuseppe) ma anche come appartenente ad una "categoria astratta" (nemico).

Il processo di classificazione che noi eseguiamo utilizzando parole ed idee, non poteva certo essere compiuto sotto questa forma dagli animali passati e presenti che non erano e non sono dotati di linguaggio. In essi ed in noi, questa atavica forma di conoscenza viene resa cosciente sotto forma di "sensazione": la presenza di un oggetto/soggetto classificato come nemico evoca una sensazione di "paura" mentre quella di un amico evoca una sensazione di "piacere" e "gioia". Malgrado queste sensazioni non siano il frutto di un ragionamento, esse guidano nella scelta del comportamento "razionalmente" più corretto.

I circuiti di circuiti nervosi che ho descritti permettono non solo di "sentire" ciò che succede nel mondo esterno, ma anche di avere coscienza di situazioni che si verificano all'interno del nostro organismo. Circuiti simili trasformano il calo della glicemia (concentrazione del glucosio nel sangue) nella sensazione di fame o il diminuito volume del sangue nella sensazione di sete, o lo stiramento della parete dell'intestino in dolore addominale. Anche in questi casi, è il tipo di sensazione che proviamo che ci rende coscienti di una situazione interna e ci spinge al corretto comportamento (a mangiare o a bere). Alterazioni di questi circuiti determinano l'incapacità a provare sensazioni (impressionante è l'insensibilità al dolore di alcune persone).

Da ciò che ho detto risulta che le sensazioni ritenute metafisiche sono a tutti gli effetti paragonabili alla digestione o alla respirazione, sono cioè il risultato dell'azione di organi nascosti all'interno del corpo. Mentre, però gli organi che fanno digerire e respirare sono facilmente identificabili, quelli che fanno sentire sono, anatomicamente parlando, più difficili da individuare a causa della complessa struttura del sistema nervoso. La storia evolutiva di questi "organi metafisici" è stata concettualmente simile a quella degli organi più propriamente fisici. Ogni mutazione che ne migliorava le prestazioni aumentava le probabilità di sopravvivenza e di riproduzione dell'individuo in cui si era verificata. Il gene mutato, venendo preferenzialmente trasferito alle generazioni successive, man mano arricchiva anche la specie di una qualità "metafisica" che la rendeva evolutivamente più adatta all'ambiente in cui viveva.

### ***I sentimenti***

Le sensazioni di cui abbiamo parlato determinano dei comportamenti che facilitano la sopravvivenza dell'individuo. Introduciamo, adesso, un nuovo aspetto della evoluzione "metafisica" della vita che ha prodotto sensazioni e comportamenti non mirati a favorire la vita dell'individuo ma quella della specie. Gli esempi più comuni sono il comportamento sessuale degli animali e la cura che essi hanno della prole. Entrambi questi comportamenti sono assolutamente necessari per la conservazione della specie mentre sono completamente accessori per l'individuo. Anzi, a volte sono persino pericolosi! Pensate agli animali che rischiano la vita combattendo fra di loro per accaparrarsi una femmina o che lottano con i nemici per proteggere i propri figli.

Questi comportamenti sono, quindi, un atto di generosità dell'individuo verso la specie. Come tutti ben sanno la generosità è una merce rara e normalmente nessuno fa niente per niente. La presenza di un premio o di una remunerazione fanno meraviglie nell'incrementare la spontanea generosità. Anche un intenso dolore, che scompare con l'attuazione dell'atto di generosità, ha un grande effetto incentivante! La vita, che la sa lunga in fatto di vita, non ha lesinato nell'accompagnare con sensazioni di dolore e di piacere individuale un comportamento finalizzato al bene della specie. E' il sistema del bastone e della carota con la variante che i premi e le punizioni sono dispensati all'individuo dai circuiti mentali dell'individuo stesso. A questo scopo, l'evoluzione ha prodotto negli animali dei circuiti nervosi che entrano in azione in risposta a stimoli esterni o interni e generano sentimenti e sensazioni che spingono ai comportamenti appropriati.

La felicità, la gioia, il piacere sono una meta gratificante come la carota, mentre il dispiacere, l'angoscia, la disperazione sono uno strumento traumatizzante come il bastone. E' utilizzando un complesso intreccio di carote e bastoni che i circuiti nervosi guidano i comportamenti dell'individuo verso il soddisfacimento dei bisogni della specie.

Per esemplificare quanto ho detto consideriamo il comportamento sessuale degli animali "superiori", i Vertebrati. Per il coronamento dell'atto riproduttivo, in realtà, sono parecchi e diversi i comportamenti che l'individuo deve attuare: a cominciare dal riconoscimento degli individui dell'altro sesso della propria specie, alla competizione con altri pretendenti, al corteggiamento, all'accoppiamento, alla cura della prole. Tutte queste fasi sono come le stazioni di una lunga e complessa caccia al tesoro.

Tutto inizia quando si completa la maturazione degli organi sessuali: è questo il momento in cui l'individuo è pronto a servire la specie. Da allora, ciclicamente, in certi periodi dell'anno scelti dall'evoluzione come i più propizi per le successive fasi di allevamento della prole, i sensori che percepiscono i ritmi stagionali della luce e del buio, attivano i circuiti che innescano la bomba accoppiamento. E' come se la specie comparisse improvvisamente, come un fantasma, a rivendicare i propri diritti ed ad esigere i comportamenti che le sono dovuti. Ed ecco che innumerevoli circuiti che erano rimasti silenziosi fino a quel momento diventano operativi e stravolgono il modo di porsi dell'individuo davanti all'universo. Improvvisamente egli si sente insoddisfatto, gli sembra che gli manchi qualcosa, diviene irrequieto. Comincia la tensione della ricerca di un partner sessuale! Il termine ricercare significa cercare di nuovo, cioè cercare una cosa già nota. Infatti, i circuiti rimasti a lungo silenti contengono le indicazioni, in parte innate, cioè contenute nel patrimonio genetico, ed in parte apprese, cioè acquisite con l'esperienza, per l'identificazione del corretto partner sessuale. Queste indicazioni costituiscono, nel loro insieme, il modello a cui si deve avvicinare un oggetto del mondo esterno perché venga riconosciuto come partner sessuale. Gli stimoli visivi, uditivi, olfattivi che provengono dal mondo esterno vengono ora integrati e confrontati con questa ridestata categoria mentale, innata o acquisita che sia. Quando finalmente c'è corrispondenza, l'avvenuto riconoscimento scatena un potentissimo sentimento che, da una parte, attrae inesorabilmente l'individuo verso l'oggetto che corrisponde al modello e, dall'altra, influenza le sue azioni finalizzandole al possesso sessuale di quell'oggetto che ora si desidera ardentemente. Questa fase è caratterizzata dall'emissione di segnali specifici che, nel loro complesso, costituiscono il corteggiamento. Ogni specie animale ha inventato i propri rituali che hanno lo scopo di attirare l'attenzione della femmina e di farsi accettare come partner sessuale. Se la femmina si nega o si verificano altri eventi che ostacolano o impediscono il raggiungimento dell'obiettivo, l'individuo prova un sentimento di intenso dolore. La disperazione agisce come un bastone che sprona a comportamenti volti a rimuovere gli ostacoli.

Se invece le cose vanno bene e c'è corrispondenza, le fasi successive del corteggiamento hanno lo scopo di abbassare la soglia di ricettività della femmina. Essa non è un soggetto passivo durante questa fase poiché risponde con specifici segnali che invitano il maschio a proseguire il corteggiamento. Lo scopo dello scambio di questi segnali specifici è la sincronizzazione delle complesse macchine interne dei due individui che, perché l'accoppiamento abbia successo, devono

presentarsi puntuali al medesimo appuntamento. Grazie a questa complessa via di segnali che inducono comportamenti, si ottiene la fecondazione del giusto uovo da parte del giusto sperma. Il premio per gli individui che hanno portato a compimento questa missione fondamentale per la specie è il piacere e l'appagamento sessuale.

Anche nel caso dei comportamenti sessuali, quindi, sono le sensazioni di piacere e di dolore che inducono l'individuo ad assumere i comportamenti corretti. Tali sensazioni, però, non sono estemporanee ma somministrate in modo controllato e coordinato da un regista interno che le usa come fossero i “acqua, fuochino... fuoco” che guidano i passi lungo il percorso di questa antichissima caccia al tesoro.

Il regista è, ovviamente, una complessa rete di circuiti nervosi che fa fare inconsciamente all'individuo tutto ciò che è necessario alla specie per perpetuarsi. Questa pulsione, che fa gioire e fa star male, è percepita da noi come un sentimento: l'amore!

Anche l'amore materno è un sentimento animale che costringe, col solito sistema del bastone e della carota, a comportamenti che favoriscono la conservazione della specie. Esso è scatenato, al momento opportuno, da ormoni che attivano gli opportuni circuiti nervosi. L'affetto che la femmina sente per i propri piccoli insieme al dolore che essa prova quando essi sono in pericolo, le fanno assumere i vari comportamenti protettivi che tendono ad assicurare alla prole la sopravvivenza.

L'amore è stato quindi inventato dalla vita per costringere gli animali a dedicare parte della propria esistenza alla propagazione e conservazione della specie. Questo sentimento è, perciò, una componente essenziale della riproduzione, della quale costituisce l'aspetto “metafisico” e le strutture anatomiche che lo producono costituiscono gli “apparati riproduttori metafisici” che collaborano con quelli “fisici” per la buona riuscita dell'impresa. Tutto fa pensare che i due tipi di apparati, “metafisici” e “fisici”, si siano evoluti contemporaneamente poiché, in assenza dei primi, i secondi sarebbero stati totalmente inutili. Alla luce di queste considerazioni non deve stupirci che anche animali evolutivamente inferiori a noi provino sentimenti che li guidano nel comportamento riproduttivo. E' comunque indubbio il fatto che i loro sentimenti, a causa dell'inferiore sviluppo del loro “apparato riproduttore metafisico”, siano meno “metafisici” dei nostri!

Un altro importante aspetto che merita di essere sottolineato è la grande differenza che esiste nei sentimenti e nei comportamenti sessuali fra maschi e femmine. Queste differenze non sono né casuali né culturali ma determinate geneticamente. Il dimorfismo sessuale “metafisico” è sotto gli

occhi di tutti e si accentua tanto più quanto più si sale nella scala evolutiva. Esso è massimo nei Mammiferi che hanno una fecondazione interna, un periodo di gestazione molto lungo, una prolungata dipendenza del piccolo dal latte materno. La ragione di questo dimorfismo sessuale “metafisico” risiede nella diversa anatomia degli “apparati riproduttori fisici” e nel diverso ruolo che i due sessi svolgono nella riproduzione. Nei maschi, i testicoli ed alcune ghiandole accessorie sono deputati alla formazione del liquido seminale che viene trasferito nella femmina grazie al pene. Nelle femmine le ovaie producono l’uovo, la vagina e l’utero accolgono gli spermatozoi e permettono lo sviluppo dello zigote, le mammelle producono il latte indispensabile per la nutrizione del neonato così da aumentarne le probabilità di sopravvivenza.

Tutti gli organi sessuali “fisici” maschili e femminili si sono evoluti per migliorare l’efficienza dell’accoppiamento, cioè per massimizzare la progenie. Ma il raggiungimento di questo scopo, che sta tanto a cuore alla specie, non sarebbe possibile se i maschi e le femmine avessero sentimenti e comportamenti identici. I loro interessi genetici, infatti, sono tanto diversi da non poter certo essere perseguiti con una stessa strategia! Per i maschi il comportamento più vantaggioso per aumentare le probabilità di trasferire alle generazioni future i propri geni è quello di accoppiarsi il più possibile. Ad essi l’accoppiamento costa poco poiché richiede una modesta spesa, in termini energetici e materiali, e non comporta gravi sacrifici per la loro sicurezza e per il loro benessere. Per le femmine, invece, l’accoppiamento rappresenta un ben altro impegno. Significa portare, per i mesi/anni della gestazione e dell’allattamento, un pesante fardello sia in termini fisici che psicologici, ed andare incontro a maggiori stress e pericoli. Poiché le femmine si possono riprodurre solo poche volte nella vita, il comportamento che più aumenta le loro probabilità di trasferire geni alle generazioni future è quello di fare investimenti oculati, affidare, cioè il loro piccolo patrimonio alla banca più solida. In termini di accoppiamento questo significa scegliere, fra i possibili partner, quello che assicura il destino più favorevole ai figli. Si potrebbe dire che, mentre ai maschi conviene investire sulla quantità, alle femmine conviene investire sulla qualità!

Gli interessi genetici contrastanti, hanno fatto sì che nei maschi e nelle femmine si siano evolutivamente affermati sentimenti ed emozioni che li inducono a comportamenti riproduttivi molto diversi. Mentre i maschi sono più propensi a fare sesso, le femmine sono più schive; mentre i maschi sono poco selettivi nella scelta di un partner sessuale (famosa la frase “pur che respiri” che sintetizza l’atteggiamento di molti maschi umani), le femmine soppesano i pretendenti cercandovi

quelle doti che meglio assicureranno la sopravvivenza alla futura prole (forza, intelligenza, ricchezza, potere, fedeltà). Mentre le femmine hanno la tendenza psicologica a soppesare le capacità dei maschi di formare una solida e prospera famiglia, i maschi, facendo ricchi regali, si prodigano nel tentativo di esagerare questa capacità. Mentre i maschi si ingelosiscono se la loro femmina li tradisce, le femmine si ingelosiscono solo se il loro maschio sottrae risorse ai figli facendo regali all'amante! Poiché, per quanto detto, le femmine sono sessualmente restie, poco disponibili e quindi geneticamente preziose, i maschi competono gli uni con gli altri per accaparrarsi le scarse opportunità sessuali. Essi hanno perciò sviluppato comportamenti aggressivi e questo spiega perché in molte specie i maschi siano dotati o si dotino di strumenti di lotta (corna, denti canini molto sviluppati, armi offensive). Anche in questo caso, quindi, è stato il comportamento che ha influenzato l'anatomia!

L'instaurarsi dei comportamenti sessuali in una specie è frutto dei soliti meccanismi evolutivi. Immaginiamo le conseguenze della casuale comparsa di una mutazione che attiva, in una femmina, un circuito nervoso che induce il comportamento di "compratore sessuale" prudente. L'oculata scelta del maschio assicura più nutrimento e protezione ai pochi figli, aumentando le loro probabilità di arrivare alla maturità sessuale e di trasferire alle generazioni successive i geni della madre, compreso quello mutato. Grazie a questo gene anche la resa riproduttiva delle figlie sarà migliore. E' facile capire che il nuovo gene ed il nuovo comportamento si diffonderanno rapidamente nella popolazione.

Nel corso dell'evoluzione, quindi, la vita non si è limitata ad inventare l'amore come unico strumento per convincere gli individui ad anteporre gli interessi della specie ai propri. Ha sviluppato anche una grande varietà di sentimenti e di comportamenti che gli fanno da corollario. Essi agiscono come persuasori occulti che inducono l'individuo a fare, inconsciamente, la cosa più "intelligente" anche se egli non è abbastanza intelligente da vedere il problema. Ci ha pensato la vita a selezionare per lui le "scelte" più opportune per massimizzare la resa riproduttiva della specie.

Anche la psicologia sessuale è, quindi, il frutto di una evoluzione che ha lo scopo di rendere la specie più adatta all'ambiente in cui vive. Nel caso dell'uomo, i comportamenti sessuali sono stati selezionati per adattarsi ad un ambiente ancestrale naturale ben diverso da quello odierno. Questo fa sì che molti di questi comportamenti non abbiano più molto senso. Ad esempio, per i nostri

antenati, che vivevano in un mondo in cui la scarsità dei beni materiali faceva la differenza fra la vita e la morte, era importante che una figlia si sposasse nel modo migliore possibile, socialmente parlando. Nella nuova famiglia, ricca e potente, i nipoti avrebbero avuto maggiori probabilità di sopravvivere favorendo la diffusione nelle generazioni successive dei geni della famiglia d'origine. Di questo innato comportamento siamo ancora inconsciamente portatori. Ma nel mondo odierno, caratterizzato dal diffuso benessere e dai grandi progressi della medicina che assicurano il raggiungimento della maturità sessuale praticamente ad ogni nato, questo istinto ha perso la sua funzione ed, anzi, potrebbe rivelarsi controproducente se riferito agli scopi per cui si è evoluto. Infatti, quasi sempre le donne ricche hanno meno figli di quelle povere. Attenzione, quindi a non agire come marionette, lasciando che i nostri comportamenti siano controllati secondo la logica di un grande burattinaio inconscio ormai avulso dalla nostra realtà!

Per continuare il breve *excursus* "metafisico" della vita bisogna accennare ad altre due importanti invenzioni: l'apprendimento e la socialità che, insieme, hanno portato alla cultura ed alla morale.

### ***L'apprendimento e la cultura***

Tutti sanno cosa sia l'apprendimento: il processo di acquisizione di un nuovo comportamento per potersi adattare meglio all'ambiente. Molti meno sanno come avvenga.

#### ***Come si apprende***

Parlando del sistema nervoso abbiamo detto che è formato da un numero inimmaginabile di neuroni. Ciascuno di questi può interagire con migliaia di altri neuroni grazie ai propri dendriti ed alle ramificazioni del proprio assone. Ciò rende il numero dei possibili circuiti praticamente infinito. La maggior parte dei circuiti nervosi che controllano le funzioni vegetative dell'organismo vengono definitivamente stabiliti durante lo sviluppo embrionale. Altri circuiti, invece, vengono lasciati "grezzi" conservando così la possibilità di allacciarli successivamente nel modo più conveniente per adattarsi alle diverse circostanze da affrontare. Al momento della nascita, nel cervello sono già presenti tutte le cellule nervose ma non sono ancora state attivate tutte le connessioni fra di esse. Durante la vita, sotto lo stimolo di segnali provenienti dall'esterno, si verifica l'apprendimento, cioè cellule ancora non connesse si connettono organizzando nuove reti di circuiti nervosi. Quello che accade è simile a ciò che fanno gli acquirenti di una casa che, pur ricevendo dall'impresa una rete standard di fili, possono personalizzarne una parte. Sotto le loro

direttive, l'elettricista allaccia parte dei fili producendo i circuiti elettrici più adatti alle loro particolari esigenze. All'occorrenza, altri circuiti possono essere attivati.

### *L'apprendimento individuale*

L'apprendimento che noi conosciamo, quello per intenderci che permette di riempire il nostro cervello di nozioni di ogni tipo (dall'inglese alla matematica, dal latino ai nomi dei Pokemon), è, in realtà, il prodotto finale di un processo evolutivo che ha origini antiche. Antiche ma non antichissime! Tale processo, infatti, poté iniziare solo quando l'evoluzione arricchì il cervello di circuiti nervosi in grado di classificare e di memorizzare le sensazioni che l'animale riceveva dall'ambiente esterno. Solo allora i circuiti innati che controllavano i comportamenti, poterono essere collegati ai circuiti nervosi che catalogavano le esperienze quotidiane. L'animale imparò così ad andare a caccia nel luogo che l'esperienza aveva classificato come "ricco di prede" oppure a stare lontano dal luogo che l'esperienza aveva classificato come "pericoloso". Gli ovvi vantaggi che offriva questo tipo di apprendimento "per osservazione" e "per tentativi ed errori", determinarono la selezione di tutti quei geni che lo favorivano. La selezione non si limitò solo ai geni che causavano miglioramenti nell'anatomia e nel funzionamento degli organi di senso deputati a percepire il mondo esterno, né ai geni che organizzavano nel cervello nuovi circuiti nervosi capaci di integrare le informazioni raccolte. Vennero selezionati anche i geni che inducevano nell'animale dei comportamenti finalizzati ad aumentare la raccolta di informazioni. Il frutto "metafisico" di questi geni è la curiosità che spinge gli animali alla esplorazione sistematica del territorio. Non a caso i giovani sono istintivamente più curiosi poiché ne hanno, oggettivamente, più bisogno.

Che l'innata tendenza all'esplorazione abbia una base genetica è dimostrato da parecchi fatti. Ad esempio, non tutte le razze di ratti hanno lo stesso grado di curiosità ed alcune esplorano più di altre. Inoltre, ratti ibridi, ottenuti incrociando individui appartenenti a due razze diverse per questa caratteristica, mostrano tendenze esplorative geneticamente prevedibili. Lo stesso vale per la capacità di apprendere. Già negli anni quaranta si notò che fra i comuni ratti di laboratorio alcuni riuscivano a percorrere rapidamente un labirinto per arrivare al cibo mentre ad altri occorreva un numero di tentativi notevolmente maggiore. Questa capacità veniva trasmessa geneticamente alla prole e fu possibile selezionare un ceppo caratterizzato da una alta capacità di apprendimento.

Dall'incrocio di animali scarsamente dotati si poté, per contro, ottenere un ceppo caratterizzato da bassa capacità di apprendimento.

Un tipo un po' particolare di apprendimento per osservazione è quello cosiddetto per "imitazione". In questo caso i membri di un gruppo animale copiano il comportamento di un conspecifico (appartenente alla stessa specie) che ha accidentalmente (per tentativi ed errori) imparato qualcosa di utile. Fra i tanti esempi di questo modo di apprendere, forse il più noto è quello delle cince (degli uccellini molto graziosi) che rubano la panna dalle bottiglie di latte. Tutto probabilmente iniziò quando, becchettando per caso il tappo di stagnola di una bottiglia, una cincia scoprì che era facile procurarsi un buon pasto e cominciò a farlo abitualmente. In breve tempo il comportamento si diffuse a macchia d'olio fra le altre cince che lo impararono osservando ed imitando la cincia "inventore". Un altro esempio di apprendimento per imitazione molto noto è quello che è stato osservato in una colonia di macachi. Una giovane femmina casualmente scoprì che immergendo le patate nel ruscello si allontanava ogni traccia della fastidiosa sabbia di cui erano sporche. Anche questo nuovo comportamento si diffuse rapidamente per imitazione fra i membri del gruppo.

Questi due esempi dimostrano come anche in animali diversi dall'uomo possa esistere un patrimonio di conoscenze e capacità che non sono innate ma che vengono tramandate "culturalmente" da individuo ad individuo, da generazione a generazione, mediante l'apprendimento imitativo. Le specie animali che hanno la capacità di tramandare questa pur semplice forma di cultura sono tutte collocate molto in alto nella scala evolutiva. Evidentemente per tramandare cultura è richiesta la presenza di circuiti nervosi assai complessi che solo gli animali superiori hanno geneticamente acquisito. Questo fa sospettare che la capacità che ha l'uomo di trasmettere una forma ancora superiore di cultura sia dovuta alla concomitante presenza, nel suo cervello, di circuiti che nessun altro animale ha.

L'apprendimento di cui abbiamo fin qui parlato può essere definito come "individuale". Infatti ogni individuo impara, per conto proprio e sfruttando le proprie capacità, le nozioni che gli vengono trasferite dall'osservazione dei suoi conspecifici o del resto del mondo.

### *L'apprendimento è un nuovo ed efficiente strumento evolutivo*

All'apprendimento "individuale" si è affiancato, nel corso dell'evoluzione, un altro tipo di apprendimento che potremmo definire "sociale". Prima di procedere ad analizzare questa più complessa forma di apprendimento concedetemi alcune considerazioni.

Parlando dell'evoluzione abbiamo detto che ha lo scopo di produrre specie sempre più adatte all'ambiente. Il risultato viene ottenuto grazie all'azione combinata di due fenomeni: le mutazioni, che alterano il DNA e causano una certa variabilità fra gli individui e la selezione naturale che, appunto, seleziona fra di essi quelli più adatti all'ambiente. Perché si abbia evoluzione bisogna che fra gli individui della stessa specie ci sia variabilità. Tanto maggiore è la variabilità, tanto più alte sono le possibilità offerte alla selezione di trovare fra i diversi individui quello più adatto.

Per capire l'importanza evolutiva dell'apprendimento, immaginiamo, di avere due individui genotipicamente e fenotipicamente identici (gemelli monoovulari o ipotetici cloni di uno stesso individuo) e di allevarli in due ambienti diversi. Vivendo esperienze diverse, in breve tempo, essi non saranno più uguali. Evidentemente l'apprendimento, come le mutazioni, ha prodotto una diversità che ha aumentato la variabilità fra individui. Ma, a differenza della variabilità causata dalle mutazioni, la variabilità prodotta dall'apprendimento non è casuale ma finalizzata a rendere gli animali più adatti all'ambiente in cui vivono. Dal punto di vista evolutivo non si può fare molto di meglio!

Malgrado abbia contribuito per milioni di anni ad assicurare la sopravvivenza delle specie animali ed a favorirne l'evoluzione, l'apprendimento "individuale" di per sé non si è evoluto molto. Le sue diverse forme, pur richiedendo circuiti sempre più complessi, sono sostanzialmente molto simili fra loro. Questa tendenza alla conservazione è probabilmente proprio legata al fatto che l'apprendimento è uno strumento evolutivo quasi "perfetto".

### *L'apprendimento pre-sociale*

Ma anche per l'apprendimento venne il momento di produrre un nuovo ramo. La necessità di una nuova forma di apprendimento si ebbe quando cominciò ad evolversi la socialità. Già per la gestione delle cure parentali, forse il più antico rapporto intraspecifico fra individui, i comportamenti istintivi cominciarono a dimostrarsi insufficienti

Abbiamo visto, come i Rettili, deposte le uova, si disinteressano quasi completamente della loro prole; con i piccoli nati non hanno alcun rapporto se non quello che c'è fra preda e predatore. Gli Uccelli, al contrario, covano le uova fino alla schiusa e stanno con i piccoli fino a quando non divengono autosufficienti. I Mammiferi, poi, non solo fanno sviluppare i figli all'interno del proprio corpo ma, una volta partoriti, li nutrono a lungo con una secrezione che essi stessi producono. Perché questi nuovi e rivoluzionari comportamenti potessero comparire e svilupparsi è stato necessario che si verificassero enormi cambiamenti nell'anatomia di questi animali. Mentre alcuni di questi cambiamenti anatomici sono evidenti (ad esempio nei Mammiferi compaiono le mammelle), la maggior parte di essi non è percepibile. La difficoltà che incontriamo ad individuarli è legata al fatto che essi appartengono alla categoria degli "organi metafisici", cioè degli organi cerebrali.

Prima di tutto furono necessari nuovi organi cerebrali in grado di bloccare i vecchi istinti individualistici bestiali (quelli, per intenderci, che spingono gli individui ad eliminare i propri piccoli, a ferire o uccidere i rivali, a rubare loro il cibo e le femmine). Questi "istinti a prevalere", che sono ben radicati nel cervello di ogni animale, sono prodotti da antichi circuiti che costituiscono la base anatomica dell'egoismo organico. Essi sono sostenuti di geni che si sono accumulati durante i milioni di anni di evoluzione durante i quali gli individui di una stessa specie si sono combattuti fra di loro nella lotta solitaria per la vita. Il loro blocco è necessario perché si instauri una qualunque forma di socialità.

Oltre agli organi necessari per impedire i comportamenti asociali si sono dovuti sviluppare, organizzare e gestire molti altri circuiti nervosi: da quelli che fanno istintivamente provare affetto per i propri figli, a quelli che fanno sentire dolore se loro soffrono e correre in loro aiuto se sono in difficoltà.

Anche l'apprendimento venne pesantemente coinvolto nella gestione dei nuovi rapporti che si venivano instaurando fra individui. Infatti, perché possiamo ammirare il bucolico quadretto della chiocciola che porta a spasso i suoi pulcini è necessario che la chiocciola abbia imparato a riconoscere i pulcini verso i quali deve comportarsi amorosamente (i propri) da quelli su cui può scaricare, a becchettare, la propria aggressività (gli altri). E' inoltre necessario che i pulcini abbiano imparato a riconoscere, fra gli animali del pollaio, la loro mamma. Perché si abbiano cure parentali devono

esistere dei meccanismi di riconoscimento! Ma come possono la chioccia ed i pulcini “ri” conoscere dei piccoli ed una mamma che non hanno mai visto prima? Con l’apprendimento, appunto!

Nei pulcini l’apprendimento avviene associando un circuito nervoso innato, che significa “mamma”, all’immagine della prima cosa che essi vedono muovere dopo la schiusa. In pratica, al circuito che rappresenta il concetto predefinito ed astratto di “mamma” viene collegata una immagine concreta. Questa semplice forma di apprendimento animale è detta imprinting e permette di acquisire la capacità di riconoscere ed instaurare i giusti rapporti con i membri della propria specie. Anche la promozione di molti altri legami sociali avviene attraverso l’inprinting. Ad esempio, i gatti riconoscono come conspecifici i ratti coi quali sono stati allevati e non uccidono mai né essi né ratti di aspetto simile. In questo caso l’immagine dei primi compagni viene collegata e diviene parte integrante del circuito nervoso che identifica i membri della propria specie.

L’inprinting si è evoluto per attribuire ruoli geneticamente definiti (madre, padre, consanguineo ecc..) ad individui con cui i piccoli vengono in contatto. In realtà, come abbiamo visto, esso non è che un mezzo per raggiungere il vero obiettivo: indirizzare sull’animale giusto i giusti comportamenti e sentimenti. Nel cervello, infatti, i circuiti che corrispondono a figure teoriche (madre, padre, figlio, consanguineo..) sono collegati, già prima della nascita, con i circuiti che determinano i comportamenti ed i sentimenti che l’individuo “deve istintivamente” provare per loro (affetto, seguire, non ammazzare...). Nel momento in cui, grazie all’imprinting, si stabilisce una connessione nervosa fra la figura teorica e quella reale, su quest’ultima si riversano i comportamenti ed i sentimenti geneticamente stabiliti come i più opportuni per la sopravvivenza della specie. Questa antica forma di apprendimento non serve solo ad individuare i bersagli degli affetti ma anche a calibrare la loro intensità. E’ esperienza di tutti che i sentimenti che si provano per i consanguinei sono più caldi quanto più la parentela è stretta (si prova un maggior coinvolgimento emotivo per i fratelli che per i cugini). Questa calibrazione dei sentimenti non viene certo raggiunta sentendo la presenza delle copie dei propri geni negli altri individui! Il risultato è ottenuto grazie al fatto che i circuiti nervosi, come i muscoli, si rafforzano tanto più quanto più sono esercitati. E’ la precocità e la frequenza dei contatti che i piccoli hanno con i diversi parenti che porta alla formazione, nel cervello, di circuiti che fanno provare per loro sentimenti di diversa intensità.

L'apprendimento si è quindi dimostrato uno strumento essenziale per il corretto instaurarsi dei più semplici rapporti affettivi che stanno alla base dei rapporti intraspecifici. Per fare questo, alla vecchia funzione "individualista" dell'apprendimento se ne affiancò una nuova "sociale".

A dire il vero, all'inizio il cambiamento "sociale" fu più filosofico che materiale. Infatti, i circuiti che permettono di imparare che l'individuo che ti si muove davanti è tua madre, non sono molto diversi da quelli che ti insegnano che un certo ambiente è più propizio per la caccia.

### *L'apprendimento sociale*

Il vero grande cambiamento "sociale" avvenne in seguito e fu favorito dalla convivenza che si andava instaurando fra i piccoli ed i genitori. Cerchiamo di capire cosa può essere successo ed in che cosa consista la novità. Immaginate che compaia un gene che induce nel genitore una grande eccitazione quando trova un boccone particolarmente appetitoso, un comportamento simile allo starnazzare della chiocchia davanti ad un grasso verme. Non vi è dubbio che ciò attira l'attenzione dei pulcini che accorrono ed assistono al pasto del genitore. Grazie al meccanismo dell'apprendimento "individuale", questa esperienza personale induce nel loro cervello la connessione di circuiti che etichettano come "cibo" il verme. Il risultato della comparsa del "gene dello starnazzo" è che i pulcini imparano che i vermi si possono mangiare. A dire il vero, bighellonando nell'aia e cercando di mangiare ogni cosa, prima o poi lo avrebbero comunque imparato. L'apprendimento favorito dallo starnazzo del genitore è solo più precoce. Ma questa precocità non è senza conseguenze: mentre i pulcini figli delle madri normali stanno ancora cercando di scoprire che i vermi sono cibo, i pulcini figli della madre mutante se li sono già mangiati. La dieta più abbondante e ricca di proteine favorisce la loro sopravvivenza e con essa la trasmissione ai discendenti dei loro geni fra cui quello dello "starnazzo" che hanno avuto dalla madre. In breve tempo, la specie si arricchisce di questo nuovo gene. Questo tipo di comportamento è ben radicato anche nel nostro cervello e noi lo usiamo senza accorgercene, istintivamente appunto, più spesso di quanto pensiamo. Tutte le mamme durante una gita fuori porta non riescono a trattenersi dal gridare "Le fragoline, le fragoline!", dall'aspettare i bambini per assaggiarle davanti a loro; dal distribuirne un po' per far provare loro che sono buone, dall'incitarli a raccoglierle.

Cosa hanno di particolarmente interessante questi tipi di geni rispetto agli altri che favoriscono l'apprendimento? Lo hanno reso veramente "sociale": hanno, infatti, favorito l'apprendimento di un individuo (il pulcino/bambino) agendo su un altro (la chioccia/mamma). Ci sono riusciti utilizzando come strumento un nuovo comportamento: l'insegnamento. E' l'insegnamento che ha messo il turbo all'apprendimento!

Grazie ad esso è stato possibile non solo il più rapido trasferimento alle generazioni successive di informazioni utili (come, appunto, cosa è cibo), ma anche di complessi comportamenti caratteristici della specie. Pensate alle gatte o alle leonesse che insegnano ai cuccioli le tecniche di caccia. Malgrado i moduli di caccia in questi animali siano istintivi, l'apprendimento della loro corretta sequenza viene accelerato dall'insegnamento. I due esempi fatti non sono che una goccia del grande mare degli insegnamenti "sociali" che vengono impartiti dai genitori. Essi lo fanno istintivamente, spinti e guidati da circuiti nervosi dell'insegnamento che si sono evoluti per favorire la sopravvivenza della specie favorendo la sopravvivenza dei propri figli.

### *Le diverse forme di apprendimento si integrano e si evolve la trasmissione culturale*

I due apprendimenti "individuale" e "sociale" che coesistono nelle specie superiori non si sono mantenuti su due binari paralleli. Le potenzialità fornite dal secondo hanno favorito il primo. Ad esempio, l'incoraggiamento dei genitori (che può essere considerato come un semplice forma di insegnamento istintivo) è un importante strumento per favorire l'apprendimento individuale! Infatti, l'aiuto psicologico dato da un guaito, una spintarella, un gesto d'affetto spesso fa la differenza fra impegnarsi nell'imparare o arrendersi davanti alle difficoltà.

Ma la cooperazione fra le due forme di apprendimento non si è fermata a questo. Nella nostra specie si sono evoluti dei circuiti che hanno permesso di ottenere un risultato straordinario. Per ben capire in cosa consista la novità ricordiamo come funzionano i due apprendimenti. Da una parte c'è l'apprendimento individuale. Grazie a questa forma di apprendimento ogni individuo, confrontandosi giorno dopo giorno con il mondo in cui vive, lo impara a conoscere. In pratica, sotto la "guida" degli stimoli provenienti dall'esterno, miliardi di cellule nervose si collegano fra loro e formano nuovi circuiti nervosi; queste strutture anatomiche conservano le esperienze e le conoscenze che ogni individuo acquisisce durante la sua vita. Purtroppo esse muoiono con lui! Dall'altra parte c'è l'apprendimento "sociale". Grazie all'insegnamento impartito da un membro

anziano della specie vengono connessi circuiti comportamentali innati già esistenti nel cervello di un giovane individuo adeguando così la struttura delle sue reti neuronali alle particolarità dell'ambiente in cui si troverà a vivere.

Da una parte, quindi, c'è un meccanismo che permette di acquisire nuove informazioni dal mondo esterno ma non di insegnarle agli altri membri della specie; dall'altra un meccanismo che permette di insegnare alle nuove generazioni, ma solo come calibrare gli antichi comportamenti istintivi sulla realtà quotidiana.

Durante l'evoluzione dell'uomo sono comparsi i geni che hanno permesso che si instaurassero connessioni nervose fra questi due tipi di apprendimento: che cioè si potessero insegnare anche le esperienze imparate individualmente! Ogni nuova scoperta, fosse essa il frutto dell'osservazione o dell'intelligenza, non morì più con lo scopritore ma poté essere insegnata ad altri. Essa divenne parte di quel patrimonio di conoscenze che chiamiamo cultura e che ci tramandiamo da individuo ad individuo, da generazione a generazione. A ben vedere questa caratteristica ha contribuito in modo essenziale al successo evolutivo dell'uomo. Cosa sarebbe la nostra civiltà se ogni nato dovesse, nell'arco della sua vita, riscoprire come accendere un fuoco, come costruire uno strumento tagliente, una ciotola, una capanna, un arco, delle frecce .... come addomesticare una pecora, un bue, un cavallo ..... come seminare il grano e coltivare gli alberi da frutta .... come fondere il minerale ferroso .... come costruire una automobile ed un computer?

Ben che vada saremmo ancora all'età della pietra, confidando sull'apprendimento per imitazione per accendere un fuoco e scheggiare una pietra!

Si può quindi dire che ciò che noi siamo è il risultato dei circuiti che hanno consentito di tramandare le esperienze individuali producendo un nuovo fenomeno biologico: l'evoluzione culturale. Ogni nuova acquisizione intellettuale che è comparsa nella popolazione è stata valutata, come fosse una mutazione, per la sua capacità di risolvere un problema; solo quelle vantaggiose sono state tramandate e sono divenute parte del patrimonio culturale. Le nozioni ormai apprese sono state il punto di partenza per nuove scoperte, accelerando così in modo esponenziale il processo di acquisizione della conoscenza: in meno di diecimila anni l'uomo è passato dall'età della pietra alla passeggiata lunare.

Da quanto detto risulta evidente il ruolo fondante che la trasmissione culturale della conoscenza ha svolto nell'evoluzione dell'uomo. Ma che significato ha ed avrà la trasmissione culturale sull'evoluzione della vita ?

Già una volta, nella lunga storia che stiamo raccontando, si è verificato un evento che ha permesso la trasmissione, nello spazio e nel tempo, delle conoscenze acquisite individualmente. Ciò avvenne quando comparve l'RNA replicasi, una molecola in grado di fare un calco degli RNA catalizzatori e, facendo un calco di questi calchi, di produrre RNA identici agli originali. La sua comparsa non fu priva di conseguenze. Cito me stessa "Ogni macchina-ribozima non doveva più essere reinventata, poteva essere riprodotta! ... Era nata la vita!"

Vista la simmetria fra cultura e vita possiamo rianalizzare ciò che accadde miliardi di anni fa per intuire ciò che potrebbe accadere nei prossimi miliardi di anni!

Prima dell'invenzione della RNA replicasi, il mare primordiale era popolato da tantissimi tipi di sacchetti lipidici che si erano spontaneamente formati inglobando le molecole organiche e gli eventuali ribozimi presenti nel mezzo acquoso. A causa della presenza/assenza e del tipo di ribozimi che contenevano, essi erano molto diversi fra loro. La "biodiversità" si esplicitava nel fatto che erano capaci di accelerare reazioni diverse a seconda dei ribozimi ospiti. In una inconscia lotta, i sacchetti si cannibalizzavano a vicenda appropriandosi degli altrui ribozimi.. Ma erano vittorie effimere: quando i ribozimi si inattivavano i sacchetti perdevano la capacità di catalizzare le reazioni ed alla lunga "morivano", chimicamente parlando! Chissà per quanto la situazione rimase in una sorta di equilibrio dinamico, fra ribozimi che si formavano e ribozimi che si distruggevano, sacchetti che si attivavano e sacchetti che si disattivavano. Un gigantesco "Fare e disfare è tutto un lavorare" che si perpetuava marciando sul posto. Dove erano i vincitori? Dove erano i vinti?

La comparsa casuale dell'RNA replicasi segnò la fine di tutto questo. Il sacchetto in cui esso si formò, a differenza degli altri, non morì più potendo duplicare i propri ribozimi e rendere così eterne le proprie conoscenze. Gli altri sacchetti non erano certo attrezzati a fronteggiare un simile concorrente che, non solo li distrusse, ma si appropriò delle informazioni/ribozimi che essi contenevano e le fece sue. La rivoluzione "epocale" che avvenne fu solo apparentemente "cruenta". Certo l'esistente venne annientato ma le informazioni contenute nei ribozimi dei perdenti non vennero distrutte. Anzi, venendo integrate nel patrimonio genetico del vincitore non morirono più e poterono essere tramandate nel tempo. La concentrazione di tante conoscenze in un unico

organismo, poi, permise di costituire quella massa critica che certamente favorì la successiva evoluzione della vita.

Quali saranno le conseguenze dell'evoluzione culturale dell'uomo sulla natura che ci circonda? Che impatto avrà sulla futura evoluzione della vita l'evoluzione culturale dell'uomo? Teoricamente le conoscenze che abbiamo acquisito durante l'evoluzione della nostra cultura ci permettono di essere gli artefici di una nuova rivoluzione. Siamo infatti in grado di fare una cosa che la vita non è più in grado di fare con la sessualità: unire il materiale genetico di specie che non si possono spontaneamente accoppiare ottenendo così nuovi organismi che contengono tutto il patrimonio genetico necessario per adattarsi a nuove situazioni. Questa che si chiama ingegneria genetica, a breve, potrebbe permettere di risolvere molti problemi (la fame nel mondo, ad esempio). E nei tempi lunghi? I tempi lunghi ci saranno solo se avremo capito il ruolo "morale" che la nostra specie si trova ad affrontare. Ed i primi atti che stiamo compiendo non sembrano promettere bene. Come successe miliardi di anni fa, anche noi stiamo distruggendo l'esistente ma, a differenza di quello che è successo allora, la nostra è una vera devastazione. Stiamo, infatti, portando all'estinzione le altre specie perdendo per sempre quei patrimoni genetici di conoscenze che esse avevano acquisito durante il loro lungo viaggio evolutivo di adattamento ad un ambiente. Come gli Archibatteri stiamo miopemente depauperando, ritenendolo "inutile", il patrimonio mondiale di DNA senza capire che ogni suo frammento costituisce una preziosa risorsa per il futuro della vita.

Non c'è che dire, per ora *l'Homo sapiens* sta comportando in un modo meno intelligente di un sacchetto di fosfolipidi contenete qualche ribozima e la RNA replicasi! Chissà se sapremo capire in tempo la responsabilità che ci è moralmente attribuita dalla posizione che occupiamo nell'ambito della natura?

### **La socialità**

La cultura non è stata il solo risultato dell'apprendimento "sociale". Abbiamo già visto come, ogni qualvolta nel corso dell'evoluzione è comparsa una nuova invenzione, essa sia stata immediatamente messa alla prova per verificarne l'utilità. Non sorprende che ciò sia successo anche per l'apprendimento "sociale". Ebbene, questa semplice invenzione si è dimostrata lo strumento che ha consentito un'altra grande rivoluzione evolutiva: l'invenzione della socialità.

Prima di tutto cosa è la socialità? E' la tendenza che hanno gli individui di una stessa specie ad unirsi per poter raggiungere uno scopo comune; richiede che tra i diversi individui si instaurino dei rapporti!

L'invenzione della socialità, e delle società animali che ne derivano, è, dal punto di vista evolutivo, la seconda grande rivoluzione dopo quella che segnò il passaggio dagli organismi unicellulari ai pluricellulari. Quella prima rivoluzione fu veramente un eccezionale salto di qualità che aprì alla vita un nuovo campo nel quale sbizzarrire la propria illimitata creatività. Dopo i primi tentativi volti ad individuare quale fosse il tipo di organizzazione più promettente, la vita si buttò a capofitto nell'inventare, in un crescendo rossiniano, tessuti, organi, apparati. Bocche, radici, stomaci, intestini, epatopancreas, fegati, cuori, vene, tronchi, dotti linfatici, branchie, polmoni, foglie, reni, ovaie, testicoli, fiori, muscoli, endo ed esoscheletri, chele, pinne, zampe, ali, squame, piume, unghie, artigli, becchi, peli, occhi, antenne, orecchie, nasi, nervi, cervelli resero sempre più complesse e perfette le macchine viventi. I milioni di forme di vita che popolano la terra testimoniano il fatto che l'idea originale di costruire un nuovo tipo di individuo, non più formato da una sola cellula ma da più cellule che cooperano fra di loro per il raggiungimento di un bene comune, era geniale ed ha avuto il successo strepitoso che meritava.

L'impulso che ha spinto la vita ad intraprendere la nuova avventura delle società animali è da ricollegarsi a due motivi. Il primo è la tendenza intrinseca della vita a non fermarsi mai, anzi ad evolvere continuamente verso organismi sempre più adatti a conservarsi e perpetuarsi nelle diverse condizioni ambientali. Il secondo motivo è invece contingente e legato al fatto che l'invenzione di sempre nuove forme di vita pluricellulari anatomicamente e funzionalmente diverse aveva ormai esaurito le potenzialità fornite da questo tipo di organizzazione. Sì, probabilmente si sarebbe potuto migliorare ancora qualche dettaglio ma non certo inventare qualcosa di veramente innovativo. Di più sulla struttura degli organismi pluricellulari non si poteva fare!

### *Compare un nuovo organismo: il gruppo sociale*

Ed ecco allora la seconda rivoluzione: non potendo più migliorare l'anatomia degli organismi pluricellulari la vita ha cominciato a lavorare sul loro comportamento! La nuova idea originale è la stessa idea originale della prima rivoluzione che ha inaugurato il vecchio adagio "l'unione fa la forza". Questa volta, però, i soggetti dell'operazione non sono più cellule che si uniscono per

formare un organismo pluricellulare ma gli organismi pluricellulari stessi che, uniti in una società, cooperano fra di loro per il raggiungimento di un bene comune: la migliore sopravvivenza della loro specie! Da quanto detto dovrebbe risultare evidente che, per analogia con la prima rivoluzione, anche il prodotto della seconda, è un organismo vivente. Ma anche se questo concetto può essere spiegato razionalmente, a dire il vero tutti noi abbiamo enormi difficoltà a considerare una società animale come un individuo biologico. Il motivo è legato al fatto che riteniamo le società animali il frutto di un atto volontario e non di una pulsione innata degli individui che le costituiscono. E' la natura metafisica che inconsciamente attribuiamo alle società che ci impedisce di accettarle come mere entità fisiche dai connotati e dalle radici profondamente animali.

Per convincerci di questa realtà consideriamo brevemente alcune forme di società animali, cercando di individuare le origini organiche che hanno portato alla loro generazione e che sono alla base della loro esistenza.

### *L'evoluzione della socialità*

Prima di tutto descriviamo qual'è il comportamento "sociale" proprio della maggior parte degli animali: il più diffuso comportamento sociale è il comportamento asociale. Questo dato di fatto non solo indica che l'originale comportamento solitario ben assicura la sopravvivenza alla maggior parte delle specie animali che popolano la terra ma anche che la seconda rivoluzione è iniziata da poco ed ha dato, perciò, ancora pochi frutti.

Nelle specie non sociali i mutui rapporti fra i membri sono basati sulla territorialità: i singoli individui occupano un'area indipendente che fornisce loro un sufficiente approvvigionamento alimentare; il territorio individuale viene difeso grazie alla notevole aggressività che essi hanno e che indirizzano anche contro i membri della propria specie. In questa lotta vale la vecchia regola "*mors tua vita mea*". Malgrado ciò, questo tipo di organizzazione "asociale" è molto funzionale ai fini della conservazione della specie poiché prevalgono nella lotta per il territorio, e quindi per il cibo, gli individui più forti e più aggressivi. Sono loro che si riproducono e trasmettono alle generazioni future non solo le proprie caratteristiche anatomiche ma anche quelle di comportamento; nel loro insieme, queste doti fisiche e "metafisiche" divengono il corredo fenotipico, direttamente controllato dal patrimonio genetico, che assicura alla specie la sopravvivenza.

Come abbiamo visto anche questo tipo di "non società" ha già in sé alcuni germi di interazioni intraspecifiche finalizzate al raggiungimento di uno scopo comune; possono essere considerate tali, infatti, le cure parentali. Anche per l'attuazione delle più semplici forme di cure parentali è stata necessaria la comparsa nel cervello di nuovi "circuiti metafisici" che inducono i comportamenti che favoriscono la sopravvivenza della prole. I primi a comparire devono essere stati quelli in grado di bloccare, o almeno limitare, l'attività degli antichi circuiti della porzione "rettiliana" del cervello che guida gli istinti individualistici bestiali. Solo con la repressione di questi comportamenti da Mr. Hyde si poté instaurare una qualunque forma di socialità, anche la più elementare, come le cure parentali.

Nelle specie dotate di questi nuovi circuiti la diminuita aggressività verso la prole divenne istintiva come la paura, l'istinto di conservazione, la gioia. Anche questo nuovo comportamento, quindi, è di chiara natura fisica e non metafisica, essendo codificato nel patrimonio genetico ed esprimendosi sotto forma di nuovi circuiti nervosi integrati.

#### Le società temporanee

Il controllo dell'aggressività è alla base non solo di semplicissime forme di socialità (cura parentale) ma anche di altri ben più complessi comportamenti sociali. Vediamo il caso della società temporanea che si instaura fra animali ibernanti. E' questo un fenomeno per cui individui di specie che in condizioni normali sono molto aggressive e territoriali, ad esempio alcune specie di pipistrelli, in inverno perdono queste caratteristiche e si riuniscono in tane comuni per sfruttare al massimo il calore animale. Questa consociazione permette di aumentare il numero di individui che superano i rigori dell'inverno. L'origine di questo comportamento sociale è probabilmente da attribuire alla comparsa, in un individuo, di un nuovo circuito che controllava l'aggressività: esso si attivava al comparire dei primi freddi. Egli trasferì questa caratteristica genetica ai propri figli e ciò produsse una comunità che, in inverno, si riuniva in una tana comune. Ben presto, poiché questo nuovo comportamento permetteva ad un maggior numero di discendenti di sopravvivere, i mutanti soppiantarono i normali e la specie da solitaria divenne "sociale".

In questa semplice forma di società si intravede già il super-individuo che si sta costituendo: il gruppo. Esso è, in pratica, un organismo che normalmente non esiste ma che si forma quando gli individui, singolarmente, non sono in grado di affrontare e superare un ostacolo, nel nostro caso il

freddo invernale. L'organismo che sto descrivendo somiglia ad una sorta di Voltron, il complesso super-robot personaggio dei cartoni animati giapponesi che, saltuariamente e momentaneamente, si assembla dall'unione di piccoli robot individuali e che riesce a sconfiggere nemici che i singoli robot non riuscirebbero, da soli, a contrastare.

#### Le società permanenti

Consideriamo ora una società più complessa: quella dei lupi. E' questa una società permanente, cioè che dura tutto l'anno, in cui numerosi animali, uniti da vincoli di parentela, vivono insieme. In essa vi è una rigida gerarchia ed ogni individuo accetta la propria posizione sociale: vi è un capo maschio che, unico, ha il diritto di riprodursi mentre gli altri hanno ruoli subalterni e partecipano alle attività necessarie per fornire cibo e difesa alla comunità. Anche fra le femmine ve ne è una dominante che si riproduce ogni anno, mentre le altre svolgono ruoli subordinati fra cui accudire i piccoli della femmina dominante.

L'evento che ha portato alla formazione di questo tipo di società è stato probabilmente la comparsa di una mutazione che alterava alcuni fondamentali meccanismi di controllo del comportamento. E' esperienza di ognuno di noi che ogni animale ha una limitata aggressività verso i propri genitori che perdura fino a quando non ha completamente formato le strutture anatomiche che lo rendono in grado di badare a sé stesso; in pratica fino a quando non diviene adulto. Questo importante evento anatomico induce la produzione di segnali interni che alterano il modo di porsi di fronte ai genitori: essi non sono più un aiuto ma un ostacolo che si frappone alla realizzazione di sé come individuo biologico. Questo comportamento che, visto da noi membri di una specie estremamente sociale sembra moralmente deplorabile, è in realtà un meccanismo inventato dalla natura perché il nuovo giovane individuo si emancipi ed inizi la propria vita adulta. Questo meccanismo ha la stessa funzione dell'acido abscissico, la molecola che fa staccare i frutti dall'albero per permettere loro di dare origine ad un nuovo organismo.

La mutazione che ha portato alla comparsa di alcune società permanenti, fra cui quella dei lupi, ha probabilmente modificato il comportamento aggressivo verso i genitori. Per effetto di tale mutazione i giovani, all'acquisizione della struttura anatomica adulta, non ripudiavano più i genitori ma rimanevano nel gruppo che risultava così formato dalle cucciolate di più anni. Il mantenimento dell'ordine e della gerarchia fra i tanti individui della famiglia era favorito dal fatto che i giovani

subalterni avevano mantenuto, se non il fisico, la psicologia del cucciolo e presentavano molti comportamenti-segnale che hanno lo scopo di bloccare l'aggressività degli adulti. Ad esempio, l'esposizione del ventre, un classico comportamento-messaggio di sottomissione dei cuccioli, nei lupi e nei cani è stato mantenuto anche dagli adulti subalterni per bloccare l'aggressività dei dominanti nei loro confronti.

E' abbastanza intuibile la catena di eventi che da questa mutazione, avvenuta in un individuo, ha trasformato l'intera specie da asociale in sociale: l'individuo nel quale essa comparve, trasferì geneticamente questa caratteristica ai propri figli che rimasero più a lungo con i genitori; la famiglia allargata a più generazioni favorì la sopravvivenza di un numero superiore di cuccioli poiché essi erano curati e difesi non solo dalla madre o dai soli genitori ma anche da molti fratelli e sorelle adulti; il maggior successo riproduttivo del gruppo familiare che aveva questo comportamento sociale "mutante" favorì il suo prevalere sugli altri individui della specie; col passare del tempo la specie risultò sempre più composta da gruppi familiari discendenti dall'originale mutante; in questo modo la nuova caratteristica di comportamento sociale divenne caratteristica della specie.

*Le caratteristiche delle società permanenti*

Nel semplice tipo di società dei lupi compaiono, in embrione, importanti caratteristiche che sono alla base anche delle società animali più complesse: essa è permanente, classista, altruista. Il termine permanente è sufficientemente chiaro da non richiedere ulteriori spiegazioni, non così, forse, gli altri due.

La parola classista non ha qui le connotazioni politiche che siamo abituati ad attribuirle: semplicemente indica che in questo tipo di organizzazione vi è una certa suddivisione del lavoro fra membri del gruppo che la compongono. In questa famiglia-Voltron, il capo branco, grazie alla sua maggiore anzianità ed esperienza, svolge la funzione di testa pensante oltre a quella di organo sessuale maschile, la femmina dominante quella di organo sessuale femminile, i figli adulti quella di organi difensivi e procacciatori del cibo.

Il termine altruista mette in rilievo il fatto che i membri di questa società sacrificano parte della propria vita, e a volte la vita stessa, per assicurare la sopravvivenza ad altri membri del gruppo. Questa caratteristica appare in contraddizione con uno dei capisaldi dell'evoluzione: le mutazioni

persistono se forniscono un vantaggio riproduttivo all'individuo che le ha subite. In questo caso, invece, i giovani subalterni sono apparentemente svantaggiati in quanto difficilmente si riproducono. Se analizziamo la struttura della famiglia-Voltron ci rendiamo conto di come la contraddizione sia, in realtà, solo apparente. La famiglia-Voltron è un organismo formato da più individui consanguinei che, per questo, hanno in comune la maggior parte dei geni, tra cui il gene che conferisce loro la socialità. Poiché il DNA è virtualmente comune l'eventuale sacrificio di un lupo subalterno per assicurare il successo riproduttivo di suo padre o di un suo fratello assicura anche il suo successo riproduttivo. Questo comportamento non è dissimile da quello delle diverse parti di un organismo pluricellulare, ad esempio le foglie ed il seme: le foglie muoiono senza essersi riprodotte ma in realtà, con il servizio che forniscono, permettono al seme di riprodurre il DNA della pianta a cui loro appartengono, cioè il loro DNA.

La società familiare è stata il prototipo dal quale si sono poi evolute molte forme di organizzazione sociale dei Vertebrati. Il meccanismo che ha portato alla diversificazione non è dissimile da quello che ha generato le diverse forme di organismi pluricellulari. Il *primum movens* sono sempre le mutazioni che, in questo caso, hanno prodotto delle famiglie-Voltron con comportamenti mutanti; fra queste la selezione naturale ha favorito quelle che avevano i comportamenti più adatti per sopravvivere in un certo ambiente. In alcuni ambienti sono prevalse le famiglie più aggressive e feroci, in altri quelle che avevano un'organizzazione sociale interna migliore, in altri ancora quelle meno aggressive che si fusero con altre a formare branchi o clan...

Ma quali sono stati i meccanismi e le strutture biologiche del comportamento che hanno permesso alle società di stabilirsi e di funzionare? Per poter rispondere ri-diciamoci che cosa sia una società: è unione di individui aventi scopi comuni da raggiungere e rapporti reciproci fra di loro. In questa definizione sono ben focalizzati i due aspetti che sono alla base di ogni società: l'esistenza di uno scopo e l'esistenza di rapporti che ne permettono il raggiungimento.

Lo scopo che la vita si è prefissata, imboccando la via dell'evoluzione del comportamento sociale, è lo stesso scopo della prima e della seconda grande esplosione evolutiva che hanno portato, rispettivamente, agli organismi uni- e pluricellulari: conservare e perpetuare sempre meglio la vita stessa. Anche il mezzo che la vita ha utilizzato per instaurare e mantenere i rapporti fra gli individui di una società non è nuovo. Come nell'evoluzione dagli organismi uni- ai pluricellulari, anche in questa nuova forma di evoluzione, per coordinare i comportamenti finalizzati al bene comune, è

stato necessario inventare un modo per trasferire informazioni da un individuo all'altro, da una generazione all'altra. Ciò è stato ottenuto, ancora una volta, con la comunicazione. Quella speciale forma di comunicazione che abbiamo definito apprendimento "sociale".

### ***L'apprendimento e la socialità***

Abbiamo accennato come, a seconda degli ambienti e delle caratteristiche delle specie, si siano evolute società animali organizzativamente assai diverse. Dalla semplice associazione familiare monogama guidata dal padre o dalla madre o da entrambi (i lupi); alle associazioni monogame gregarie in cui diverse famiglie monogame vivono insieme (marmotte); alle associazioni poligame in cui un maschio ha a disposizione molte femmine nel periodo riproduttivo ma, durante il resto dell'anno, i maschi e le femmine stanno separati in branchi guidati da propri leader (gli elefanti); ad altre associazioni poligame in cui il maschio dominante, le femmine e i maschi subalterni vivono insieme tutto l'anno (gli scimpanzé). Il tipo di società in cui gli individui di una specie si organizzano non è casuale ma geneticamente definito, esattamente come lo sono le loro caratteristiche fisiche ed i loro comportamenti istintivi. Ad esempio, i lupi si organizzano sempre in associazioni familiari monogame a guida maschile mentre gli elefanti si organizzano sempre in associazioni poligame con i maschi e le femmine separati. Ma se è la genetica a stabilire l'organigramma caratteristico della specie, chi stabilisce in quale posizione si colloca ogni individuo?

### ***Imparare a guadagnarsi il proprio posto ed a tenercelo***

Questo problema non è di secondaria importanza. Infatti, perché ogni società animale possa svolgere al meglio la funzione per cui si è evoluta (assicurare il massimo successo riproduttivo al gruppo e quindi alla specie) è necessario che abbia gli individui giusti ai posti giusti. Ottenere questo risultato non è facile soprattutto poiché cambia in continuazione il materiale animale a disposizione. Anche senza considerare diversi gruppi sociali della stessa specie, è evidente a tutti che nell'ambito dello stesso gruppo c'è un continuo ricambio di individui che nascono e muoiono e che l'efficienza fisica e mentale degli stessi cambia nel tempo, a volte repentinamente.

Come adattare il dettato genetico alla realtà quotidiana? La strategia utilizzata è quella di far sì che ogni individuo impari a giudicare sé stesso e gli altri; dal confronto, individui la propria posizione nella gerarchia e vi si collochi. In queste poche righe è riassunto, in modo estremamente conciso, il

meccanismo complesso ed articolato che permette di inserire in modo ottimale un individuo nella comunità. Poiché la base su cui poggia tutta la strategia è l'auto-valutazione, durante l'evoluzione si sono selezionati dei circuiti nervosi che istintivamente inducono al confronto con gli altri membri del gruppo. Il risultato è l'instaurarsi di una complessa serie di rapporti, nell'ambito dei quali ogni individuo svolge la doppia funzione di discente e di docente. La nuova tendenza al confronto, che è alla base di questa forma di apprendimento sociale, non deriva certo dalla antica tendenza a lottare contro i propri simili. La vecchia filosofia del "*mors tua vita mea*" sarebbe stata suicida nel nuovo contesto sociale. Quello contro cui si deve lottare, infatti, non è più un nemico ma un compagno e ogni danno che gli si procura, indebolendo il gruppo, mette a repentaglio anche la propria sopravvivenza. Come ho già accennato, i nuovi circuiti che si vanno collegando man mano che si apprendono le regole ed il proprio ruolo nell'ambito della società, bloccano i vecchi circuiti da Mr. Hyde. Ma la transizione da Mr. Hyde a Dr. Jackill deve avvenire nel modo meno rischioso e traumatico per tutti, sia in termini materiali che psicologici.

### *Giocando si impara ...*

Per ottenere questo risultato venne inventato un nuovo modo di apprendimento "sociale": il gioco, in cui gli individui saggiano, in un contesto non conflittuale, le proprie forze sia fisiche che di carattere. Nel gioco sono sopportabili ed accettabili sconfitte ed umiliazioni che in altre situazioni porterebbero a faide infinite. Che questa sia la sua origine ed il suo significato, lo confermano parecchi dati. Primo fra tutti, il fatto che l'istinto al gioco sia più sviluppato nei maschi che nelle femmine; sono essi, geneticamente più aggressivi, ad averne più bisogno. Secondo, che questo istinto sia tanto più forte e duri tanto più a lungo quanto più sociale è la specie; anche in questo caso ce n'è più necessità. Nella nostra società, la più sociale di tutte, siamo arrivati al punto di giocare tutta la vita (una partitina a carte fra amici si fa, con piacere, anche a novant'anni!). Non solo! Nella nostra società il gioco, da fenomeno privato, è diventato pubblico. Pensiamo ai giochi olimpici ai quali sono ufficialmente riconosciuti quel ruolo e quel significato di pace e fratellanza per cui il gioco è nato milioni di anni fa!

Da quanto detto dovrebbe essere evidente che il gioco è uno dei pilastri portanti della socialità. Individui e gruppi che non hanno l'istinto al gioco e non ne accettano le regole sono pericolosi per la specie.

Ma come funziona il gioco? Come riesce a far sì che chi esce perdente da un confronto non risenta delle aspetti psicologici negativi della sconfitta? Per capirlo vediamo cosa succede biochimicamente nel cervello quando avviene uno scontro. I circuiti nervosi che registrano i risultati degli incontri/scontri rispondono ad essi variando la produzione di neurotrasmettitori, le molecole che, agendo come dei collanti, uniscono i neuroni-fili e permettono la formazione di specifici circuiti. In particolare, quanto più si ha successo tanto più aumenta, nel cervello, la concentrazione di una di queste molecole, la serotonina. Essa attiva i circuiti che fanno assumere gli atteggiamenti esteriori che rispecchiano la stima che un animale ha di sé stesso. Nei cani, ad esempio, i vincitori mostrano la propria dominanza alzando la coda come un vessillo mentre i perdenti la abbassano fino a ritrarla fra le gambe oltre ad appiattirsi al suolo o a rotolarsi sul dorso mostrando l'addome. La serotonina attiva anche i circuiti che evocano quelle sensazioni e quei sentimenti che nel loro complesso potremmo chiamare autostima. Se si è vincitori ci si esalta e si diventa euforici, al contrario se si è perdenti ci si può deprimere fino al suicidio. A causa di questo meccanismo biochimico il risultato degli incontri/scontri sarebbe una schiera di depressi che, pur di non soffrire, sfuggirebbe ad ogni ulteriore confronto. E non è certo questo il substrato ideale per costruire un gruppo animale vincente nella lotta per la vita! Per il successo del gruppo è importante che ogni individuo, anche se in posizione subordinata, abbia sicurezza e fiducia in sé stesso e voglia continuare ad interagire con gli altri.

Ed è qui che si inserisce il gioco! Infatti, a tutte le situazioni che siano state etichettate come gioco vengono associati dei circuiti nervosi che fanno sentire piacere. Essi rilasciano dei neurotrasmettitori che in parte neutralizzano e rendono sopportabile il dolore che si prova quando si perde. La calibrazione dei circuiti piacere/dolore, durante i quali Dr. Jackill subentra a Mr. Hyde, viene fatta con l'apprendimento e richiede tempo. E' esperienza comune a tutti che un bambino, alle sue prime esperienze del gioco delle carte, soffre se perde; egli pensa che chi lo ha vinto gli abbia fatto un affronto tremendo e mostra verso di lui una forte aggressività. Se perde sempre non vorrà più giocare ma se vince ogni tanto, il piacere che prova gli darà la forza di continuare. Dopo un po', pur perdendo, non soffrirà più ed accetterà di giocare anche se sa che ha molte probabilità di essere sconfitto. Ancora una volta l'apprendimento "sociale", favorito dal gioco, ha trasformato un individuo asociale in un membro di una società animale!

I meccanismi biochimici che controllano l'apprendimento del gioco delle carte sono gli stessi che si attivano quando si imparano i ben più importanti comportamenti che permettono di occupare il giusto posto nel contesto sociale.

Ma qual è il giusto posto? La posizione che ogni individuo va ad occupare è la risultante dei confronti con gli altri membri del gruppo. "Scontrandosi" con i compagni nel gioco egli impara chi vale di più e chi vale di meno di lui. Dal rapporto relativo fra le sue doti e quelle dei compagni egli capisce quale è il suo rango ed assume gli atteggiamenti che lo testimoniano. Non è difficile capire come nei confronti fra giovani dello stesso gruppo prevalgano quelli che hanno, in maggiore misura, le doti che vengono istintivamente apprezzate da quella specie: in alcune è la forza, in altre la furbizia, in altre il coraggio.

*... e con l'affetto si impara meglio*

Ovviamente un ruolo fondamentale per l'inserimento dei giovani nella società è svolto dai genitori a cui è geneticamente demandata la principale responsabilità nell'insegnamento. Sono soprattutto loro che, con i loro atteggiamenti critici, stigmatizzano i comportamenti che non sono in accordo con le regole del gruppo; sono loro che, facendole costantemente rispettare, connettono giorno dopo giorno i circuiti "sociali" da Dr. Jackill nel cervello dei loro figli. E' evidente che la capacità di comandare/insegnare dei genitori ha una grande influenza sulla accettazione da parte dei figli del gruppo e da parte del gruppo dei loro figli. E tutto questo si ripercuote sulla posizione che i loro figli assumeranno nella gerarchia sociale.

Poiché l'insegnamento dei genitori è solo parzialmente impartito sotto forma di gioco, i suoi aspetti traumatici devono essere tamponati in altro modo. Sono le dimostrazioni di affetto che accompagnano o seguono un rimbrotto che rendono accettabile e tollerabile il dolore. L'abbraccio ed il classico "Lo dico per il tuo bene!" sono le espressioni umane che riassumono questo comportamento geneticamente stabilito milioni di anni fa.

Questo sistema, che permette di collocare nella società le "new entries", viene utilizzato anche per riorganizzare la gerarchia ogniqualvolta i rapporti di forza interni cambiano. La morte o la perdita di efficienza fisica di componenti del gruppo è l'occasione per una rivalutazione delle capacità degli individui e per la riassegnazione dei ruoli. Si possono ricondurre a questo meccanismo le guerre di mafia che scoppiano ogniqualvolta un vecchio capo muore o va in galera!

### *Il vecchio sistema di apprendimento è ancora adeguato?*

Prima di esaminare il modo con cui l'apprendimento e la socialità hanno portato alla morale, mi permetto un paio di considerazioni sui problemi che si stanno verificando a causa delle diverse velocità che hanno l'evoluzione culturale e l'evoluzione biologica dell'uomo.

Ho già sottolineato come il successo evolutivo dell'uomo sia soprattutto dovuto alla sua capacità di acquisire nuove conoscenze e di trasferirle alle generazioni successive. Non vi è dubbio che anche il suo futuro dipenderà da queste capacità. Purtroppo, la rapidità con cui si è verificata l'evoluzione culturale sta mettendo in seria difficoltà i meccanismi che l'hanno fin qui sostenuta. L'enormità delle nozioni accumulate nel passato fa sì che i genitori non siano più le sole figure deputate al loro insegnamento. Inoltre, il periodo della vita durante il quale avviene il passaggio delle informazioni ai giovani si sta sempre più estendendo dall'infanzia, all'adolescenza, alla maturità. Per questi motivi la perpetuazione della cultura dell'umanità è sempre più affidata a docenti ed a discenti che non sono sostenuti dagli istinti messi a punto a questo scopo dall'evoluzione biologica. I risultati sono sotto gli occhi di tutti: mentre i bambini, con i loro perché, mendicano la conoscenza, gli adolescenti la subiscono quando non la rifuggono; mentre l'insegnamento è connaturato al ruolo di genitore, per molti insegnanti è solo una mera occupazione. La nostra specie, che si è dimostrata unica per la sua capacità di tramandare conoscenze e che ha costruito il proprio successo evolutivo su questa capacità, comincia a mostrare difficoltà nel trasferire ai giovani il proprio passato culturale. Quanto ho detto sui meccanismi inventati dalla vita per rendere accettabili ai giovani gli insegnamenti impartiti dai genitori dovrebbe essere fonte di ispirazione per migliorare la produttività di questo processo. Solo con il gioco, la gratificazione ed il coinvolgimento emotivo ed affettivo di tutti si può riaccendere la curiosità nei giovani e ridare loro la gioia dell'apprendere.

L'altra considerazione riguarda i ruoli distinti che svolgono i diversi membri della società nell'acquisizione e nel trasferimento della conoscenza. Il trasferimento è geneticamente affidato ai vecchi che fungono da depositari della cultura; l'hanno appresa dalla generazione precedente e la trasferiscono a quella successiva. L'acquisizione è fatta dai giovani che geneticamente sono più curiosi. L'introduzione nella cultura del gruppo delle nuove scoperte segue un percorso alquanto tortuoso. La sua diffusione avviene in modo rapido fra i giovani ma trova enormi resistenze fra i membri maschi più anziani. Il motivo non è tanto la difficoltà di apprendimento quanto l'atteggiamento psicologico che i vecchi hanno nei confronti dei giovani che, da milioni di anni,

attentano alla loro posizione di dominanza. L'atteggiamento antagonista degli anziani maschi nei confronti dei giovani, atteggiamento che non si è mai completamente sopito anche nelle specie sociali, si esprime anche sotto questa forma di boicottaggio. Solo quando i giovani diventano anziani e dominanti le loro scoperte possono essere da loro insegnate e divenire parte della cultura del gruppo.

Questi comportamenti istintivi (gli anziani conservatori ed i giovani innovatori) sono stati geneticamente selezionati come i più adatti per assicurare la sopravvivenza dell'uomo nella realtà che egli ha incontrato durante la propria evoluzione biologica. Infatti, nelle primitive società umane la vita dipendeva più dalle conoscenze acquisite che non dalle novità e non c'era fretta di verificare l'utilità di una nuova scoperta. Ma nella nostra moderna società, il cui benessere si fonda sempre più sulla capacità e rapidità di produrre e vendere innovazione, questi comportamenti sono controproducenti, in particolare nelle strutture finalizzate all'acquisizione e alla applicazione di nuove conoscenze. La ricerca non può essere gestita da figure Neanderthaliane che boicottano i giovani più dotati e tramandano oltre misura un presente che è già passato!

### ***La socialità e la morale***

#### ***Cosa è la morale e qual'è la morale della vita***

Parliamo ora della morale, una delle espressioni metafisiche più elevate dell'uomo. La morale è l'insieme dei principi e delle regole che guidano i comportamenti classificandoli in buoni e cattivi in base al loro essere in accordo o in disaccordo con un fine che per definizione è buono. Se si fa una lettura attenta di questa definizione ci si rende conto di come essa possa essere estesa a tutti i fenomeni che hanno un fine e che per raggiungerlo utilizzano dei mezzi. Ciò vale anche per la vita che, fin dal momento in cui è comparsa, si è prefissa uno scopo: vivere. La morale che ha utilizzata è ben chiara: è buono tutto ciò che favorisce il perpetrarsi della vita ed è cattivo tutto ciò che lo impedisce. Gli strumenti che la morale ha usato, nel corso della evoluzione, per costringere gli organismi viventi ad adattarsi ad essa sono stati molti e diversi. I primi sono stati sicuramente fisici poiché per milioni di anni la morale è stata perseguita senza che si fosse ancora evoluta una mente in grado di distinguere il bene dal male. Successivamente, con l'entrata della vita nella "metafisica", gli strumenti che hanno inconsciamente indirizzato gli animali ad assumere i comportamenti più adatti alla sopravvivenza sono diventati molto più

ambigui. La componente “metafisica” è divenuta sempre più prevalente fino a raggiungere il suo culmine nella nostra morale. Ciò che noi etichettiamo come “morale dell’uomo” non è altro che il più recente ed evoluto strumento metafisico che spinge, più o meno consciamente, ogni individuo della specie umana a perseguire il fine della vita. Non credo sia sfuggito a nessuno che la nostra morale indica come “buoni” i comportamenti sociali che, guarda caso, sono proprio quelli che hanno favorito la sopravvivenza della nostra specie e quindi la sopravvivenza della vita.

Per convincerci di questo, che cioè la morale dell’uomo non è nient’altro che quell’antica morale della vita vestita di nuovi panni, ne ripercorreremo l’evoluzione prendendo in esame le fasi che ha attraversato e gli strumenti che ha utilizzato.

### *Una morale per il bene dell’individuo*

Nella prima fase, lo strumento al servizio della morale è stato la variabilità dell’informazione genetica, cioè le mutazioni. Sono state loro che hanno diversificato gli individui fra cui selezionare quelli “buoni”, che riuscivano a sopravvivere, da quelli “cattivi” che, invece, non ce la facevano. Le mutazioni e la selezione naturale sono stati gli unici strumenti al servizio della morale durante i milioni di anni in cui la vita non era ancora entrata nella “metafisica” e sono ancora gli unici per gli organismi viventi che, come le piante, non hanno un sistema nervoso. Questa prima ed antica morale non prevede “scelte” da parte degli organismi viventi; essi, piuttosto la subiscono.

Ma quando negli animali comparvero i primi circuiti nervosi che controllavano i comportamenti, si presentò la possibilità che le loro azioni fossero in accordo o in disaccordo con il fine della vita.

Ad esempio, quando si aveva la sensazione di fame, qual’era fra i tanti possibili comportamenti quello moralmente “buono”, cioè quello che permetteva di sopravvivere? Malgrado la maggior parte degli animali non capisca la funzione dell’alimentazione, tutti quando hanno fame mangiano. Evidentemente nel corso dell’evoluzione deve essere comparso un meccanismo che indirizza gli animali verso il giusto comportamento. Furono le solite mutazioni che, generando nuovi circuiti nervosi, diversificarono i comportamenti degli individui; fra questi la selezione naturale premiò quelli che fornivano la soluzione migliore al problema. Nell’esempio fatto

ebbero maggiori probabilità di sopravvivere gli individui che alla sensazione di fame associavano il circuito nervoso che spingeva a mangiare. Questo sistema, geneticamente fissato e gestito dagli istinti, è in grado di indurre i comportamenti giusti anche negli animali che non sono in grado di capire il perché delle proprie azioni. Un neonato, che non è sicuramente un animale pensante, quando ha fame cerca il capezzolo: fa istintivamente la cosa che gli assicura la sopravvivenza.

Per essere ancora più sicuri che gli individui facessero la scelta corretta, essa venne gratificata con sensazioni piacevoli che gli animali stessi si auto-dispensavano. Perché ciò potesse avvenire dovettero comparire dei circuiti nervosi che premiavano il comportamento “buono” e lo incentivavano. Ciò venne ottenuto secernendo delle molecole che agiscono sul cervello come l’oppio! Il piacere che proviamo, ancora oggi, quando soddisfiamo i nostri bisogni primari (mangiare, bere, fare l’amore..) è dovuto alla produzione di quell’antico premio che la vita ci dà per esserci “comportati bene”. Come l’oppio queste molecole danno anche dipendenza ed una loro eccessiva produzione è la base biochimica di alcuni vizi (la gola, la lussuria ecc...).

Poiché le soluzioni “cattive” causarono l’estinzione degli animali in cui si erano verificate, solo quelle “buone” sono giunte fino a noi. Per questo tutti i comportamenti degli animali odierni sono moralmente “buoni”. Anche il lupo, che uccide una pecora, sta seguendo la propria morale che gli impone di nutrirsi per contribuire al perpetuarsi della vita della propria specie. I suoi comportamenti, pur coinvolgendo il sistema nervoso, sono geneticamente determinati e solo apparentemente sono frutto di atti di volontà. Anche in questa seconda fase dell’evoluzione della morale della vita, quindi, la consapevolezza degli individui è più teorica che reale. Gli individui sono un po’ come dei burattini guidati da circuiti interni che si sono evoluti milioni di anni prima che essi nascessero; circuiti che la vita ha elaborato per perseguire, con la sopravvivenza degli individui, la propria.

### *Una morale per il bene della specie*

Ma venne il momento in cui gli interessi della vita e degli individui non furono più gli stessi. Parlando della evoluzione metafisica abbiamo descritto dei comportamenti, ad esempio gli scontri fra maschi per accaparrarsi le femmine, che non sono finalizzati al bene dell’individuo ma a quello della specie. E’ evidente che per indurre gli individui ad adottare dei comportamenti

che danno loro dolore e a non interromperli quando le sensazioni di dolore divengono concrete, la vita deve aver inventato dei nuovi strumenti. In questa terza fase il perseguimento della morale della vita è stato infatti ottenuto utilizzando degli strumenti metafisici molto sofisticati ed, evidentemente, estremamente convincenti.

*L'egoismo, pardon, l'amor proprio*

Per indurre gli individui ad entrare spontaneamente nell'agone di questa selezione naturale di cui la maggior parte di loro sarà vittima, geneticamente se non fisicamente, la strategia utilizzata è stata quella del "E' contro i tuoi interessi, ma se ti sacrifichi io ti premio!". La tattica prevede l'offerta di mete molto gratificanti per l'individuo. Per attuarla, le mutazioni e la selezione naturale hanno "inventato" dei circuiti nervosi che, da una parte fissano le mete da raggiungere che, guarda caso, sono quelle moralmente giuste per la vita; dall'altra promettono dei premi che verranno dispensati al raggiungimento dell'obiettivo. L'affermazione di sé e l'appagamento sessuale sono le mete che, come specchietti per allodole, istintivamente inducono gli individui a lottare gli uni contro gli altri per raggiungere un elevato stato sociale, anticamera della riproduzione. Ad invogliarli c'è la promessa dei premi: la fuggente felicità della vittoria e il soddisfacimento del desiderio sessuale. Sotto l'influenza di questi istinti gli individui imboccano quello che, per la maggior parte di loro, sarà un doloroso percorso ad ostacoli e si immolano alla specie anziché condurre in pace la propria effimera esistenza.

Dopo aver fornito le mete (il conseguimento dello stato sociale e la riproduzione), la vita ha messo a punto anche gli strumenti che spingono gli individui nella direzione corretta. Ha perfezionato le sensazioni con cui essi si auto-premiano o si auto-puniscono in base ai risultati ottenuti. Le sensazioni di gioia, di appagamento, di soddisfazione vengono auto-somministrate ad ogni vittoria mentre quelle di frustrazione, di delusione, di insoddisfazione accompagnano ogni sconfitta. La vita ha inventato anche altri strumenti, ancora più sofisticati per ulteriormente ridurre l'eventualità che gli individui si sottraggano, egoisticamente, ai loro doveri verso la specie. Oltre alle sensazioni che, dall'interno, spingono ciascun individuo verso la meta corretta, sono comparsi anche sentimenti che lo indirizzano dall'esterno. Sono i sentimenti espressi dagli altri individui che, in base a canoni stabiliti geneticamente, giudicano i comportamenti dei propri simili ed emettono sentenze che si manifestano sotto forma di sentimenti, appunto.

L'apprezzamento, la stima, la considerazione per il vincitore o il biasimo, il disprezzo, la disistima per il vinto sono alcuni dei nuovi persuasori occulti che spingono tutti ad impegnarsi nel raggiungimento dell'obiettivo della specie, ormai divenuto obiettivo di ciascun individuo!

Il risultato "metafisico" complessivo di tutti questi circuiti è descrivibile con due termini: "egoismo" se lo si vuole mettere sotto una cattiva luce; "amor proprio" se invece se ne vogliono mettere in risalto gli aspetti positivi. E' su questo sentimento innato, in cui si fondono l'affermazione di sé, la cura della propria dignità, il desiderio dell'approvazione altrui, l'orgoglio legittimo, che la morale fa leva quando ha bisogno di competizioni fra individui finalizzate alla loro ed alla propria sopravvivenza.

La strategia e la tattica utilizzate per costringere gli individui a soffrire per affermarsi sugli altri membri della specie, assicurando così alla vita la riproduzione dei più adatti, si sono dimostrate molto efficienti. La riproduzione della maggior parte degli animali superiori oggi viventi prevede, infatti, una competizione. Malgrado nessuno dei contendenti sappia che sta combattendo per perpetuare la vita e che i geni che saranno trasferiti, se vince, saranno i suoi, tutti fanno la loro parte. Evidentemente, malgrado essi ignorino quali sono gli obiettivi reali dei propri comportamenti, la pulsione a raggiungere gli obiettivi illusori (soddisfare l'amor proprio con il successo ed il sesso) è tale che nessuno sa resistere. Ciò dimostra l'efficacia del cocktail di strumenti messi a punto nella terza fase dell'evoluzione della morale della vita. D'altra parte, se qualcuno nel passato avesse avuto dei circuiti nervosi tali da non fargli seguire questa pulsione si sarebbe estinto e non sarebbe giunto fino a noi.

Da quanto abbiamo detto risulta che sensazioni e sentimenti, interni ed esterni, che premiano o puniscono i comportamenti, sono al servizio della morale della vita: una morale che non è ancora frutto del pensiero ma che, istintivamente, costringe tutti gli animali a seguire i comportamenti imposti dal proprio patrimonio genetico. Poiché questa morale è ovviamente frutto dei circuiti nervosi che sono stati selezionati come i più adatti per la conservazione della specie, nessuno pensa sia metafisica. Questa morale è, infatti, ben radicata nel comportamento istintivo ed, in nessun modo, è il prodotto di un libero arbitrio!

Nel loro complesso, le mutazioni e la selezione naturale che producono i circuiti nervosi che, a loro volta, producono le mete, i premi e le punizioni (le sensazioni ed i sentimenti interni ed esterni) formano uno strumento straordinario. Poiché "squadra vincente non si cambia", sono

stati molti altri i traguardi morali che la vita ha raggiunti con questi strumenti, convincendo gli individui ad agire contro i propri interessi individuali.

Primo fra tutti le cure parentali. Abbiamo già ampiamente sottolineato come, per favorire la sopravvivenza della prole, gli individui di molte specie sacrificano parte della loro vita, a volte la vita stessa. La cova, la gravidanza, l'allontanare i nemici dal nido, il procurare il cibo ai piccoli sono tutti comportamenti utili per la sopravvivenza della specie ma rischiosi per l'individuo. Farli accettare non deve essere stato facile! Soprattutto perché non si può usare la vecchia strategia del "E' contro i tuoi interessi, ma se ti sacrifichi io ti premio!". Infatti, a differenza di quanto si verifica con i comportamenti "buoni" di cui abbiamo fin qui parlato, il sacrificio dell'individuo non può venire ricompensato da un premio perché il beneficiario è un altro! Mentre combattere per una femmina è gratificante, che gratificazione c'è a combattere per un uovo? Soprattutto se non si sa neppure che è la propria discendenza!

La morale altruistica finalizzata al bene dei propri cari ... Perché la morale potesse evolversi da "egoistica" ad "altruistica", la vita ha dovuto escogitare un nuovo trucco: convincere l'individuo che beneficiare il beneficiario era come beneficiare sé stesso. Questa strategia si poté attuare creando forti legami affettivi fra individui. Come sempre questo si ottenne grazie alle mutazioni che produssero degli individui dotati di nuovi circuiti nervosi che evocavano sentimenti potentissimi. Essi erano paragonabili all'amore che un individuo prova per sé ma venivano indirizzati sugli altri. A questo punto la strategia divenne "E' contro i tuoi interessi, ma se ti sacrifichi per uno a cui vuoi bene come a te stesso io ti premio!". E gli individui si sacrificarono per coloro sui quali avevano esteso il loro amor proprio, chiunque essi fossero. Sacrificarsi per un figlio favoriva la sua sopravvivenza e la trasmissione alle generazioni future dei suoi geni, cioè dei propri geni. Poiché fra i geni paterni trasmessi ai figli c'era quello dell'altruismo, questo comportamento divenne un tratto genetico della popolazione. Al contrario, questo non avvenne se ci si sacrificava per un illustre sconosciuto. In questo caso, infatti, veniva favorita la trasmissione alle generazioni future di geni che probabilmente non inducevano un comportamento altruistico. Per questo motivo la mutazione che faceva provare affetto per i propri figli venne tramandata alle generazioni successive e la specie si arricchì di questa caratteristica "metafisica".

Utilizzando il trucco dei sentimenti, la vita aveva turlupinato, ancora una volta, gli individui inducendoli a ritenere che i propri interessi fossero i loro. C'era riuscita fornendo una nuova meta: “il bene di uno che si ama come sé stesso”. Ma sempre di sacrifici si trattava! Poiché la spontanea propensione al sacrificio è bassissima, la vita dovette migliorare molto il sistema dei premi e delle punizioni adattandolo alla nuova situazione. Divennero molto più forti le sensazioni auto-punitive che gli animali si somministrano quando non fanno quello che devono fare o quando falliscono: il dolore, la disperazione, la prostrazione sono fra queste. Ma il maggior sforzo venne fatto per migliorare i premi. La vita lavorò non tanto su quelli auto-somministrati ma su quelli elargiti da altri. I beneficiari, grazie a circuiti nervosi prodotti *ad hoc*, furono messi in grado di sentire e manifestare sentimenti di affetto e di gratitudine verso il benefattore. Queste manifestazioni non solo premiavano il benefattore ma rafforzavano anche il legame affettivo che provava per il beneficiario.

Quello che ho descritto è il risultato della quarta fase della morale della vita; una morale che pur cominciando a somigliare a quella dell'uomo è ancora ben radicata nel comportamento istintivo. I comportamenti “buoni” che induce sono l'espressione dell'azione coordinata di molti geni ed in nessun modo il prodotto di un libero arbitrio.

... che, opportunamente adattata, poteva essere finalizzata al bene di altri

Questo nuovo tipo di morale “altruistica” si è dimostrata ideale per indirizzare i comportamenti degli individui durante la grande rivoluzione che ha portato alla formazione ed alla evoluzione delle società animali. Ricorderete che esse richiedono la cooperazione tra diversi individui disposti a sacrificare parte della propria vita, e a volte la vita stessa, per assicurare la sopravvivenza del gruppo. L'allargamento dell'affetto ad altri ha permesso di ottenere questo risultato. Mentre gli animali asociali come i gatti, provano affetto solo per i figli, negli animali in cui si forma una famiglia, ad esempio fra i colombi, gli affetti coinvolgono, oltre ai figli, anche il partner. Quando poi nella famiglia convivono cucciolate successive, compare l'affetto fra i fratelli; in animali con una organizzazione sociale più ampia, come molte scimmie, l'affetto si estende anche agli affini (zii, nipoti, cugini ecc); nelle specie con struttura sociale ancora più complessa, come l'uomo, gli affetti si allargano anche agli amici, cioè ad individui estranei con i quali si ha qualche interesse in comune.

Le differenze che si riscontrano nella dimensione e nella organizzazione delle società animali rispecchiano, quindi, la diffusione, l'intensità e la durata dei sentimenti che uniscono gli individui che le costituiscono. Tanto più larga è la cerchia degli individui per i quali si provano sentimenti di affetto tanto maggiore sarà la dimensione del gruppo. Quanto più essi sono geneticamente vicini tanto più si amano e tanto più si è propensi a sacrificarsi per loro. L'altruismo verso di loro nasce e muore quando nascono e muoiono gli affetti.

I sentimenti e tutti gli altri strumenti "metafisici", fin qui inventati dalla vita per attuare la propria morale, costituiscono il collante che permette la costruzione delle società animali: entità biologiche con una indiscussa connotazione genetica, cioè fisica. Per quanto fossero molto sofisticati, questi strumenti dovettero essere perfezionati per risolvere i problemi creati dalla crescente complessità delle società che man mano si stavano evolvendo. La competizione fra specie aveva reso la sopravvivenza di alcune sempre più difficile. A ciò si era ovviato cercando di coinvolgere nel meccanismo del mutuo soccorso un numero sempre maggiore di individui, per un tempo sempre più lungo, in un numero di situazioni sempre maggiore. Ma non era pensabile gestire la diversità e la specializzazione dei nuovi comportamenti con la sola diversificazione e specializzazione dei circuiti nervosi. In realtà quella strada venne battuta e dette come frutto una complessa rete di circuiti che perseguiva l'obiettivo "generale" di indirizzare i comportamenti in base al principio della reciprocità. Per far questo si perfezionarono i circuiti che spingevano il beneficiario a dimostrare affetto e gratitudine verso il benefattore ed a sentire il desiderio di ricambiare. Accanto ad essi si svilupparono circuiti che facevano provare cruccio e rimorso qual'ora si fosse venuti meno agli obblighi o si fosse fatto del male ad un individuo per cui si provava affetto.

Ma questo sistema forniva solo principi generali e non era in grado di risolvere i casi particolari. Inventare nuovi circuiti dedicati a questo scopo avrebbe richiesto troppo tempo, soprattutto avrebbe richiesto un tempo inconciliabile col rischio di estinzione!

I nuovi strumenti che permettono questo adattamento della morale  
La soluzione del problema fu offerta dall'apprendimento che si stava evolvendo contemporaneamente alla socialità. E' stato l'apprendimento il nuovo strumento che la vita ha

utilizzato, nella quinta fase dell'evoluzione della propria morale, per guidare i comportamenti degli individui verso il suo "bene".

Tralasciando il contributo dato dall'apprendimento individuale, che ha permesso di riversare sugli individui giusti i giusti sentimenti, occupiamoci di quello dato dall'apprendimento sociale. I genitori, oltre ad insegnare le tecniche di caccia, cominciarono anche ad organizzare, sulla realtà contingente, la "moralità" dei loro figli, cioè ad insegnare loro i comportamenti che favorivano la sopravvivenza del gruppo. Gli strumenti che avevano a disposizione erano manifestazioni di approvazione o di disapprovazione che incentivavano i comportamenti "buoni" e disincentivavano quelli "cattivi". Sotto questi stimoli i singoli circuiti nervosi preformati, e perciò istintivi, vennero collegati formando complesse reti nervose. L'organizzazione di simili reti non deve essere stata un compito facile poiché richiese l'integrazione dei circuiti sociali "positivi" con i potentissimi atavici circuiti asociali "negativi". Il risultato finale doveva essere in accordo con la "moralità" dei genitori che, in questo modo veniva tramandata. A dire il vero, solo i genitori che organizzavano nei propri figli una rete di circuiti complessivamente sociale favorivano la sopravvivenza della propria progenie e della propria morale. Quelli che davano una "cattiva" educazione favorivano l'estinzione dei propri figli asociali e della loro "a-morale". Avevano, infatti, più probabilità di trasferire alle generazioni successive i loro geni, i genitori che insegnavano ai cuccioli più robusti a dividere il cibo con i fratelli più gracili e ai figli adulti a prendersi cura della nuova cucciolata. Questi comportamenti di mutuo soccorso diminuivano le probabilità di morte degli individui favorendo così la sopravvivenza del gruppo.

Detta in questi termini, l'educazione morale risulta vantaggiosa per gli individui ma, in realtà, il vantaggio risulta dalla media fra individui che si sacrificano ed altri che ne traggono profitto. Come abbiamo detto, senza educazione morale le vittime sarebbero state sicuramente di più e la specie si sarebbe estinta. Ma questa considerazione razionale non poteva certo essere fatta da animali che non erano in grado di ragionare. Per loro ciò che era certo era che dovevano fare dei sacrifici fra cui, ad esempio, cedere parte del loro cibo. E' comprensibile, quindi, che ci fosse una innata tendenza ad opporsi al recepimento dei comportamenti altruistici. Perché gli individui accettassero che qualcuno riorganizzasse i loro circuiti nervosi, apparentemente contro i loro interessi, la vita dovette inventare un altro trucco: inventò l'innato rispetto per il genitore/capo,

l'innata propensione ad emularne i comportamenti e ad accettare gli insegnamenti. Il genitore/capo divenne un modello di comportamento. Poiché, nella stragrande maggioranza dei casi, essere capo significava essere stato capace di organizzare e guidare con successo il proprio gruppo, le mutazioni che generarono istintiva sudditanza nei suoi confronti favorirono la sopravvivenza e furono, perciò, moralmente "buone". Questi antichi istinti sono presenti anche nell'uomo e sono frequentemente osservabili nei bambini e negli adolescenti che emulano i comportamenti di un compagno che riconoscono come capo. A dire il vero, questo istinto permane anche negli adulti e ad esso sono attribuibili fatti altrimenti incomprensibili. Ad esempio, che qualche ragazzotto senza arte né parte divenga un modello da imitare solo perché è apparso in un programma TV. Evidentemente l'ancestrale circuito che associa la fama al valore è tanto potente da far riversare su modesti personaggi televisivi le manifestazioni di stima e di ammirazione che i capi branco si erano guadagnati sul campo, in milioni di anni di evoluzione. Il fatto, poi, che ad alcuni di costoro sia stato addirittura affidato il nostro destino eleggendoli in Parlamento, è la formalizzazione dell'etichetta di "capo" che è stata loro inconsciamente attribuita. Tutto questo dovrebbe, ancora una volta, farci riflettere sui danni che i nostri più antichi circuiti animali stanno facendo in una società che è ben diversa da quella in cui si sono evoluti!

Malgrado la soggezione all'autorità e l'emulazione del capo siano istinti molto forti, col complicarsi dell'organizzazione sociale, essi si dimostrarono insufficienti ad inculcare in tutti i comportamenti morali altruistici. La presenza di individui non disposti ad accettare l'autorità costituita generava contrasti e minava la coesione interna del gruppo. Ciò rischiava di avere gravi conseguenze nella competizione fra gruppi che, nelle specie sociali, stava subentrando alla competizione fra individui. In questa lotta per la vita prevalsero quei gruppi in cui erano comparse mutazioni che avevano permesso di piegare all'interesse comune i più recalcitranti. Una delle carte vincenti fu l'evoluzione di nuovi circuiti nervosi che consentono di insegnare e di apprendere l'obbedienza.

L'obbedienza

Ma cos'è l'obbedienza? E' "fare una cosa contro la propria volontà", cioè sottomettere la propria volontà a quella di altri. Espressa in questi termini l'obbedienza appare chiaramente per

quello che è: un eccezionale strumento che consente di limitare le volontà dei subalterni accentrando il potere decisionale su un unico individuo che diviene la testa pensante del gruppo. Se ciò che l'evoluzione stava perseguendo era trasformare un organismo multi-individuale, in cui tutti sono equivalenti, in uno pluri-individuale, in cui la diversificazione dei ruoli prevede che un solo individuo eserciti il potere decisionale, beh con l'invenzione dell'obbedienza aveva fatto un bel passo avanti! Il super-individuo che avesse avuto fra i propri geni quello dell'obbedienza avrebbe potuto contare, per la sua organizzazione interna, non solo sul rispetto dell'autorità ma anche sulla sottomissione ad essa. E tutto questo avrebbe di molto incrementato le possibilità di sopravvivenza del gruppo. L'obbedienza fu, quindi una nuova eccezionale invenzione al servizio della morale della vita. Ancora una volta e sempre più a scapito dell'individuo.

Per capire come si è evoluta l'obbedienza bisogna avere le idee più chiare su cosa essa sia e su come la si possa ottenere. Malgrado la definizione sia molto chiara, normalmente si confonde l'obbedire con l'imparare ed il motivo di questo equivoco è che anche l'obbedienza si impara. Ma mentre le normali forme di insegnamento portano all'apprendimento di qualcosa di vantaggioso per l'individuo (camminare, nuotare ecc..), l'insegnamento dell'obbedienza ha uno scopo negativo: limitarne la libertà. L'enorme differenza negli obiettivi fa sì che gli strumenti impiegati da queste due forme di insegnamento, non possano essere gli stessi. E' abbastanza intuitivo che la ricetta classica di un po' di incoraggiamento e qualche premio non può compensare ed indennizzare la violenza che si fa ad un individuo quando gli si impone l'obbedienza. Fortunatamente, in alcune situazioni il vantaggio secondario che l'individuo ha quando esegue gli ordini è tanto evidente da divenire esso stesso un incentivo. Ma la relazione fra obbedienza e vantaggio personale è spesso così mediata da far perdere il nesso fra le due cose. Nella maggior parte dei casi, poi, il nesso non c'è proprio ed il vantaggio è solo della collettività. Per ottenere obbedienza cieca in ogni situazione la vita dovette perciò escogitare un nuovo modo di insegnarla ed imporla.

Un primo passo verso il risultato si ebbe con la comparsa di qualche variante nei vecchi circuiti nervosi che gestiscono i rapporti di dominanza fra individui. Le nuove mutazioni scatenarono nei capi dei comportamenti aggressivi non solo verso chi cercava di insidiare la loro posizione ma anche verso chi contrastava il loro volere. Si ottenne così non solo la sottomissione alla

persona ma anche la sottomissione alla sua volontà. Nell'evoluzione di questa nuova strategia furono particolarmente favoriti i gruppi il cui capo era, geneticamente, un vessatore ed un violento e non perdeva occasione per sopraffare gli altri al punto da inventare situazioni appositamente mirate a questo fine. Una di queste è stabilire e far rispettare dei tabù, cioè dei divieti che vengono imposti dal capo e che spesso sono assurdi e non giustificati da qualche motivazione razionale.

Se si ha chiaro questo significato evoluzionistico dei tabù, risulta comprensibile la sproporzione che spesso si osserva fra la gravità delle punizioni inflitte ai trasgressori e l'oggettiva gravità del reato. Infatti con l'accettazione dei tabù non c'è in ballo solo il banale rispetto di una regola ma la fondamentale sottomissione della volontà dell'individuo a quella del capo, cioè a quella del gruppo. L'uso dei tabù, come modo di insegnare l'obbedienza, non è propria solo dell'uomo; è già evidente nelle società dei lupi/cani dove il maschio capo dichiara tabù, ad esempio, un vecchio osso e controlla rigorosamente che il suo tabù sia rispettato. Ogni tentativo da parte dei cuccioli di appropriarsene viene severamente punito ed in questo modo il maschio impone sia la propria autorità che la propria "legge".

Con l'invenzione dei tabù (regole, leggi ..) si è escogitato il sistema per insegnare l'obbedienza: si usa l'insegnamento di qualcosa come strumento per insegnare l'obbedienza e non più l'insegnamento dell'obbedienza come strumento per insegnare qualcosa. Anziché essere un mezzo, l'obbedienza è diventata uno dei fini dell'apprendimento.

Come abbiamo detto l'insegnamento dell'obbedienza non deve essere confuso con le altre forme di insegnamento. Sono molti gli animali a cui si può insegnare qualcosa ma pochi quelli che obbediscono! Fra gli animali domestici solo il cane è in grado di farlo, poiché appartiene ad una specie che è geneticamente dotata dei circuiti che ne permettono l'apprendimento. Per questo gli si può insegnare a non salire sul divano: possiede, infatti, i circuiti nervosi che gli fanno recepire il divano come tabù, il padrone come capo e le sgridate come mezzi costrittivi che impongono il tabù.

Una delle caratteristiche dell'insegnamento dell'obbedienza è l'uso di strumenti repressivi per ottenerla. Il motivo è da ricercare nella sua origine, in quel comportamento aggressivo del capo che se da una parte è affermazione della propria dominanza dall'altra è punizione per chi la

insidia! Il risultato è che si obbedisce non tanto perché ci si aspetta una ricompensa ma soprattutto perché si vuole evitare un castigo.

Qualunque sia il meccanismo che l'ha prodotta, l'obbedienza è uno strumento che violenta gli individui e li costringe ad assumere dei comportamenti che non condividono. La natura moralmente "buona" o "cattiva" di comportamenti imposti dal capo ed appresi dai subalterni dipende dalle loro capacità di influenzare il destino del gruppo: sono "buoni" se ne favoriscono la sopravvivenza, "cattivi" se la mettono a repentaglio. Il fine ultimo della morale della vita è rimasto, perciò, sempre lo stesso; ha solo acquisito uno ulteriore strumento per far compiere agli individui le azioni moralmente "buone" .... per la comunità!

### *La morale della vita e la morale dell'uomo*

A questo punto della nostra trattazione siamo pronti a confrontare gli obiettivi della morale della vita con quelli della morale dell'uomo. Abbiamo visto come il fine della morale della vita sia la sopravvivenza della vita stessa e come essa venga perseguita con strumenti che favoriscono:

1. la sopravvivenza dell'individuo,
2. la selezione del più adatto,
3. la riproduzione,
4. le cure parentali,
5. la formazione ed il mantenimento del gruppo familiare,
6. la coesione e la sopravvivenza del gruppo animale.

Cosa dice al riguardo la morale dell'uomo?

L'obiettivo della sopravvivenza dell'individuo è ampiamente recepito dai due importanti principi della legittima difesa e del divieto di suicidio. Anche molti precetti alimentari ed igienici (fra cui il riposo settimanale) sono finalizzati a questo; come del resto le indicazioni che definiscono "peccati" certi comportamenti eccessivi e nocivi alla salute.

L'obiettivo della sopravvivenza del più adatto è anch'esso ben radicato. La stima che si tributa a coloro che hanno raggiunto una elevata posizione sociale ed il disprezzo che si riserva ai "falliti", sono testimoni di come la società umana sia pervasa dall'etica del successo. Il raggiungimento di un più elevato stato sociale, a ben pensarci, è alla base della maggior parte degli insegnamenti che si impartiscono ai figli.

La riproduzione come strumento per la sopravvivenza della specie è talmente condiviso da essere la causa, non solo dei giudizi poco lusinghieri sulle zitelle, ma anche del ripudio della moglie sterile e della dottrina secondo cui l'unico scopo del matrimonio è la procreazione (non lo fò per piacer mio ma per dare figli a Dio!). L'accanimento contro l'omosessualità e "gli atti impuri" può essere visto come l'altra faccia della finalizzazione della sessualità alla riproduzione.

Non credo, poi, siano necessarie molte parole per convincervi che anche per l'uomo le cure parentali sono uno strumento per assicurare la conservazione della propria "stirpe". In quest'ottica devono essere inquadrati i diversi comportamenti morali da tenere verso i figli nati sani o deformati (i Romani li sopprimevano buttandoli dalla rupe Tarpea), propri o bastardi (il frutto del tradimento della moglie, per definizione, non è figlio), legittimi o illegittimi (il frutto del tradimento del marito è solo un po' figlio..), primogeniti o cadetti (servi del primogenito o invitati ad andarsene) ecc....

La formazione ed il mantenimento di un gruppo familiare sono importanti obiettivi della morale dell'uomo. Lo testimoniano la formula di reciproco rispetto e soccorso che gli sposi si scambiano all'atto del matrimonio e i comandamenti che impongono ai figli di "onorare il padre e la madre". Per non parlare della pletora delle altre più quotidiane indicazioni morali che da esse conseguono: l'amoralità del tradimento, dell'abbandono del coniuge, dei figli, dei genitori ecc...

Le mille regole morali che guidano i nostri comportamenti sociali sono, poi, perfettamente coerenti con i principi che mirano alla coesione e la sopravvivenza del gruppo animale. I ben noti "non rubare, non ammazzare, non desiderare la donna e la roba d'altri" che altro sono se non regole indirizzate ad assicurarne la stabilità? E l'esaltazione dell'eroismo ed il biasimo del tradimento e della codardia non sono forse indicatori di una morale che si prefigge, come fine, la sopravvivenza del gruppo e, come mezzo, il sacrificio anche della vita? E le ovvie contraddizioni di una morale che ci impone di non uccidere il compagno ma di uccidere il nemico non sono forse perfettamente logiche, se inquadrate in questa ottica?

Ma se gli obiettivi della morale dell'uomo e della vita sono gli stessi, quale è l'elemento qualificante della morale dell'uomo che la fa ritenere diversa da quella degli altri animali?

I più ritengono che la differenza risieda nel libero arbitrio, cioè nella facoltà della volontà umana di decidere che azione compiere senza che essa sia imposta dall'esterno, in altri termini, della libertà di compiere coscientemente atti buoni o cattivi. In realtà non siamo gli unici a possedere il libero arbitrio; anche il cane si trova ad esercitarlo quando, in assenza del capo, dibatte fra sé e sé se salire o no sul divano! Anche lui subisce gli assalti del diavolo che gli suggerisce il comportamento "amorale" ma consono ai suoi interessi, e le prediche dell'angelo custode che gli ricorda il comportamento "morale", imposto dal capo. Ed ecco rivelato il trucco inventato dalla vita per produrre il libero arbitrio. Non è necessaria la presenza del capo (stimolo esterno) per influenzare la volontà del cane, poiché durante l'apprendimento si sono allacciati dei circuiti nervosi che, dall'interno, lo surrogano. Per ulteriormente indirizzare il comportamento nella direzione "morale" entrano in azione anche dei circuiti nervosi che inducono, nel cane, il senso di colpa nel caso scegliesse il comportamento "amorale". Quindi, l'arbitrio, sia nostro che del cane, è solo apparentemente libero; in realtà è fortemente condizionato da una volontà estranea che si è insinuata nei circuiti nervosi dell'individuo.

Per distinguerci dal cane si potrebbe obiettare che il nostro "libero arbitrio" è cosciente, che cioè noi capiamo la differenza fra il bene ed il male e siamo coscienti della nostra scelta. Ma le orecchie basse e l' "aria da cane bastonato" che mostra il cane, prima ancora che scopriamo ciò che ha fatto, la dicono lunga sulla sua consapevolezza di aver fatto una cosa proibita.

Se non è la differenza negli obiettivi né il libero arbitrio, cosa distingue la morale degli uomini da quella degli animali più evoluti? La risposta potrebbe essere la diversità degli strumenti impiegati per seguirla o meglio il contributo che i diversi strumenti danno al risultato finale. Negli animali la sopravvivenza della vita è principalmente perseguita utilizzando gli strumenti interni, cioè gli istinti ed i sentimenti, mentre nell'uomo il compito è affidato soprattutto a strumenti esterni, cioè l'apprendimento e l'obbedienza.

Questa differenza è dovuta alla peculiarità dell'uomo. Nel corso della evoluzione di questo animale poco specializzato, la possibilità di sopravvivere fu favorita dall'allargamento delle dimensioni del gruppo che si trovò a comprendere parenti sempre più lontani: si formò così il complesso ed articolato clan familiare. La sopravvivenza fu ulteriormente agevolata dall'allargamento del gruppo ad individui non geneticamente connessi ma coi quali si avevano interessi comuni. La necessità di tenere insieme un gruppo sempre più vasto cominciò a cozzare

con l'affievolirsi dei mezzi classici di coesione, cioè i sentimenti e gli istinti sociali. Purtroppo, come abbiamo visto, l'intensità dei sentimenti di affetto, che determina la propensione a sacrificarsi per gli altri, si affievolisce al diminuire dei contatti fra gli individui. Per sopperire all'incapacità dei vecchi strumenti di indirizzare i comportamenti morali su tutti i membri del gruppo, vicini o lontani, la vita si affidò sempre più ai nuovi strumenti. Se i comportamenti morali non erano più istintivi sarebbero stati appresi, se non erano più spontanei sarebbero stati imposti. Tanto più il gruppo si allargava e diveniva complesso tanto più l'apprendimento della morale e l'obbedienza divenivano fondamentali per la sua sopravvivenza. Nella lotta per la vita si avvantaggiarono, perciò, i gruppi che avevano meglio sviluppati i circuiti nervosi che permettevano l'insegnamento della morale. Più il gruppo si ingrandiva più richiedeva l'insegnamento della morale; tanto più efficace era l'insegnamento della morale tanto più il gruppo si poteva ingrandire.

Questo è il ciclo virtuoso che reso la morale dell'uomo apparentemente tanto diversa da quella degli altri animali. In realtà non lo è: ciò che l'uomo insegna ed impone con l'obbedienza ha lo stesso fine e le stesse regole. Solo lo strumento che utilizza è evolutivamente più complesso!

### ***La nostra morale***

Qualcuno, mentre descrivevo i dettami della morale dell'uomo non si sarà riconosciuto in essi. E' vero! Il ripudio della moglie, la rupe Tarpea, l'esposizione dei neonati illegittimi non sono parte della nostra morale ed infatti mi sono guardata bene dal usare come sinonimi i termini "morale dell'uomo" e "nostra morale". La morale di cui ho parlato fino ad ora è quella animale; quella, per intenderci, dei miseri pastori descritti nella Bibbia che lottavano, come animali, per la sopravvivenza della loro piccola tribù.

La nostra morale non è un ulteriore e tardivo frutto dell'evoluzione genetica ma uno dei prodotti dell'evoluzione culturale dell'uomo. Le nuove acquisizioni, a cominciare dall'agricoltura, hanno sempre più svincolato l'uomo dalla necessità quotidiana di combattere per la vita. L'abbondanza ha diminuito la necessità della selezione naturale e favorito la tolleranza. Grandi pensatori (Confucio, Budda, Epicuro, Cristo) hanno individuato la fonte del dolore umano (l'affermazione di sé a scapito degli altri) e propugnato il rispetto del prossimo. La rivoluzione agricola ed industriale del settecento ha reso disponibili ulteriori risorse lasciando intravedere il

possibile benessere per tutti. L'illuminismo e la rivoluzione francese hanno razionalizzato e diffuso la nuova morale sancita, infine, dalla Dichiarazione Universale dei Diritti dell'Uomo.

Sì la nostra morale non è più quella della vita: non è basata sul principio che l'individuo è uno strumento al suo servizio. La nostra morale si prefigge come obiettivo il diritto di ogni individuo a vivere una vita degna di questo nome, ponendo la vita al servizio dell'uomo. Quale sarà la morale del futuro, dei nostri figli? Saranno le nostre scelte a determinare se vincerà la morale della miseria o quella del benessere.

### ***E Dio? E la religione?***

Nelle pagine precedenti abbiamo visto come le sensazioni, i sentimenti e la stessa morale che, per migliaia di anni l'uomo ha ritenuto metafisiche, siano, in realtà, molto fisiche. Sono, infatti, prodotte da circuiti nervosi che si formano grazie all'azione combinata di geni che stendono i fili e di stimoli interni od esterni che determinano le loro connessioni. A questo punto immagino che a voi, come a me, sorga spontanea la domanda: "E Dio? Dio, la massima espressione della metafisica è veramente metafisico oppure no? Non sarà, per caso, anche lui il prodotto di qualche circuito nervoso?"

E' evidente che su questo argomento, cioè sulla esistenza di Dio, si sono versati fiumi di inchiostro e che le considerazioni che può fare un biologo sono quelle che può fare un fanciullo fra i dottori. D'altra parte, nel contesto di un libro come questo, non ci si può esimere dal tentativo di dare una risposta anche a questo quesito.

Vediamo se è possibile, utilizzando le conoscenze della paleontologia, dell'antropologia e della storia, immaginare l'ipotetico percorso evolutivo che avrebbe portato alla costruzione, nell'uomo, di circuiti nervosi in grado di produrre "la fede in un essere soprannaturale". Cominceremo col cercare di individuare cosa potrebbe aver fatto sorgere, nella mente dell'animale/uomo, l'idea che esistesse una realtà immateriale/soprannaturale/metafisica oltre a quella materiale/naturale/fisica di cui era parte.

### ***L'origine dello spiritualismo***

L'indizio che può aiutarci a trovare questo punto di partenza è l'universale diffusione, fra gli uomini, della superstizione, cioè dall'innata tendenza ad attribuire a cause occulte o soprannaturali gli avvenimenti che possono essere spiegati con cause naturali. Questa

propensione è comune a tutti gli uomini e ciò fa ritenere che essa si sia sviluppata antichissimamente, ben prima che gli antenati dell'*Homo sapiens* si diffondessero su tutta la terra e si differenziassero in razze. Deve essere comparsa milioni di anni fa, contemporaneamente e come conseguenza delle tante altre doti cerebrali che caratterizzano l'uomo. E' ragionevole pensare che abbia avuto origine quando il cervello divenne abbastanza sviluppato da far sì che l'uomo si ponesse dei problemi e riflettesse sulle cose che accadevano intorno e dentro di lui. I primi semplici circuiti dell'intelligenza gli permisero di cominciare ad elaborare le informazioni provenienti dalla realtà ed ad estrarre da esse concetti logici astratti come quello di maggiore e minore, di somiglianza, di causa ed effetto. Questi circuiti gli permisero di capire, ad esempio, che il fulmine poteva essere la causa di un incendio o che la morte di un compagno poteva essere causata da una malattia. Non sempre, però, essi riuscivano a dare una risposta alle domande che l'uomo si veniva ponendo, ad esempio a "Cosa causa il fulmine e le malattie?" L'incapacità dei circuiti nervosi di attribuire una causa a tutti i fenomeni fisici fu, probabilmente, una condizione necessaria ma non sufficiente ad indurre negli uomini l'idea della metafisica. L'arrovellarsi intorno a qualche altro problema deve aver dato un fattivo contributo.

"Cosa succede quando si dorme o quando si ingeriscono certe piante (allucinogeni)? Dove è il mondo, copia deformata ed inquietante di quello in cui viviamo e di cui abbiamo fuggevoli visioni quando dormiamo?" Questi quesiti chiaramente erano sollecitati dal fatto che l'uomo sogna, come del resto tanti altri animali. Ma i nostri antenati si trovavano, evolutivamente parlando, in una situazione piuttosto particolare, intermedia fra gli animali e l'uomo moderno. A differenza degli altri animali, stavano cominciando a prendere coscienza di alcuni aspetti della propria attività cerebrale, fra cui il sogno, ma a differenza di noi, non avevano ancora capito che la realtà che appare nel sogno non è reale. Per questi motivi, l'unica risposta razionale che potevano dare a questa domanda era che doveva esistere un altro mondo, reale ma irraggiungibile, nel quale si trovavano copie di tutto ciò che esisteva nel loro mondo. Alla definizione di questo mondo soprannaturale contribuirono altre riflessioni provocate dal fatto che, nel mondo parallelo, comparivano saltuariamente anche le copie dei defunti. Ma allora "La vita proseguiva oltre la morte? Che cosa abbandonava il corpo morto e si trasferiva nell'altro mondo? Il respiro, ossia lo spirito? "

Fu quindi la comparsa, nel cervello dei nostri antenati, dei nuovi circuiti nervosi dell'intelligenza che produsse, come effetto collaterale, questi pensieri. E, ironia della sorte, probabilmente fu proprio lo strumento mentale che si stava evolvendo per capire l'ambiente fisico, che "razionalmente" formulò le risposte che originarono le istintive credenze metafisiche dell'uomo. Infatti, per spiegare questi fatti, non si poteva che ipotizzare che tutto ciò che esisteva (animale, vegetale, minerale, terrestre, celeste) fosse costituito da due componenti, una fisico/materiale/naturale ed una metafisica/immateriale/soprannaturale e che la componente soprannaturale influenzasse quella naturale.

### *A che pro?*

Ma abbiamo imparato nelle pagine precedenti che solo i circuiti nervosi che danno un vantaggio si fissano geneticamente e si diffondono nelle generazioni successive. Che vantaggio quotidiano avevano gli individui che possedevano i circuiti nervosi che permettevano di articolare questi pensieri? Che vantaggio aveva chi credeva che la vita continuasse in un aldilà e che questo aldilà metafisico fosse popolato da spiriti?

Per rispondere a questa domanda dobbiamo ripercorrere, brevemente, le prime fasi dell'evoluzione dell'uomo. Come abbiamo visto, a causa delle loro scarse doti fisiche, il percorso evolutivo che aveva permesso ai nostri antenati di sopravvivere era stato quello della socialità. Probabilmente il primo nucleo sociale era simile a quello dei lupi ed era gestito da una morale in cui convivevano l'egoismo controllato e l'altruismo in parte istintivo, in parte imposto. Ma quella struttura organizzativa non poteva certo essere ottimale per un animale fisicamente molto più debole del lupo. Per sopravvivere i gruppi degli antenati dell'uomo dovettero ampliarsi oltre il limite della famiglia. Ciò comportò grossissimi problemi nella gestione della morale della vita. Infatti, come abbiamo visto, nella nuova società allargata gli istintivi sentimenti e comportamenti morali si affievolivano e l'altruismo doveva essere sempre più imposto con mezzi coercitivi. Le tensioni interne rischiavano di mettere a repentaglio la vita del gruppo e la sua ulteriore possibilità di espandersi. Il destino dell'uomo probabilmente sarebbe stato segnato se non fossero stati favorevolmente selezionati i circuiti nervosi responsabili dello strumento istintivo generale a cui abbiamo accennato parlando della morale: la reciprocità. Questo istinto può essere riassunto dal famoso detto "occhio per occhio, dente per

dente” applicato, però, nel bene oltre che nel male. In termini pratici “Io ti faccio un dono e mi aspetto che tu ne faccia uno a me. Se ciò non avviene tu non sarai più mio amico e non avrai più i vantaggi che la mia amicizia comporta”. Gli scambi non valevano solo per oggetti materiali ma anche per i comportamenti: “Io ti faccio un dono e mi aspetto che tu mi aiuterai quando ne avrò bisogno“. La possibilità della verifica a breve termine dei vantaggi che l’altruismo poteva dare, favorì la coesione sociale dei gruppi in cui questo istinto era comparso. Con la coesione venne favorita anche la sopravvivenza del gruppo e la diffusione, nell’ambito della specie, dei geni che ne erano responsabili..

Ma cosa ha tutto questo a che fare con il problema che ci siamo posti? Razionalmente convinti che i morti continuavano ad esistere, anche se in un altro mondo, i nostri antenati devono aver pensato che probabilmente si poteva continuare ad interagire con loro. Ad esempio si potevano chiedere loro dei favori, come un aiuto durante la caccia! Vista quale era la mortalità a quei tempi, i cacciatori dovevano essere spesso giovani, inesperti e sempre bisognosi di essere assistiti e guidati da chi ne sapeva di più, ma spesso chi ne sapeva di più era già morto. Anche l’intuizione che tutto ciò che esisteva aveva “alle spalle” uno spirito, deve aver aperto nuovi orizzonti a quei poveri diavoli che vivevano una misera esistenza in un mondo ostile popolato da feroci predatori, da prede che non si lasciavano catturare, da fenomeni naturali che potevano ad ogni momento annientarli (vulcani, fulmini, inondazioni, siccità, tempeste, malattie e chi più ne ha più ne metta). C’era la probabilità che con questi spiriti, come con gli spiriti dei morti, si potessero intrattenere rapporti, farseli amici, chiedere loro dei favori. A ben pensarci, il fatto che gli spiriti potessero aiutare o meno gli uomini, significava che da loro dipendeva l’esito delle azioni che gli uomini stavano per intraprendere. Questo equivale a dire che gli spiriti controllavano, e quindi sapevano, cosa sarebbe successo nel futuro. Perciò, l’offerta di doni poteva essere utilizzata anche come prezzo per indurre gli spiriti a rivelare cosa riservasse l’avvenire.

La consapevolezza di avere al proprio fianco gli spiriti dei defunti e di aver “data una bustarella” agli spiriti avversi doveva sicuramente dare ai nostri antenati un enorme aiuto psicologico ed aumentare la probabilità di successo, ad esempio, nella caccia. Ma erano tante le situazioni in cui la “familiarità” con i potenti spiriti poteva essere vantaggiosa: ad avere figli, a guarire un parente, a vendicare uno sgarbo .. in pratica in ogni situazione in cui un essere umano ha

bisogno di aiuto! L'idea che gli spiriti o comunque altre entità metafisiche non meglio definite possano influenzare la realtà in cui viviamo è talmente radicata nei nostri circuiti nervosi che ancora oggi la maggior parte delle persone si rivolge a loro per avere aiuto. Forse non ci si rivolge più a qualche entità soprannaturale per far piovere, o per fermare la lava del vulcano, o per proteggere le greggi, o per avere un buon raccolto .... ma lo si fa ancora per guarire da qualche malattia, per fare qualche buon affare, per essere promossi a scuola, ecc... E non sono pochi (sembra circa 10.000.000 solo in Italia) quelli che lo fanno per conquistare l'amore di qualcuno, per fare una "fattura" su un nemico, per allontanare "il malocchio" ecc....

Anche il vantaggio offerto dalla credenza che gli spiriti possano rivelare il futuro è evidente: affrontare uno scontro, sapendo che se ne uscirà vincitori, influisce positivamente sul morale e, di riflesso, sull'esito dell'evento. Anche l'idea che gli spiriti, o comunque altre entità metafisiche non meglio definite, siano depositarie della conoscenza del futuro è talmente radicata in noi che ancora oggi vediamo un numero sorprendentemente alto di persone interrogarli. Altro non fanno coloro che chiedono i numeri del lotto ai defunti o che ogni mattina cercano di sapere cosa capiterà loro leggendo l'oroscopo o che si rivolgono ai maghi per farsi leggere le carte.

Queste credenze spiritualistiche, con un gigantesco effetto placebo, favorirono il benessere del gruppo, la sopravvivenza dei suoi figli ed il trasferimento alle generazioni future dei geni che organizzano i circuiti nervosi responsabili della loro insorgenza. Allo stesso modo con cui, in passato, il cervello si era arricchito delle sensazioni e dei sentimenti, così si arricchì della fede cioè della credenza nella potenza di autorità soprannaturali.

### *La ritualità*

I patti con gli spiriti richiedevano la celebrazione di riti durante i quali venivano presentati i propri doni e le proprie offerte. La ritualità, cioè il tentativo di ottenere il controllo del naturale attraverso il soprannaturale mediante tecniche mirate a ingraziarsi le forze spirituali, fece così la sua comparsa nel comportamento umano. Ma, come abbiamo visto in altre occasioni, i nuovi circuiti nervosi devono sempre fare i conti con i vecchi e potentissimi circuiti, in particolare con quelli dell'egoismo e del vantaggio personale. L'istintiva propensione a volgere a proprio favore ogni situazione, ha influito anche sui riti, nei quali il valore delle offerte andò progressivamente

diminuendo, fino ad arrivare ad una vergognosa sproporzione fra dono e grazia richiesta. Progressivamente il valore materiale del sacrificio divenne sempre più simbolico e lo scambio sempre più conveniente (la salute in cambio di un cero!). Per compensare il valore sempre più modesto del bene offerto, si instaurò l'uso di donare agli spiriti anche una azione che costava "sacrificio" (ecco spigata l'origine di questo termine). L'espedito ebbe un grande successo tanto che l'azione è andata sempre più sostituendosi all'offerta materiale. Il culmine di questo percorso "al risparmio" è stato l'identificazione dell'offerta con il rito: l'azione offerta divenne il rito e il rito divenne l'azione offerta. Ricordo che quando ero bambina, nell'andare a scuola, prestavo grande attenzione a non pestare le connessioni fra una pietra e l'altra del selciato. Ero convinta che, se avessi compiuto bene questo "rito" non sarei stata interrogata. Non so con chi cercassi di instaurare questo patto, e neanche come mi fosse venuto in mente. Di certo non me lo aveva suggerito nessuno. Eppure, quando ero impreparata e la minaccia dell'interrogazione diveniva incombente, il mio cervello attivava i circuiti del rito allo stesso modo in cui, in situazioni di pericolo, avrebbe attivato i circuiti della fuga! Evidentemente durante i milioni di anni di evoluzione del cervello dell'uomo, è stata acquisita, insieme alle tante altre funzioni che lo caratterizzano e che ne hanno determinato il successo evolutivo, anche l'istintiva propensione allo spiritualismo e alla ritualità. Il circolo virtuoso per cui i circuiti nervosi dello spiritualismo e della ritualità favorivano la sopravvivenza e la sopravvivenza favoriva il fissarsi dei circuiti nervosi dello spiritualismo e della ritualità, in qualche milione di anni ha prodotto uomini che istintivamente chiedono aiuto all'aldilà e lo fanno celebrando un rito.

Prima di proseguire nell'ipotizzare la possibile evoluzione dell'idea di Dio, è necessario mettere in evidenza, se mai vi fosse sfuggito, come l'antichissimo spiritualismo di cui abbiamo parlato sia eminentemente animale ed utilitaristico: l'uomo utilizza gli spiriti come strumenti per ottenere cose concrete. In questa ottica non sorprende che i circuiti nervosi che lo sostengono si siano geneticamente fissati nel cervello.

Su questa innata propensione allo spiritualismo si può ipotizzare che affondino le radici le diverse religioni (intese come complesso di credenze e di riti che collegano la vita dell'uomo ad un ordine superiore) che si sono venute man mano evolvendo e diversificando durante l'evoluzione culturale della nostra specie. I diversi gruppi umani, a seconda del loro livello culturale e dei problemi che incontravano nel loro ambiente, modificarono le loro credenze

organizzandole in una religione in grado di soddisfare le proprie esigenze. Ad esempio, tanto più i popoli sono primitivi tanto più ritengono che il soprannaturale sia in tutte le cose; man mano che aumenta la loro conoscenza del mondo, molta parte della realtà diviene solamente fisica e la doppia caratteristica naturale/soprannaturale viene riservata alle cose che più incidono sulla loro vita (la terra, il sole, il cielo, i fiumi, l'amore, la morte, la guerra, il mare, i venti). Negli uomini che vivono ai tropici, dove la natura è generosa e rigogliosa, gli dei sono migliaia (e quindi tutti poco potenti) o la divinità non è necessaria per cui lo spiritualismo si attenua e l'uomo sviluppa l'ateismo. Nei luoghi in cui la vita è dura e solo il più forte vince, anche fra gli dei c'è selezione e man mano si instaurano gerarchie che evolvono nel monoteismo.

### *La spiritualità*

Una delle caratteristiche delle religioni è il tentativo di trasformare lo spiritualismo in spiritualità, cioè nella inclinazione dell'individuo e della collettività ad avere sentimenti morali ed elevati.

Il ricordo della mia infanzia fa intuire il possibile modo con cui, nello spiritualismo ha fatto irruzione la morale. In realtà essa vi si era insinuata fin dall'inizio. Infatti lo spiritualismo, il tentativo di risposta razionale al montare delle domande che affollavano la mente dei primi uomini, si era ben presto dimostrato uno strumento utile per la sopravvivenza. E come tale poteva già essere considerato uno strumento della morale della vita. Ma in molte religioni la morale della vita trova il modo di entrare, anziché dalla finestra, dalla porta principale. Dall'offrire una "azione formalmente buona", cioè eseguita bene, all'offrire una "azione moralmente buona" il passo è indubbiamente breve. A qualche uomo furbo venne probabilmente l'idea che per avere l'appoggio degli spiriti non era necessario sacrificarsi facendo esercizi di equilibrismo o andando in ginocchio in cima ad un monte; come sacrificio poteva essere sufficiente seguire le regole morali del gruppo. Con l'instaurarsi di questa connessione fra i circuiti della spiritualità e quelli della morale, la vita aveva trovato un nuovo e fantastico strumento per far finalmente inghiottire agli individui l'amara pillola dell'altruismo. Il miraggio dello sconfinato mondo di premi che gli spiriti erano in grado di concedere funzionò come lo "zucchero" con cui "la pillola va giù". E la speranza della ricompensa per gli atti compiuti in accordo con la morale della vita divenne il nuovo miraggio in grado di spingere gli

individui ad agire contro i propri interessi immediati. Non vi è dubbio che questo strumento fosse destinato ad essere molto più efficiente della coercizione, imposta con l'obbedienza, o dell'egoistico vantaggio offerto dalla reciprocità.

E' anche evidente che il trucco che aveva permesso di contrabbandare "il comportarsi bene" come un sacrificio per ingraziarsi gli spiriti, favorì la coesione e quindi la sopravvivenza del gruppo in cui questa idea era nata. Ma se si accetta l'idea che uno spirito ti premi se ti comporti bene, si deve necessariamente accettare anche l'idea che egli ti punisca se ti comporti male. Purtroppo questo attribuisce allo spirito un potere di controllo permanente che si esercita anche in tutti quei momenti nei quali non si ha bisogno di aiuto. Da entità alla quale rivolgersi (con vantaggio) nel momento del bisogno, lo spirito diventa così un "Dio" che controlla in permanenza il comportamento morale. Da prodigo elargitore di favori, lo spirito si trasforma in padrone della esistenza: come l'usuraio a cui ci si è rivolti nel momento del bisogno che diventa in breve proprietario di tutto ciò che si possiede. E' evidente che i rapporti con un simile "Dio" sono assai diversi da quelli che si intrattengono con uno spirito al quale ci si rivolge occasionalmente. Se egli ti controlla sempre, sempre si dovrà restare nella sua "grazia". Occorre, perciò, dar luogo ad un cerimoniale nuovo, complesso, soprattutto ricorrente, che deve essere eseguito da uno "specialista": il sacerdote. La funzione sacerdotale di intermediario fra gli uomini e lo spirito era sicuramente comparsa sin dai primordi dello spiritualismo ma la nuova funzione dette un enorme potere a questo interlocutore privilegiato di Dio. Infatti mentre in precedenza, le regole e l'osservanza della morale erano imposte dal capo gruppo, ora esse erano prescritte e fatte rispettare da Dio, cioè dai sacerdoti. In molte società ciò elevò il sacerdote a capo supremo; nelle società in cui sopravvisse un potere laico, al sommo sacerdote vennero comunque attribuiti poteri enormi, non escluso quello di nominare lo stesso capo "secolare".

Il sacerdote, che rappresenta gli uomini presso Dio, era il personaggio specialmente abilitato a chiedere le grazie. Ma quali erano le grazie che si dovevano richiedere? La vita era dura e ingiusta e le necessità degli uomini erano infinite. Avrebbe potuto Dio esaudire tutte le richieste che gli venivano avanzate? L'esperienza quotidiana insegna che, anche perseverando nell'osservanza scrupolosa della morale, le grazie attese non arrivano ed i bisogni soddisfatti sono pochi. Divenne difficile per ogni individuo continuare a sacrificarsi in mancanza di contropartite concrete. Il modo più efficace per far fronte a queste attese insoddisfatte fu quello

di promettere il pagamento del premio, se non in questo mondo, almeno nell'altro che si sarebbe raggiunto dopo la morte. Si sostituì, così, l'attesa della grazia in questa vita con la speranza del paradiso. Si contò su Dio per ottenere quella giustizia che in questa vita non si può avere. In altri termini si accettò di ricevere il premio meritato, non in questa vita ma in quella spirituale che sarebbe venuta. Un uomo che sia convinto di tutto ciò può continuare fino alla morte a osservare il codice morale e a sacrificarsi per il gruppo. Un gruppo costituito di tali individui ha maggiori probabilità di sopravvivere. La presenza, poi, di una gerarchia di emissari di Dio che contribuisce attivamente alla "selezione naturale", eliminando "i peccatori" cioè coloro che non accettano la morale della vita imposta da Dio, ulteriormente favorisce il fissarsi di questo tratto culturale nella popolazione.

Il percorso che abbiamo ipotizzato mette in evidenza come molte religioni si siano evolute come strumenti genetico/culturali della morale della vita. Esse, più o meno consciamente, si prefiggono la sopravvivenza del gruppo che le pratica utilizzando la spiritualità individuale come strumento per raggiungere l'obiettivo materiale collettivo. La religione e Dio svolgono, quindi, una doppia funzione: sono una bandiera che identifica il gruppo (se Dio prevale il gruppo prevale); sono lo strumento che impone e fa accettare agli individui il sacrificio necessario per raggiungere la meta. Illuminante, in questa ottica, è il racconto della Bibbia in cui è narrato "l'uso" di Dio per ottenere la vittoria del popolo ebraico su tutti gli altri e la conseguente crescita della sua discendenza (Gn 15 ,5 : "Guarda su in cielo e conta le stelle se puoi..... così sarà la tua discendenza").

La finalità utilitaristica di alcune religioni è quindi legata alla loro origine animale che le ha soggiogate alla morale della vita, per nulla interessata al benessere dell'individuo ma solo alla sopravvivenza della vita stessa. La storia e la cronaca dell'umanità sono testimoni del ruolo che ancora oggi svolgono alcune religioni nella lotta per la vita dei gruppi umani. La mancanza di consapevolezza di questo ruolo è stato il freno che ha impedito, fino ad oggi, a queste religioni di abbracciare la nuova morale, la nostra morale. Parlo della morale laica, frutto dell'evoluzione culturale dell'uomo, che ha visto nella sopraffazione dell'uomo sull'uomo la principale fonte del dolore ed ha propugnato il rispetto del prossimo e la tolleranza, come strumenti per raggiungere in questo mondo la felicità.

Ma la sofferenza ed il dolore hanno altre innumerevoli facce: la malattia, le inondazioni, i terremoti, i vulcani, la siccità, ecc..... Hanno la religione o Dio aiutato l'uomo, in migliaia di anni, a liberarsi da queste sventure? O come la magia e l'occultismo lo hanno solo illuso? O, peggio, lo hanno convinto, con la dottrina della divina provvidenza (definita come "ordine concepito da Dio per dirigere ciascuna delle cose create al proprio fine", cioè "non si muove foglia che Dio non voglia") che questi "mali" sono per lui "beni" poiché sono "prove volute da Dio"? Non sono state forse la laicissima intelligenza e la laicissima scienza ad aiutare l'uomo a combattere e, sempre più spesso, a vincere questi "mali"?

Non sono state, invece, le religioni che con i loro dogmi di fede hanno ostacolato la nascita e il cammino della scienza, umiliando, martoriando e massacrando i primi scienziati e i liberi pensatori? E non sono le religioni che, continuando a perseguire il fine morale della vita (la cosiddetta morale naturale), ottusamente incitano l'umanità alla procreazione distruggendo, così, l'ambiente e con esso la speranza dell'uomo di avere una vita degna di questo nome? Perché solo con il controllo delle nascite ed il raggiungimento di un corretto equilibrio fra la popolazione umana e le risorse della terra si può assicurare a tutti gli uomini un eterno soddisfacimento dei bisogni. E solo con il soddisfacimento dei bisogni, gli uomini possono vivere la loro vita, unica ed irripetibile, come ogni uomo dovrebbe viverla, come un Dio!!



