

PRODUZIONI ANIMALI: appunti della lezione del 29 ottobre 2025

Introduzione

~ 2,4 miliardi di anni fa (circa  $2,4 \cdot 10^9$  anni fa) comparvero i primi organismi fotosintetici; si tratta di batteri (procarioti), detti **cianobatteri** o “alghe azzurre” a causa della colorazione che è conferita loro da sostanze cromogene (colorate), i pigmenti fotosintetici. Si ipotizza che i cianobatteri si siano evoluti da antenati **archeobatteri**; perché? Per l'**universalità del codice genetico**: le 4 lettere, A, T, C e G, sono le stesse in tutti gli organismi viventi.

Cos'è il codice genetico?

È il linguaggio della Biosfera. 4 (A, T, C, G) lettere invece di 21, che vengono disposte in sequenza a formare parole, dette “geni”, le quali contengono le informazioni necessarie alla sintesi (costruzione) delle proteine.

Supponiamo che i nostri lontani antenati ominidi, appartenenti alla specie *Homo heidelbergensis* ([https://it.wikipedia.org/wiki/Homo\\_heidelbergensis](https://it.wikipedia.org/wiki/Homo_heidelbergensis)), che vivevano in Europa 0,5 milioni di anni fa, nel Paleolitico inferiore, fossero stati in grado di emettere solo 4 suoni differenti: sarebbe stato molto difficile, per loro, esprimere un concetto o scambiarsi una qualsivoglia informazione, in altri termini, comunicare. Perché? Il numero delle combinazioni possibili con 4 oggetti diversi (le quattro “lettere” o basi azotate, dette anche “nucleotidi”) dipende dalla lunghezza della sequenza, essendo dato da:

$$D = n^k,$$

dove

D = numero di disposizioni con ripetizione (combinazioni possibili di n oggetti prendendone k per volta),

n = numero di oggetti (lettere),

k = lunghezza della sequenza (nel caso del codice genetico, le “parole” si chiamano sequenze nucleotidiche),

$n^k$  significa “n elevato a k”, ossia n moltiplicato per sé stesso k volte.

Per esempio, se  $n = 4$  e  $k = 3$ ,  $D = 4^3 = 4 \cdot 4 \cdot 4 = 64$ . Ciò significa che se si hanno solo 4 lettere a disposizione, si possono costruire appena 64 combinazioni di tre lettere; d'altra parte, per  $n = 20$  e  $k = 3$ , come nel caso della lingua italiana,  $D = 20^3 = 8000$ . Pertanto, le varie lingue hanno risolto il problema aumentando significativamente il numero delle lettere; viceversa, la Natura, nel caso del codice genetico, ha adottato una soluzione alternativa: invece di aumentare il numero delle lettere, ossia di quei piccoli composti organici detti “basi azotate”, per aumentare il numero delle possibili combinazioni e, quindi, la quantità di informazioni che possono essere “codificate” dalle sequenze nucleotidiche (contenute in queste ultime), ha aumentato enormemente la lunghezza delle “parole” del codice genetico, ossia delle sequenze medesime. Quindi:

- 1) la lingua italiana, così come le altre lingue, ha aumentato il valore di n senza incrementare molto k (le parole della lingua italiana sono tutte abbastanza brevi;
- 2) il codice genetico, invece, ha mantenuto  $n = 4$  ma ha aumentato il valore di k, costruendo sequenze nucleotidiche formate da centinaia o migliaia di lettere.

Le sequenze nucleotidiche, ossia le “parole” del codice genetico, si chiamano **geni** e contengono le informazioni necessarie alla sintesi (costruzione) delle proteine. Una proteina è una macromolecola organica, cioè un composto del C di elevato peso molecolare, formato da una sorta di “collana di perle”; ogni perla può essere di uno di 20 colori differenti. In pratica, si tratta di una catena di piccoli composti organici legati tra di loro, gli **aminoacidi**, di cui esistono, appunto, 20 tipi diversi. Allora, quando una cellula sintetizza (costruire) una determinata proteina come, per es., la **miostatina** (che inibisce lo sviluppo dei muscoli scheletrici prima della nascita), è come se disponesse di 20 scatole, ognuna contenente perle di colore uguale ma diverso da quello delle perle contenute nelle altre 19 scatole. Quindi, la cellula stessa o, più precisamente, la struttura deputata alla sintesi proteica (un organulo citoplasmatico detto **ribosoma**), deve sapere da quale delle 20 scatole prendere ogni singola perla, la prima, la seconda, la terza perla della “collana” e così via. In altri termini, deve conoscere il colore di ogni singola perla della collana per sapere da quale scatola estrarla. Ciò significa possedere il “progetto” di una determinata proteina: tale progetto si trova nel **gene** corrispondente, ossia nella sequenza formata dalle 4 lettere del DNA (un gene è, appunto, un pezzo di DNA). Tale sequenza viene letta e tradotta in una collana di perle, cioè in una specifica proteina.

Come si sono evoluti i cianobatteri?

I cianobatteri (batteri fotoautotrofi o fotosintetici) si sono evoluti da antenati archeobatteri. L'evoluzione è un processo di cambiamento, molto lento e graduale, dovuto al fatto che ogni tanto (molto raramente) il DNA cambia. I cambiamenti del DNA si chiamano **mutazioni genetiche**: si tratta di errori di reduplicazione (copiatura) del DNA, che si verificano, per motivi casuali, quando una cellula si prepara a dividersi in due cellule figlie. Tali “errori”, il più comune dei quali è la **sostituzione nucleotidica**, avvengono in un caso su ~ un milione e possono provocare la sintesi di una proteina “mutante” la quale, a causa del cambiamento del colore anche solo di una singola perla, ossia di un singolo aminoacido, potrebbe non funzionare più. Un esempio è quello della miostatina, in cui, in seguito a due diverse mutazioni genetiche verificatesi, rispettivamente, nella razza bovina Belga e nella Piemontese, si assiste ad uno sviluppo abnorme (anormale) dei muscoli dei vitelli prima della nascita, a causa della mancata azione inibitoria della miostatina difettosa. Mentre negli animali selvatici, o nei domestici allevati allo stato brado come le bovine del Texas, tale anomalia genetica comporterebbe la morte sia della madre sia del figlio, a causa della impossibilità, da parte della prima, di partorire un feto eccessivamente pesante e muscoloso, nella specie umana si tratta di una grave **malattia genetica**. Nelle razze bovine specializzate per la produzione della carne come la Belga, la Piemontese e svariate razze francesi, viceversa, il mancato funzionamento della miostatina si traduce in un vantaggio per gli allevatori, grazie al maggior peso ed alla più accentuata muscolosità dei vitelli; dalla vendita di questi ultimi alla stessa età a cui sarebbe venduto un vitello “nostrano”, ossia non “della coscia” (o, per usare un'espressione più tecnica, “di fassone”), infatti, si spuntano prezzi ben più elevati grazie alla maggiore quantità di carne che si ottiene dal sezionamento della carcassa. Fino alla fine degli anni '60 del secolo scorso, l'utilizzo come riproduttori dei tori di fassone presso le cosiddette “stazioni di monta pubblica” era vietato dal Ministero dell'Agricoltura, dal momento che questi animali erano considerati delle mostruosità; tuttavia essi venivano utilizzati lo stesso clandestinamente, per soddisfare le richieste degli allevatori.

La velocità con cui i vari organismi (animali, vegetali, funghi, batteri, virus ecc.) si evolvono dipende dal cosiddetto “**intervallo tra le generazioni**”, cioè dal tempo che intercorre tra la nascita di un individuo e quella della sua prole. Mentre nel caso della specie umana tale intervallo è di ~ 25 anni e nel bovino o nel cavallo di 2-3 anni, per quanto riguarda i batteri è di appena una trentina di minuti. Pertanto, nello stesso intervallo di tempo “geologico” (per es., in un milione di anni), ci

saranno molte più generazioni di batteri che di esseri umani o di grossi erbivori domestici e, pertanto, il numero di occasioni in cui in una colonia batterica possono verificarsi mutazioni genetiche è enormemente maggiore.

Nel corso di centinaia di milioni di anni le mutazioni che possono avvenire in una determinata specie di batteri, come nel caso degli Archeobatteri del Precambriano, sono centinaia di migliaia o, forse, milioni; di queste, la maggior parte è neutrale dal punto di vista selettivo, nel senso che non implica vantaggi né svantaggi per la sopravvivenza. Perché? Per due motivi:

- 1) nonostante una lettera del DNA (ossia una base azotata della sequenza nucleotidica) sia stata sostituita da un'altra, nessuna perla viene cambiata nella collana di perle (nessun aminoacido viene rimpiazzato nella proteina, che è una catena poliaminoacidica);
- 2) l'aminoacido che viene sostituito si trova in una parte funzionalmente non importante della proteina.

Le mutazioni selettivamente neutre, che sono la maggioranza, possono trasmettersi di generazioni in generazione oppure estinguersi per motivi casuali, perché magari dopo un certo numero di generazioni non è rimasto in vita alcun discendente dell'esemplare in cui la mutazione era avvenuta. Altre mutazioni si rivelano, invece, dannose e, proprio per questo, vengono eliminate dalla selezione naturale, dal momento che gli individui che le ereditano non sono in grado di sopravvivere o di riprodursi a propria volta. Pochissime, infine, sono addirittura vantaggiose: in che modo? Il cambiamento di un aminoacido in una proteina potrebbe far sì che quella proteina acquisisca la capacità di svolgere una nuova funzione, per es. di tipo enzimatico. In altri termini, la proteina mutante potrebbe funzionare da catalizzatore di una determinata reazione biochimica. Anche se ciò può sembrare assurdo ed estremamente improbabile, il graduale accumulo di centinaia o migliaia di mutazioni genetiche in geni differenti potrebbe stimolare lo svolgimento di molte reazioni biochimiche; se queste ultime iniziano a coordinarsi fra di loro, nel senso che il prodotto di una determinata reazione diventa il reagente della reazione successiva e fa da substrato per uno dei nuovi enzimi (nel senso che un certo enzima si lega ad esso come parte della sua azione di catalisi, ossia di accelerazione della reazione in oggetto), la cellula acquisisce una funzione del tutto nuova, come nel caso della fotosintesi da parte di un ramo, ossia di una linea evolutiva, degli archeobatteri. Comparvero, così, dei nuovi archeobatteri più "evoluti" (i **cianobatteri**), in grado di sfruttare l'energia solare per estrarre idrogeno dall'acqua e farlo reagire con il C della CO<sub>2</sub>, producendo, così, nuovi composti "organici", come gli zuccheri semplici: questi ultimi, nelle piante, si sarebbero successivamente combinati a formare i polisaccaridi, come la cellulosa, che costituiscono il legno e che, in generale, si trovano nelle pareti delle cellule vegetali.

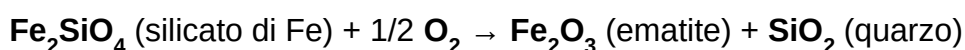
Quando, ~ 2,4 miliardi di anni fa ( $2,4 \cdot 10^9$ ), i cianobatteri iniziarono ad "inquinare" l'atmosfera del Precambriano con l'O<sub>2</sub>, prodotto di scarto della fotosintesi, alterando per sempre quelle condizioni di anossia che avevano reso possibile l'evoluzione dei loro antenati archeobatteri (i quali, non dobbiamo dimenticare, sono anaerobi obbligati), gli archeobatteri hanno rischiato di estinguersi. Tuttavia ciò non è avvenuto, poiché la concentrazione atmosferica dell'O<sub>2</sub>, dopo essere aumentata, nel corso di alcune centinaia di milioni di anni, fino a raggiungere livelli di ~ 5%, si stabilizzò su questi valori, rimanendo costante per quasi un Ga (miliardo di anni). Tale concentrazione dell'O<sub>2</sub> è, probabilmente, pari o superiore alla soglia massima alla quale gli archeobatteri possono essere esposti senza venire uccisi: come riuscirono, allora, questi microrganismi anaerobi a sopravvivere? In parte trovarono rifugio in habitat (ambienti) anossici, come il fondo delle zone umide (paludi, stagni, acquitrini, suoli allagati ecc.), in cui si realizzano sempre condizioni di anaerobiosi grazie alla bassa solubilità dell'O<sub>2</sub> in acqua, soprattutto se la temperatura dell'acqua è abbastanza elevata. Non solo ma durante quel Ga in cui la [O<sub>2</sub>]<sub>ATM</sub> (concentrazione atmosferica dell'O<sub>2</sub>) rimase costante dopo un iniziale incremento, gli archeobatteri non stettero a guardare ma, sia pure inconsapevolmente, acquisirono, con lo stesso meccanismo già descritto per l'evoluzione dei cianobatteri, una nuova funzione: la capacità di rilevare la presenza nell'ambiente di una quantità di O<sub>2</sub> eccessiva e, come risposta, di disidratarsi quasi completamente

dotandosi, nello stesso tempo, di una serie di involucri o barriere concentriche tutto intorno al DNA ed ai ribosomi. Si era, così, sviluppata la **spora**, una forma di resistenza in cui la cellula batterica si trasforma quando viene a trovarsi in condizioni ambientali ostili, per es. in presenza di O<sub>2</sub>. La capacità di trasformarsi in spore, che potranno dare nuovamente origine alla forma vegetativa della specie, ossia alla cellula batterica, nel caso in cui le condizioni ambientali tornino ad essere favorevoli (in pratica, in assenza di O<sub>2</sub>), ha permesso non solo agli archeobatteri di sopravvivere dopo l'inizio dei cicli fotosintetici, in un mondo che era diventato aerobio, ma di continuare ad evolversi, nei cosiddetti **Archaea** (uno dei tre “domini” della biosfera) i quali comprendono moltissime specie che si sono adattate a vivere nel tubo digerente dei vertebrati, compresi i mammiferi e gli uccelli domestici.

Il fenomeno responsabile del fatto che, per quasi un Ga, sebbene i cianobatteri continuassero ad immettere milioni di tonnellate di O<sub>2</sub> in atmosfera (come sottoprodotto della fotosintesi), la concentrazione di questo gas, letale per i microrganismi anaerobi come gli archeobatteri, rimase costante, è l'**ossidazione dei silicati ferrosi**, una reazione chimica che consuma O<sub>2</sub> (ossigeno molecolare gassoso), sottraendolo all'atmosfera per sequestrarlo in rocce come gli ossidi ferrici e il quarzo (ossido di silicio). Tuttavia ad un certo punto, siccome tutto il Fe<sup>+2</sup>, ossia il ferro “ridotto” (che perde solo due elettroni) presente nello strato più superficiale della crosta terrestre era stato ossidato a Fe<sup>+3</sup>, che perde tre elettroni, fenomeno detto “**Great oxygenation event**” o grande arruginimento della crosta terrestre, la suddetta reazione si bloccò. Il risultato fu che, essendo venuto meno il meccanismo di consumo dell'O<sub>2</sub>, quest'ultimo iniziò ad accumularsi in atmosfera fino a raggiungere il livelli attuali (~ 20%). Ma, ormai, i discendenti degli archeobatteri avevano evoluto le necessarie contromisure (capacità di trasformarsi in spora) che avrebbero permesso loro di sopravvivere nonostante la composizione atmosferica sia completamente cambiata rispetto a quando i loro antenati si erano evoluti nel Precambriano.

Infine, per avere un'idea di quanto una spora batterica sia resistente e, potenzialmente, immortale, si consideri il fatto che gli scienziati hanno osservato la germinazione di spore recuperate da mummie egizie, a migliaia di anni di distanza dalla loro formazione.

L'ossidazione dei silicati ferrosi consuma l'O<sub>2</sub> per ~ 10<sup>9</sup> anni



E = -27.53 kJ/mol.

Questa reazione consuma l'O<sub>2</sub> prodotto dai cianobatteri, impedendogli di accumularsi in atmosfera. La reazione avviene spontaneamente, essendo accompagnata dalla liberazione di energia sotto forma di calore (in Natura sono spontanei, nel senso che si svolgono senza l'intervento di un fattore esterno, solo i fenomeni che implicano una perdita di energia del sistema, come nel caso della cascata, in cui l'acqua compie il salto perdendo energia potenziale).