

A mélyvízi hőforrások szerepe az élet kialakulásában

Kiss Máté (O1PMIK)

2015.06.23

Előszó

Hogyan jött létre az élet? Az emberiség egyik legmeghatározóbb kérdése ez, amelyre talán soha nem kapunk pontos választ. Felállíthatunk hipotéziseket, de nem lehetünk biztosak benne, hogy a valóságban hogy zajlott le nagyjából 3,8-3,5 milliárd évvel ezelőtt az abiogenezis, azaz az élet létrejötte szerves anyagokból. A jelenleg ismert sejtek közül az összes hasonló módszerrel szintetizál fehérjéket homológ riboszómákban, ugyanazt a genetikai kódot és ugyanolyan kiralitású cukrokat és aminosavakat használva. Mindezekből arra következtethetünk, hogy a ma ismert földi élőlényeknek létezett egy legutolsó közös őse (LKÖ) amelyben az összes közös tulajdonság megtalálható volt. Ahhoz, hogy megtudjuk az LKÖ létrejöttének körülményeit, annyit tehetünk, hogy elméleteinkből megpróbáljuk kiválasztani a legvalószínűbbet és kísérletekkel, észérvekkel, vagy földrajzi és geokémiai leletekkel megpróbáljuk alátámasztani. Az alábbiakban az egyik ilyen hipotézist szeretnék bemutatni, amely szerint az élet mélyvízi hőforrásokban alakult ki először.

I. Haldane és Miller tévedése

Az ősleves

Először is szeretnék néhány szót szólni arról, hogy miért is van szükség ezekre a hőforrásokra. Elvégre mindenki hallott már Miller híres kísérletéről, amely bebizonyította, hogy valóban kialakulhattak szerves anyagok a korabeli Föld egyszerű környezeti hatásiból kifolyólag. Miller kísérlete Haldane 1929-es cikkén alapult, amely egy úgynevezett „ősleves” feltételezett a korai Földön, amelyben az élet építőköveinek is nevezhető molekulák, mint például a víz, ammónia és metán szabadon úszkáltak és UV-sugárzás hatására szerves vegyületekké alakulhattak. Ezek az idők során az őslevesben egyre inkább felhalmozódtak és egymással reakcióba lépve nagyobb molekulákat, makromolekulákat, vírushoz hasonló képződményeket, végül pedig valódi sejteket hoztak létre. Az első egysejtű élőlények Haldane szerint heterotóf módon, erjesztéssel állították elő a létfenntartásukhoz szükséges energiát, melynek során felemésztették az ősleves szervesanyag tartalmát. A következő lépés a fotoszintézis képessége, és így az autotrófok megjelenése volt, ami után az evolúció megindulhatott a ma is ismert világ irányába. Miller ezekre a feltevésekre alapozta a kísérletét, amelynek során a laboratóriumában a korai Földhöz hasonló körülményeket szimulálva sikerült egyszerű szerves anyagokat létrehozni. Hosszú ideig úgy tartották, hogy a kísérlet elegendő bizonyítékul szolgál Haldane hipotézisének igazolására, így az ősleves lett

a világszerte elfogadott elmélet az élet kialakulására nézve. Későbbi kísérletek mégjobban megerősítették ezt az elméletet amikor sikerült UV-sugárással nukleotidokat szintetizálni szervetlen anyagokból, így az ősrésben ezek jelen lehettek, és ezek már képesek voltak arra, hogy spontán reakcióval RNS-sé polimerizálódjanak. Az RNS már képes saját magát replikálni és képes olyan szerves átalakulásokra amely során létrejöhetett a DNS, a lipid membránok és a fehérjék. Ez az elmélet mára már szinte berögzült a köztudatba, annak ellenére, hogy már sokkal valószínűbb hipotézisek is léteznek.

A hibák

Persze, nem lenne szükség egy új elméletet bemutatására, ha Haldane-nek valóban igaza lett volna. Nagyon sok probléma van az ősrés elmélettel, amiket sokan elhanyagolnak. Először is, eddig nem találtak semmilyen olyan geokémiai leletet amely bizonyítaná az ősrés létezését. Az, hogy a nukleotidok esetleg valóban jelen lehettek, nem jelenti azt, hogy valóban képesek voltak az RNS-sé való polimerizálódásra. Ehhez a reakcióhoz ugyanis energiára és magas nukleotid koncentrációra van szükség. Mindkét kritériummal problémákba ütközünk: Az ősrésben nem találunk megfelelő energiaforrást. A nukleotidok létrehozásához UV-sugárzást használtunk de nagyobb, instabilabb molekulákhoz, mint az RNS ez már nem lesz jó megoldás, ugyanis a sugárzásnak itt már nem elnyagolható a romboló hatása, így az újonnan létrejövő polimerek egyszerűen szétesnének miatta. Az UV-sugárzás energiaként való felhasználásának a környezetünkben is megtalálhatjuk a nyilvánvaló cáfolatát, hiszen ezt a sugárzást egyik jelenleg ismert életforma sem használja fel ATP szintézisre, azaz felhasználható kémiai energiává való alakításra. A híg résben valószínűtlen, hogy felgyülemjen a kritikus nukleotid koncentráció. Ezen felül az RNS replikációja során a koncentráció lecsökken, ha a nukleotidok nem pótlódnak ugyanolyan sebességgel. További problémát jelent az is, hogy az ősrés a homogenitásából kifolyólag termodinamikai egyensúlyban van. Ennek következménye, hogy a benne lévő nukleotidoknak és más szerves anyagoknak nincs elegendő szabadenergiája, hogy spontán reakcióra legyenek képesek. Haldane elmélete nem veszi figyelembe azt, hogy az élethez nem csak energiára, hanem az energia áramlására is szükség van. Mindezekből arra a következtetésre juthatunk, hogy az LKÖ kialakulásához egy folytonos de nem túl erős energiaforrásra volt szükség ellentétben a véletlenszerű és nagyenergiájú Haldane-i UV-sugarakkal, vagy a Miller kísérletben használt elektromos kisülésekkel. A részecskék megfelelő koncentrációjának eléréséhez pedig szükség volt valamilyen lokalizáló mechanizmusra.

Bajok az erjesztéssel

A problémák sora itt még nem ér véget. Hogyha valahogyan mégis létrejött volna az ősrésben, hogyan termelt volna energiát az LKÖ? Haldane szerint erjesztéssel. Ez abból a szempontból logikus, hogy a folyamatnak nincs szüksége oxigénre, ami a korai Földön nem volt jelen szabad formában nagy mennyiségben. Az sokkal valószínűbb azonban, hogy az erjesztés nem egy kezdetleges, hanem egy az evolúció során később kialakult, bonyolultabb energiatermelő mechanizmus. Az erjesztés nem egyszerű redoxireakció, hanem annál egy sokkal bonyolultabb oxidoredukció. Ez az jelenti, hogy a folyamat során egyszerre történik oxidáció és redukció is. Másrészt az erjesztésből nyert energia csak egy töredéke annak, amit

példaul a légzéssel elő lehet állítani. Ebből az következik, hogy egy ilyen kis energiamentiség gazdaságos felhasználásához sokkal kifinomultabb feldolgozó apparátusra van szükség. Ennek bizonyítékát láthatjuk a ma élő erjesztő életformákban, ahol 12 különböző enzimre van szükség a folyamat végbemeneteléhez. Ezek az enzimek fehérjék amik az RNS-ben kódolt információ alapján szintetizálódnak. Az RNS, ahogy korábban feltételeztük, spontán módon, így véletlenszerű nukleotid sorrendben polimerizálódik. Ez alapján annak a valószínűsége, hogy pont olyan nukleotid sorrendben készüljön el egy RNS, hogy az energiatermelő mechanizmushoz szükséges fehérjét legyártsa, rendkívül kicsi. Ezen kívül az eddig felállított leszármazási fák vizsgálva sem találunk olyat, amely a korai ágaira pusztán erjesztéssel energiát termelő élőlényeket helyez. Továbbá, az ősbaktériumokban és baktériumokban nagyban különböznek az erjesztést katalizáló enzimek. Ha ezek valóban az utolsó közös ősök egy alapvető folyamatában játszottak volna szerepet, akkor nagyon kicsi lenne a valószínűsége, hogy ekkora eltérések kialakulhatnának. Az első életformák így valószínűleg nem erjesztéssel termeltek energiát.

II. Hőforrások

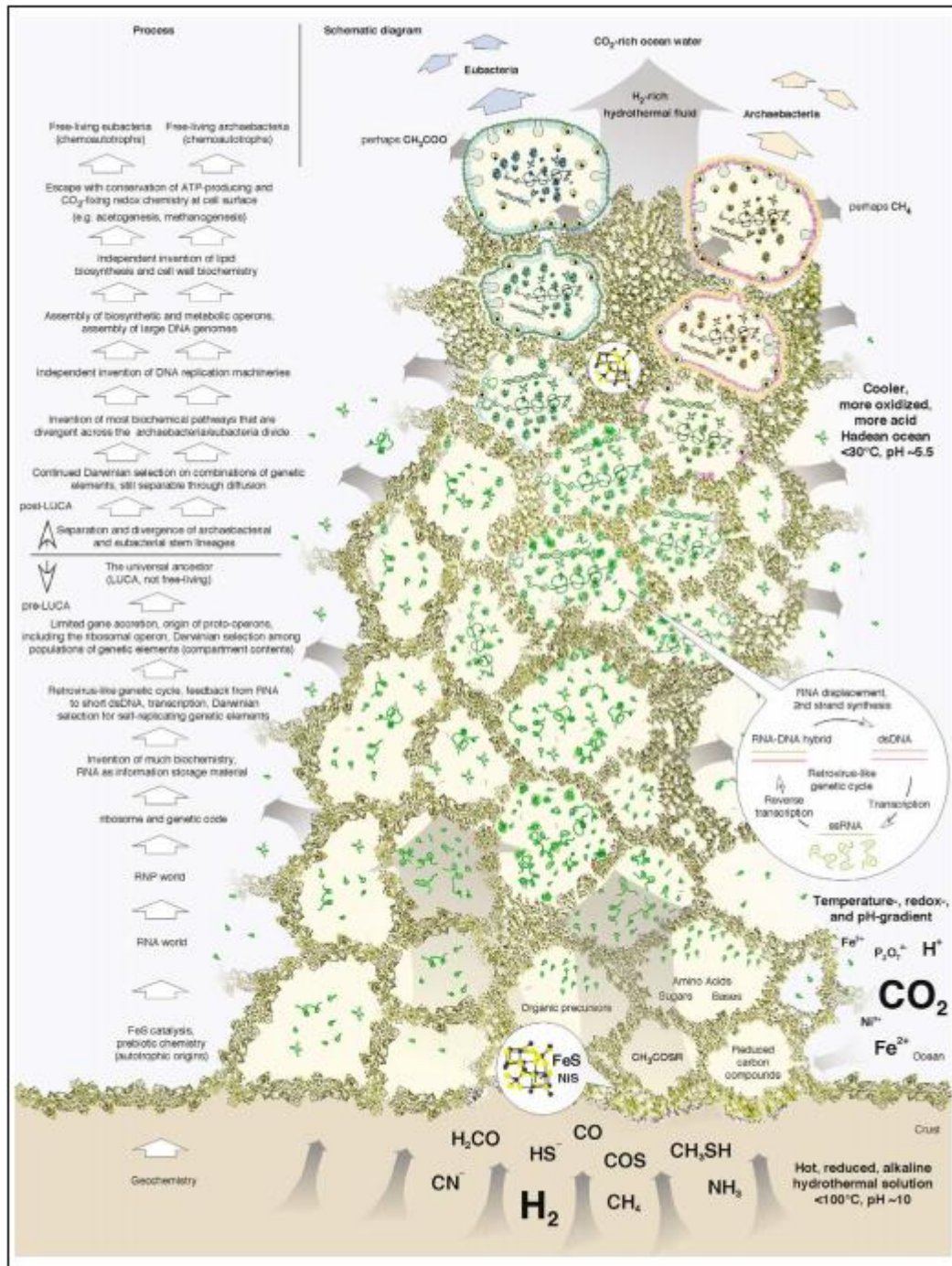
Fekete füstölők

A fentiek alapján jól látható, hogy alapjaiban más megközelítésre van szükség az élet megjelenését illetőleg. Már a 70-es években felmerült az ötlet, hogy a mélyvízi hőforrások szolgálhattak az élet kialakulásának kezdőpontjaként. Akkoriban csak egyfajta ilyen hőforrást ismertek, az úgynevezett „fekete füstölőket”. Ezek a víz alatti vulkáni kürtők az őslévellel ellentétben nem voltak termodinamikai és kémiai egyensúlyban. A tengerfenékből feltörő magma itt nagyjából 1200°C-os, míg az általa felmelegített víz a füstölő környékén nagyjából 350°C-os volt. Ezek a helyeken a víz erősen savas volt (1-2 pH) és gazdag hidrogén-szulfidban, valamint fémekben, de kevés szabad hidrogént tartalmazott. Ezek a fekete füstölők azonban nem alkalmasak az élet kilakítására. A hőmérsékletük túl magas, így a létrejövő kötéseket szétszakítja. Problémát okoz az is, hogy a pH-juk túl alacsony és földtörténeti mértékben túl kicsi az élettartamuk az élethez szükséges szerves anyagok felhalmozásához, valamint, hogy nincs semmi, ami ezeket lokalizálja.

A lúgos hőforrás

2000-ben fedeztek fel másik típusú hőforrást egy Elveszett Városnak (Lost City) keresztelt Atlanti-óceáni lelőhelyen. Ezeknek a lúgos hőforrásoknak nevezett struktúráknak a létezését Russell már 1993-ban megjósolta és fontos szerepet tulajdonított nekik az élet kialakulásában. A hőforrások a tengervíz olivinnal és hasonló ásványokkal való reakciójából keletkeztek. Az ilyen típusú ásványok alkotják az óceánok alatti fölkéreg nagyrészét. Ezek a hőforrások a fekete füstölőkkel szemben nem vulkanikus eredetűek, magas hőmérsékletüket egy szerpentinizációnak nevezett kémiai reakcióból nyerik, melynek során az olivinból hidroxilációval szerpentin keletkezik. A hidroxilált kőzet kitér és elmorzsolódik, így még több tengervíz tud a kéregre folyni. Ezáltal a reakció önmagát hajtja. Becslések szerint több víz van a tengerfenéki hidroxilált kőzetekben megkötve, mint amennyi az óceánokban jelen van. Ebből láthatjuk, hogy az egész folyamat globális skálán és már hosszú ideje folyamatosan végbe megy. Ezek a hőforrások 70 °C-os hőmérsékletű, bázikus (9-11 pH), és

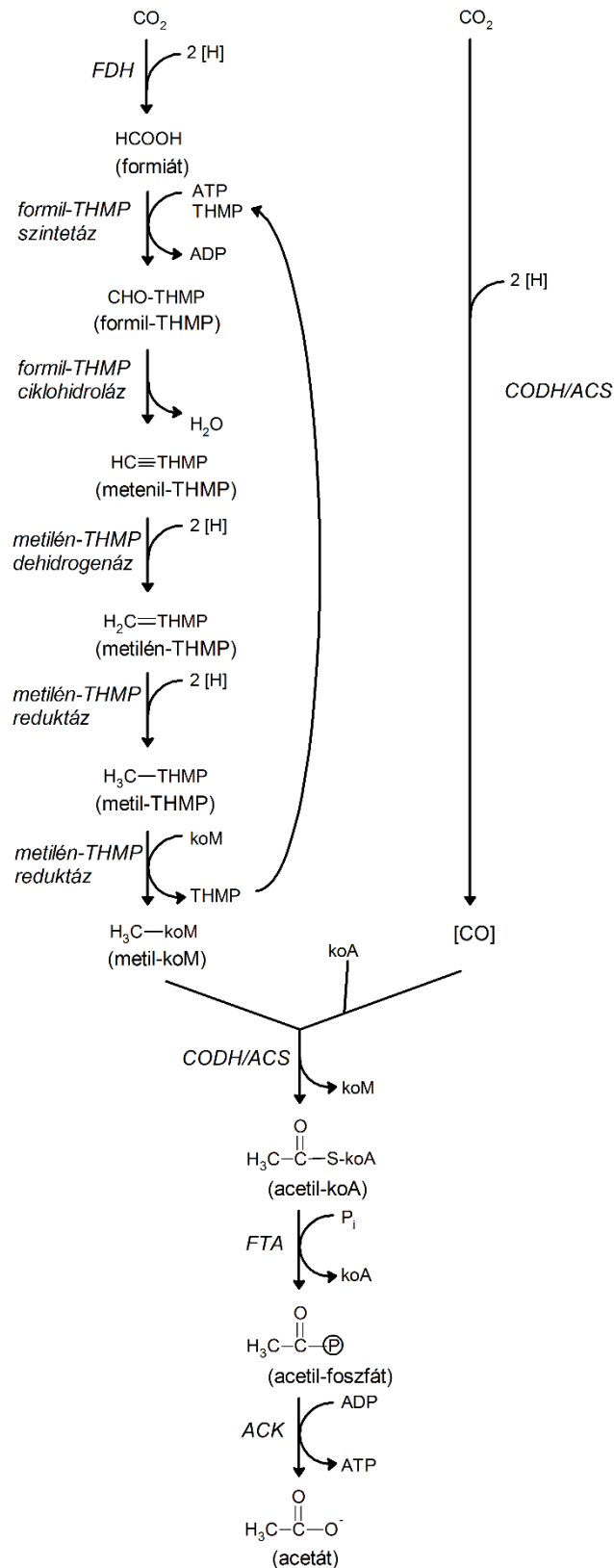
oldott hidrogénben gazdag hidrotermális folyadékot termelnek. A földből feltörő lúgos folyadék kiáramlásának helye mentén akár 60 méter magas porózus mészkő tornyok is emelkedhetnek, amelyeken puha aragonitfalú mikrométeres cellák találhatóak, amik között a hidrotermális folyadékok szabadon keringhetnek.



1. ábra A hőforrás oszlopos képződménye

Az acetil-koA útvonal

A hidrotermális folyadékban a hidrogénen kívül kis mennyiségű egyszerű szénhidrogének is megtalálhatóak, amelyek a feltételezések szerint abiotikusan keletkeztek. (A másik lehetőség az, hogy az esetlegesen a kéregben mélyebben élő metanogén baktériumokból származnak.) A szénhidrogének eredete azonban itt nem is annyira fontos, mert a metánnak és acetátnak csak a jelenléte is egy kis segítséget ad az abiogenezis megértéséhez: Lehetséges, hogy az élet a szén-dioxid hidrogenizálásának mellékhatásaként jött létre, hiszen ennek a folyamatnak a végterméke metán és acetát lehet. Az ismert autotrófok közül az összes hidrogént használ a szén-dioxid megkötéséhez. Öt olyan kémiai folyamatot ismerünk ami ezt véghez tudja vinni. Ezek közül csak egyetlen egy van amelyik nem használ ATP-t, azaz energiát a működéséhez, az acetil-koA (acetil-koenzim A) útvonal, vagy más néven Wood-Ljungdahl reakcióút. Ez az útvonal megtalálható a legősibb ismert prokariótákban, így jelen lehetett az LKÖ-ben is. Az acetil-koA reakcióút a szén-dioxid fixálása mellett energiát is termel ATP formájában, vagyis, Everett Shock szavaival élve „ez egy ingyen ebéd, amiért még fizetnek is, ha megeszed”. A folyamatot metalloenzimek katalizálják, amikben kén, nikkel és vas található, olyan anyagok amik a lúgos hőforrásokot felépítő ásványokban jelen vannak, így akár onnan is származhatnak. A korai Földön az óceánokban található szén-dioxid koncentrációja 1000-szerese volt a mostaninak, ami alapján arra a következtetésre juthatunk, hogy a víz és a hidrogénben gazdag lúgos hőforrások között nagymértékű fixáció zajlott le. Mivel kezdetben a Földön csak nagyon kis mennyiségű szabad oxigén volt szabad formában, az óceánokban nagy mennyiségű oldott vas volt jelen. Ez azt jelenti, hogy a hőforrások oszlopaiban található cellák falát korábban alkototta aragonit helyett fém-szulfidból (főleg FeS) készült „inorganikus membrán”. Ez a feltételezés nem alaptalan, mert ilyen képződményeket már találtak egyes Írországi lelőhelyeken. Ezek a cellák képesek arra, hogy a különböző folyamatok során keletkező köztes termékeket egy helyen tartsa és így a koncentrációt növelve katalizálja a további reakciókat. Mindezek alapján levonhatjuk a következtetést, hogy a lúgos hőforrások megfelelő kiindulópontként szolgálhattak az élet számára. Sikertelenül találnunk egy megfelelő energiaforrást, lokalizációs mechanizmust és olyan környezetet, ami nincs termodinamikai és kémiai egyensúlyban. Ezen kívül a hőforrások a korai Földön nagy számban jelen voltak és rendkívül hosszú élettartamuk is növeli az élet kialakulásának esélyét.



2. ábra Az acetyl-koA reakcióút

A fentiekben említettük az acetyl-koA útvonal energiatermelő képességét. Ez a képesség képezi az alapját a ma ismert metanogén és acetogén prokarióták metabolizmusának. Az útvonal során keletkező energia egy része az acetyl-koA nagyenergiájú tioészter kötésében

tárolódik, ami foszfátokkal reagálva acetil-foszfát létrehozására képes. Ez egy ATP-vel analóg energiát tároló molekula, amelyet ma is sok ismert baktérium használ. Ez újabb bizonyíték lehet az elméletünk helyességére.

A nitrogén szerepe

A lúgos hőforrások redukálóképessége elég ahhoz, hogy a nitrogént fixálja ammónia formájában. Ez kiindulópontként szolgálhat az élethez elengedhetetlen aminosavak és nukleotidok szintézisének. A hőforrások környékén találtak már 18 szénatomot tartalmazó szénhidrátokat is (bár ezeknek az abiotikus eredete nem bizonyított), de a nukleotid szintézisre még nem találtak közvetlen bizonyítékot. Ennek ellenére ugyanezt a szintézist laboratóriumi körülmények között sikerült véghez vinni, vas-szulfid katalizátort használva, amely a forrásokban is jelen van.

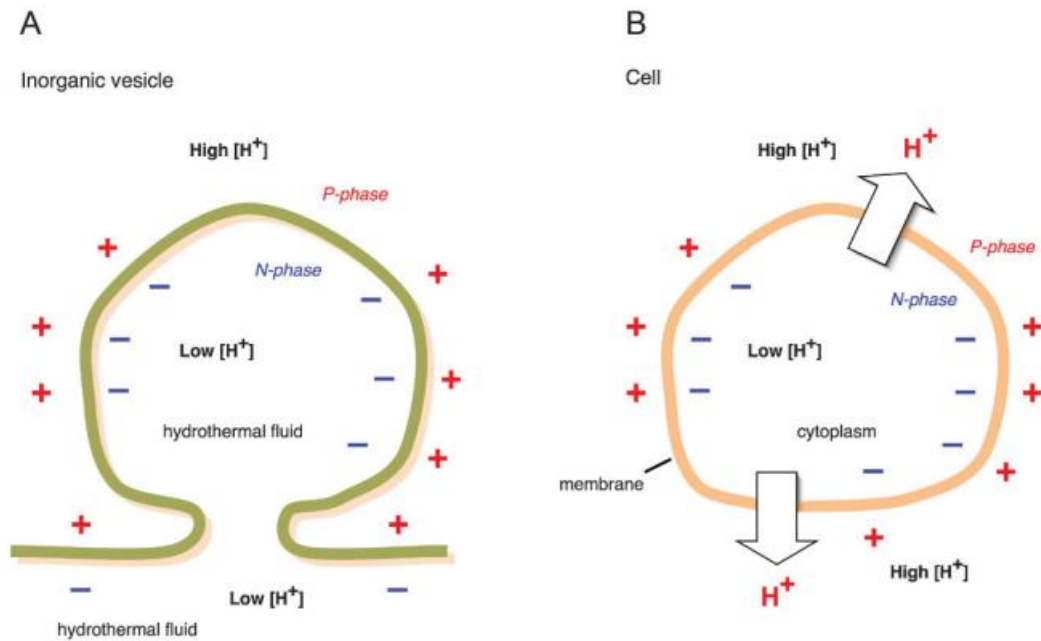
RNS a hőforrásokban

Az RNS polimerizációja és replikációja is sokkal könnyebben elképzelhető a hőforrások mentén, mint az őszlevesben UV-sugárzás hatására. Braun és társai szimulációval kimutatták, hogy a nukleotidok a hőforrás rendszerének hidegebb pontjaiba koncentrálnak, így növelve a koncentrációjukat és ezáltal az esélyeiket, hogy egymással reagálva polimerizálódjanak. A keletkező nukleinsavak közül a nagyjából 100 bazisnál nagyobbakra ez a koncentráló hatás mégjobban hat, így akár a kezdeti koncentráció billiószorosa is elérhető egyes helyeken. Ugyanezt a kísérletet laboratóriumban elvégezve valóban nagyságrendekkel magasabb koncentrációkat kapunk, bár ez nem éri el a szimulációban kapott értéket. Ezek mellett a hőforrások az RNS replikációját is nagyban elősegíthették. A váltakozó hőmérsékletű feltörő áramlatok szolgálhattak egy a laboratóriumban is használatoshoz hasonló polimeráz-láncreakció alapjaként.

III. Kemiozmózis

A proton-hajtóerő

Az általunk vizsgált hőforrások egy másik nagyon fontos tulajdonsága a lúgosságuk. Már korábban említettük, hogy a korai óceánokban a szén-dioxid koncentráció igen magas volt. Ez a vízzel sav-bázis reakcióba lépve szénsavat hoz létre, ami azt jelenti, hogy kezdetben az óceánok savasak voltak. Ezáltal a lúgos hőforrások és a savas óceán között, így a korábban említett inorganikus membránok két oldalán egy természetes pH-gradiens jött létre. Ez a gradiens a membrán oldalai között a becslések szerint egy nagyjából 200 mV-os feszültséget, azaz egy proton-hajtóerőt hozott létre. Ez hasonló nagyságrendbe esik a mai sejtek természetes, kemiozmózzissal kialakított membránpotenciáljával, valamint a polaritásuk iránya is megegyezik (belső negatív, kívüli pozitív). Ez alapján úgy sejtjük, hogy ezek az inorganikus membrából felépült cellák a mai sejtek elődjéül szolgálhattak, ami megmagyarázná a kemiozmózis univerzális jelenlétét a mai sejtekben.



3. ábra A hőforrások cellái és a sejtek

A kemiozmózisról

Maga a kemiozmózis első látásra egy szinte ellentmondásnak tűnő folyamat. A lényege, hogy a sejtlégzés során először a citromsavciklusból nem ATP, hanem NADH energiahordozó keletkezik. Az NADH oxidációjából felszabaduló energiát a sejt egy proton-gradiens felépítésére használja a membrán két oldala között. Ezután a proton gradiensből származó elektrokémiai potenciált felhasználva a sejt ATP-t állít elő. Látszólag feleslegesnek tűnik a köztes lépés, és így vélekedett a legtöbb biológus is, amikor Mitchell először felvetette a kemiozmózis ötletét. A későbbiekben látni fogjuk, hogy a valóságban azonban szükség van rá, hogy a skaláris kémiai reakciók sztöchiometriai limitációit legyőzzük. A természetben megfigyelhetjük, hogy a proton gradiens hajtja a baktériumok aktív tanszportját és ostorát, valamint, hogy szükség van rá az ATP szintézishez a fotoszintézis során és az oxidatív foszforilációhoz a mitokondriumokban és baktériumokban. Ezeken kívül a proton-gradiens kihasználása megfigyelhető az ősbaktériumokban is és még számos, meg nem említett folyamatban szerepet látszik. Látni, hogy ez a jelenség a természetben milyen univerzálisan jelen van, úgy gondoljuk hogy a proton hajtóerő kihasználása és energiává alakítása az LKÖ egyik alapvető tulajdonsága lehetett. Ezzel szemben sok, az élet kialakulását vizsgáló elmélet nem veszi figyelembe a kemiozmózist, és tévesen csak egy későbbi addíciónak tekinti azt.

A membrán-paradoxon

Ha a kemiozmózis valóban egy univerzális, közös őstől való tulajdonság, az felvet egy látszólagos paradoxont. Ma az LKÖ-nek a baktériumok és archeák legutolsó közös őst tekintjük, tekintve, hogy az eukarióták mind tartalmaznak, vagy tartalmaztak mitokondriumot, egy endoszimbiotikus prokariótát így egy később megjelenő életformának tekinthetők. A kemiozmózis során egy proton-gradiens épül fel a membrán két oldala között,

tehát szükség van hozzá egy membránra. Azonban a baktériumok és ősbaktériumok membránja és sejtfala kémiai felépítésében nagy mértékben különbözik. Evolúciós szempontból nehezen elképzelhető, hogy, ha egy sejt már rendelkezett egy tökéletesen működőképes membránnal, az idő elteltével a szelekció során egy radikálisan különböző membránt fejlesszen ki. Így az egyetlen logikus megoldás az, ha a két domén egymástól függetlenül hozta létre a membránját. Ebből viszont az következik, hogy az LKÖ-nek nem volt saját membránja amit az utódai megörökölhettek volna, ami lehetetlennek tűnik. A megoldást a lúgos hőforrások biztosítják: A bennük található inorganikus membránnal körbevett cellák szolgálhattak az LKÖ „otthonául”, mielőtt az egy saját membránt létrehozva elhagyhatta hőforrás bölcsőjét. A cellák falát belülről egy proto-membrán lipidréteggel vonhatta be, amelyet a hőforrás szintetizált, majd később áttérhetett a saját maga által termelt lipidekre.

A proton-gradiens felhasználása

Felmerül a kérdés: Hogyan használták fel a kezdetleges élőlények a proton-hajtóerőt? A mai élő szervezetekben ezt a feladatot az ATP-szintetáz enzimek végzik, azonban ezek rendkívül összetett nanogépezetek, amikről nehezen elképzelhető a hőforrásokban felhalmozódott aminosavakból véletlenszerű, spontán polimerizációval egy lépésben kialakultak. Ez azonban nem jelenti azt, hogy nem alakulhatott ki a hőforrásokban élő LKÖ-ben. Erre utal az is, hogy az ősbaktériumok és baktériumok nagyon hasonló felépítésű ATP-szintetázokkal rendelkeznek. Kellott léteznie egy ősi ATP-szintetáz variánsnak amely talán kevésbé volt komplex a mai megfelelőinél, de valószínűleg nem sokkal. Jelenleg úgy tűnik, hogy valóban egy lépésben kellett megjelennie, aminek ugyan önmagában kicsi a valószínűsége, az LKÖ-nek rengeteg idő és alapanyag állt rendelkezésére ennek az evolúciós ugrásnak a megtételéhez. Említésre szorul, hogy míg az LKÖ univerzálisan elismerten rendelkezett riboszómával, ez a saját komplex mivoltából az ATP-szintetázhoz hasonló problémába ütközik, és a keletkezésére is csak ugyanazt a választ tudjuk adni. Ez persze nem jelenti azt, hogy az LKÖ amíg az ATP-szintetáz kialakulására várt, energia nélkül maradt volna, hiszen a hőforrás elegendő ATP-t és tioésztereket termel, hogy az LKÖ energiaszükségleteit ellássa. Ezen kívül több, más, egyszerűbb sejtmechanizmust is ismerünk amik a proton-hajtóerőt használják fel, mint például a pirofoszfát szintetizálását, vagy a szén-dioxid redukálását elősegítő folyamatok, amik már egészen korán kialakulhattak.

A kemiozmózis szerepe

Arra, hogy miért is van szükség a kemiozmózisra, a választ az acetil-koA útvonal energetikája jelenti. Bár a teljes folyamat összességében energia leadásával jár, közben egy potenciálgátat kell átlépni. A hőforrásokban is termelődő metil-szulfid és hasonló köztes termékek katalizátorként képesek legyőzni ezt a gátat, anélkül, hogy a sejteknek energiát kéne befektetnie. A problémát az okozza, amikor a sejt már elhagyta a hőforrásokat, és az előbb említett anyagok nem állnak rendelkezésére. Ekkor a sejtnak energiát kell befektetnie, amit ATP felhasználásával tud megtenni. Azonban az acetil-koA útvonalból egyszerre csak egy ATP-t lehet nyerni, így a sejtnak nincs energianyeresége és a további növekedés elképzelhetetlen. Ez azért van így, mert a reakcióút során nagyjából annyi energia szabadul fel amennyi 1,5 ADP foszforilálásához elegendő. Nyilvánvalóan nem lehetséges csupán fél

ATP szintetizálása, így mindig csak egy fog keletkezni. Itt lép be a képbe a kemiozmózis. Ennek segítségével az extra energiát a sejt „be tudja fektetni” a proton-gradiens felépítésébe, majd fel tudja használni amikor éppen elég összegyűlik egy-egy ATP legyártásához. Így a növekedés már elképzelhető. Mindezekből egyértelműen következik, hogy az LKÖ nem hagyhatta ele a hőforrásokat, mielőtt a kemiozmózist kifejlesztette volna. Miért fejlődött volna ki a hőforrásokban, ha éppen ott nem volt rá szüksége? A természetes proton-gradiens hőforrásonként és a sejtek térbeli elhelyezkedésétől függően változhat. Egy olyan helyen ahol a sejt gyenge proton-hajtóerőt észlelt, előnyére válhatott a proton-gradiens megerősítése, amit a kemiozmózissal tudott elérni. A proton-gradiens vátoztatását már egészen egyszerű mechanizmusokkal is meg lehet oldani, amik egy korai sejtben könnyen kifejlődhetnek. Ilyen módszerek sok ma ismert metanogén és acetogén prokariótában megtalálhatóak.

Végszó

Ebben a cikkben megpróbáltam egy új, sokak által nem ismert megközelítést bemutatni egy régi kérdéshez. A bemutató nem a részletekkel foglalkozik, hanem megpróbál egy összefoglaló képet adni a lúgos hőforrásokban kialakult élet elméletéről, megválaszolva a legfőbb kérdéseket és megindokolva az egyes logikai lépéseket. De megválaszoltuk-e a bevezetőben felvetett kérdést? Nem pontosan, hisz ez az elmélet sem tökéletes és valószínűleg több helyen is javításra és kiegészítésre szorul. Bár nem tökéletes, mégis ami fontos az, hogy az eddigi elképzeléseinknél valamivel talán jobb és tisztább képet ad, és így közelebb juthattunk a igazi megoldáshoz. Remélem az Olvasó hasznosnak találta a cikket, és köszönöm az olvasást!

Felhasznált irodalom:

- Nick Lane, John F. Allen, William Martin - How did LUCA make a living? Chemiosmosis in the origin of life
- Eugene V. Koonin, William Martin - On the origin of genomes and cells within inorganic compartments
- Wikipédia és egyéb internetes források