

3

ZELULEN JATORRIA ETA EBOLUZIOA

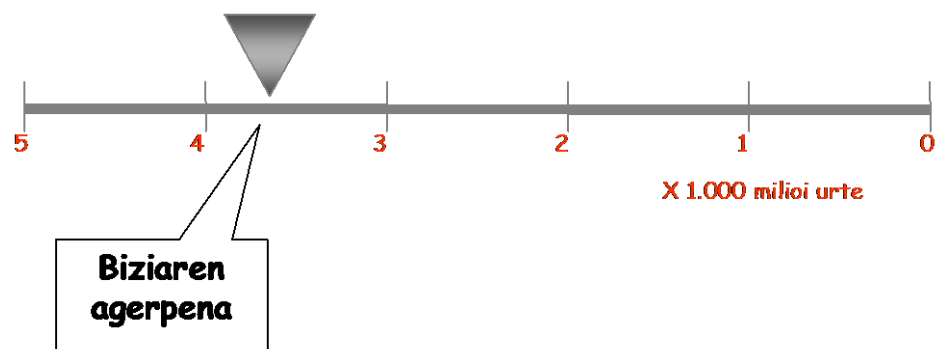


Mila miloi urtean Lurrean izan diren izaki bizidun bakarrak prokariotoak izan dira. Zelula sinpleak dira, baina biosferan oxigenoa agertzea eragin zuten. Egoera berri horrek zelula eukariotoak agertzea eta organismo konplexuagoak garatzea ahalbidetu zuen (iturria: Wikimedia/Flicka).

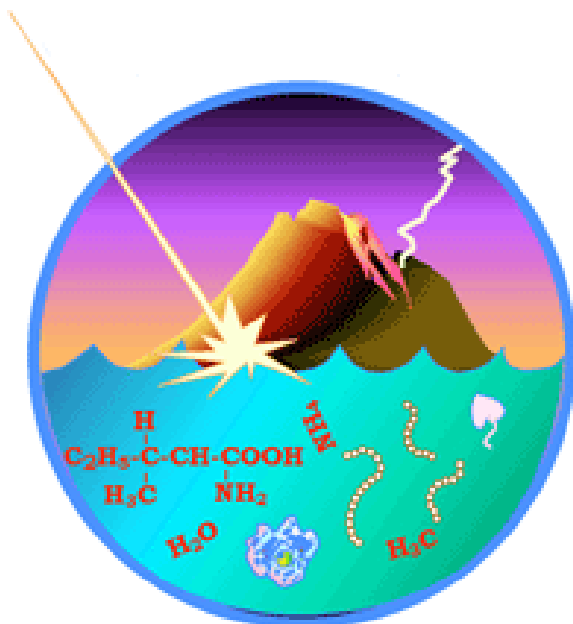
Nola sortu zen bizia? Nola eta noiz sortu ziren lehenengo zelulak? Galdera horri erantzuteko beste galdera bat egin behar dugu: gaur egun, nola sortzen dira zelulak? Gaurko baldintzetan, argi dago zelulak beste zelula batetik sortzen direla; edo beste modu batean esanda, zelulak ez dira inoiz materia inertetik sortzen. Zelulen berezko sorkuntza ez da gertatzen, baina, posible al da zelulak eraikitzea? Jada XXI. mendean gaude, eta zelulei buruzko ezagutzak eta metodologia berriek izugarritzko aurrerakada izan dute; hala ere, oraindik inork ez du lortu laborategian zelulak eraikitzea, ezta zelularik sinpleena ere. Hori ikusita, ematen du zelulak konplexuegiak direla berez sortzeko, baina... ez dugu ahaztu behar oso faktore garrantzitsu bat: denbora. Faktore hori kontuan izanik, posible da zientifikoki azaltzea lehenengo zelulak nola sor zitezkeen materia inertetik, eta zein izan zitezkeen historia ebolutiboa zelula eukariotoa sortu arte.

BIOMOLEKULEN SINTESI PREBIOTIKOA ETA LEHENENGO ZELULEN AGERPENA

Zelulak izugarritzko konplexutasuna duten sistema kimikoak dira, milaka eta milaka elementuz osatuak; hori dela eta, ez dirudi sistema konplexu hori bat-batean agertu zenik. Segur aski, hasieran, zelularen molekula sinpleak sortu ziren, eta, progresiboki, molekula konplexuagoak garatuko ziren. Bizia agertu baino lehen, beraz, lur primitiboan eboluzio kimikoa gertatu zen: hasieran, gai ez-organikotik molekula organiko sinpleak sortzeko; gero, molekula sinple horietatik polimero organiko garrantzitsuenak agertu arte, polinukleotidoak eta polipeptidoak, besteak beste.



3-1 irudia. Noiz sortu ziren lehenengo zelulak.



3-2 irudia. Lur primitiboaren baldintzak.

Gaur egun, molekula organikoak izaki bizidunek sintetizatzen dituzte; gainera, berehala degradatzen dira oxidazioz gure atmosfera oxidatzailearen eraginez; orduan, nola gerta zitekeen materia organikoen sintesia eta metaketa mundu abiotiko batean? Erantzuna aurkitzeko, kontuan hartu behar dugu nolakoak ziren mundu primitiboaren baldintzak.

Lur primitiboaren baldintzak oso bestelakoak ziren gaurkoen aldean

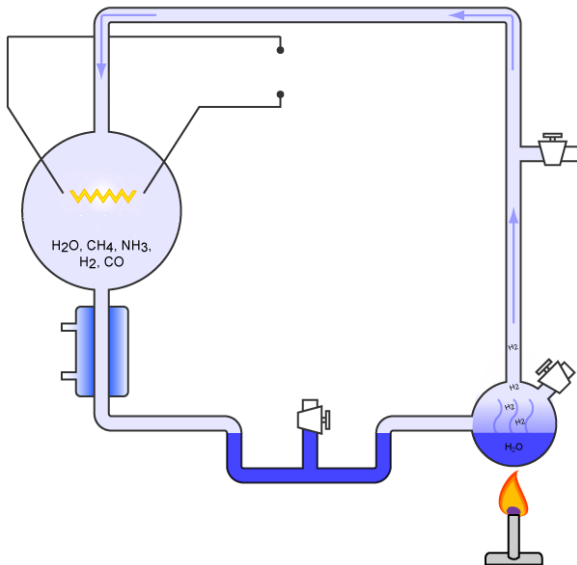
Eguzki-sistema orain dela 4.500 miloi urte eratu zen. Ez dakigu ziur noiz agertu zen bizia, baina zelula fosilik zaharrenek 3.500-3.800 milioi urte dauzkate; beraz, argi dago bizia oso fenomeno zaharra dela: bizia oso goiz agertu zen (3-1 irudia). Bizia agertzeko zorian zegoenean, duela 4.000 miloi urte, ura kondentsatzen ari zen ozeanoak sortzeko, eta Lurra oso leku bortitza zen: tenperatura altuak (oraindik Lurra hozten ari zen), jarduera bolkaniko bizia, meteoritoen talka, erradiazio ultramore handia eta izugarritzko ekaitz elektrikoak (3-2 irudia).

Bestalde, atmosfera primitiboa oso desberdina izango zen: ez zegoen oxigenorik edo oso gutxi zegoen, ezta ozonozko geruzarik ere. Atmosferaren konposizio zehatzari dagokionez adostasunik ez badago ere, osagairik ugariak honako hauek

izango ziren: karbono dioxidoa (CO_2), metanoa (CH_4), amonioa (NH_3), hidrogenoa (H_2) eta nitrogenoa (N_2). Ezaugarri horiengatik atmosferaren gaitasun erreduzitzaila oso altua izango zen; beraz, oso egokia molekula organikoak sintetizatzeko.

Molekula organiko sinpleen sintesi abiotikoa erraz gerta zitekeen Lur primitiboaren baldintzetan

Laborategian saiakerak egin dira Lur primitiboaren egoera simulatzeko; horiek sintesi prebiotikoko esperimentuak ditugu (biziaren agerpena fenomeno historikoa denez, ezin dugu frogatu nola gertatu zen, baina oinarri zientifikoa dago hipotesiak sustatzeko). Lehenengo esperimuntua (1953) arrakasta handia izan zen: molekula ez-organikoetatik molekula organikoak sortu ziren. Esperimuntuan ura (ozeano primitiboa) eta gas-nahasketa bat (atmosfera primitiboa) beirazko ontzi batean jarri ondoren, berotu (tenperatura altua) eta deskarga elektrikoa aplikatu zen (energia-iturria) (3-3 irudia). Ordu batzuk pasatu ondoren, uretan eta ontziaren hormari itsatsita gai gorrixka bat agertu zen, molekula organikoak osatua; haien artean zelularen oinarriko osagaiak zeuden, aminoazidoak, besteak beste.



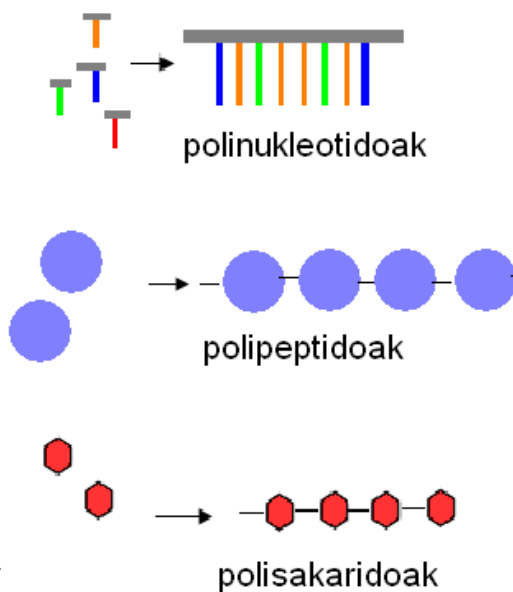
3-3 irudia. Sintesi prebiotikoko esperimentuak (iturria: Wikipedia).

Orduz geroztik antzeko esperimentu anitz egin dira, eta biziarentzat funtsezkoak diren ia molekula organiko sinple guztiak sintetizatzea lortu da (azukreak, aminoazidoak, nukleotidoen base nitrogenatuak, ATPa, eta abar). Azken finean, esperimentu horiek adierazten dute molekula organikoen berezko sintesi abiotikoa nahiko erraza izan zitekeela Lur primitiboan.

Polimeroen eraketa eragiten zuten lehenengo katalizatzaileak ez-organikoak izan zitezkeen

Zelulen osagai garrantzitsuenak polimeroak dira: polinukleotidoak eta polipeptidoak, besteak beste (3-4 irudia). Polimero horien sintesiak oso prozesu konplexuak dira gaurko zeluletan, eta entzimen laguntza eskatzen dute beti. Entzimarik gabe, aminoazidoen arteko lotura edo nukleotidoen arteko loturarik ez da gertatzen, erreakzio horiek energetikoki oso desfaboragarriak direlako. Gauzak horrela, nola gerta zitekeen polimerizazioa entzimak agertu baino lehen?

Esperimentuak agerian utzi dute polimeroen berezko sintesia nahiko zaila dela: aminoazidoen arteko loturak berez lortzen dira, baina eraikitzen diren kate peptidikoak oso laburrak dira; polinukleotidoen berezko sintesia, ordea, ez da lortu laborategian. Badirudi ezin dela saihestu katalizatzaileen beharra; hori dela eta proposatu da lehenengo katalizatzaileak mineralak izango zirela. Hipotesi hori sustatzeko oinarria hau da: alde batetik, badirudi zenbait konposatu metalikok katalizatzaile moduan jokatzen dutela molekula organikoen sintesia zuzentzeko; bestalde, izaera kristalinoa duten mineralak —buztinak, esate baterako— molekula organikoak



3-4 irudia. Polimero organiko nagusiak eta haien monomeroak.

erakarri eta kondentsatzeko gai dira. Hipotesi horren arabera, beraz, polimero organikoak egitura kristalinoen gainazalean sor zitezkeen, metaletan oinarritutako katalizatzaileen laguntzarekin.

“RNAREN MUNDUA” HIPOTESIA: RNA MOLEKULAK BIZIAREN OINARRIAN DAUDE

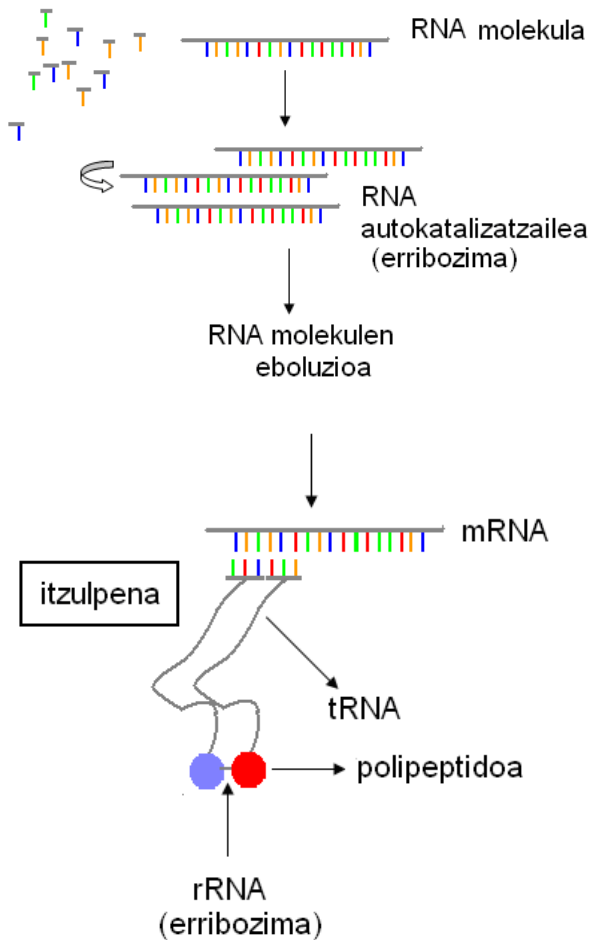
Biziaren funtsezko ezaugarria ugaltzeko gaitasuna da, eta gaitasun horren oinarrian gai genetikoaren erreplikazioa dago, hau da, informazioa gordetzen duten molekuletatik kopia berriak sortzea. Proposatuta da erreplikazioa lortu ziren lehenengo molekula RNA molekula izango zirela; hori dela eta, hipotesi horri “RNAREN MUNDUA” deritzen.

Zergatik RNA? Gaurko zeluletan ere bikoizten diren molekula polinukleotidoak dira, DNA molekula hain zuzen, baina proteinen jardura katalizatzailea behar dute bikoizteko; proteinak, ordea, zelularen katalizatzaile nagusiak dira, baina ezin dute eragin aminoazidoen sekuentzia. Gauzak horrela, 1982an oso aurkikuntza garrantzitsua lortu zen: gaitasun katalizatzailea duten RNA molekula. **Erribozima** izendatu ziren, hau da, entzimen moduan jokatzen duten RNA molekula. Gaurko zeluletan, erribozimek oinarritzko prozesuetan parte hartzen dute: RNAREN heltze-prozesuan eta proteinen sintesian (aminoazidoen arteko lotura katalizatzen dute). Gainera, erribozimak erabiliz, nukleotidoen polimerizazioa lortu da laborategian. Hori guztia kontuan hartuz, litekeena da biziak eskatzen dituen bi gaitasunak —hau da, ereduizat jotzea (molekula informatiboa) eta katalizatzailea izatea— orain dela urte asko RNA molekuletan bildu izana.

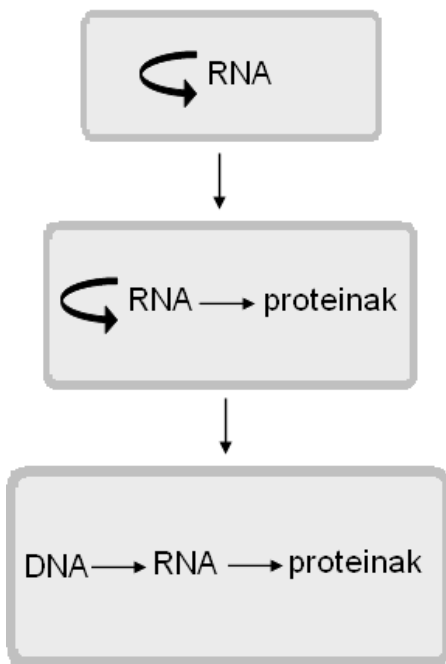
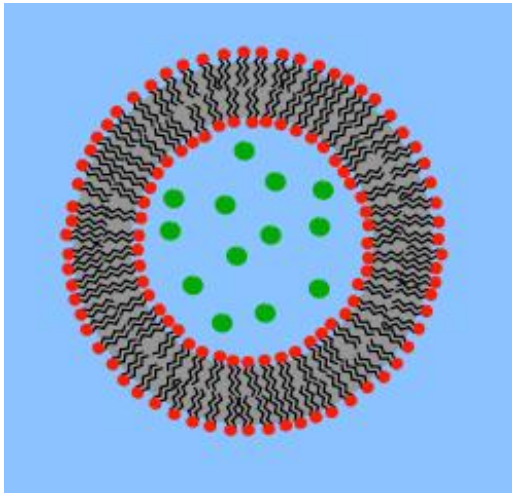
RNAREN MUNDUAN ITZULPENA GARATU ZEN

RNA autokatalizatzaileak gero eta ugariago bihurtuko ziren, baina, aldi berean, denborarekin RNAREN aniztasuna handiagoa izango zen, eta RNA molekulek gaitasun berriak garatu zituzten, eta sistema konplexuagoak sortu: RNA horietako batzuk aminoazidoen arteko lotura katalizatzeke gai izango ziren (gaurko rRNA), eta beste batzuk aminoazido bat lotzeko gai izango ziren (gaurko tRNA). Azkenik, RNA molekulek aminoazidoen polimerizazioa eragingo zuten.

Polipeptido horietariko batzuk RNA molekula baino katalizatzaile hobek izango ziren; horregatik, oso abantaila handia izango zen polipeptido espezifikoek ekoizpena (aa sekuentzia konkretu batekin). Litekeena da, beraz, RNA espezifiko batzuk (gaurko mRNAk) molekula informatibo bihurtu izana polipeptidoen sekuentzia eragiteko (3-5 irudia). Horrela, RNA eta proteinen arteko erlazio estua ezarri zen, hau da, itzulpena asmatu zen. Hortik aurrera, denborarekin, sistema erreplikatzaile horien RNAk informazioaren eramaileak izango ziren, eta polipeptidoak katalizatzaile nagusiak. Azken finean, “RNAREN MUNDUA” hipotesiak azaltzen du nola sortu ziren oinarritzko mekanismo genetikoak.



3-5 irudia. “RNAREN MUNDUA” hipotesia.



3-6 irudia. Sistema errepikatzaileen konpartimentazioa.

Konpartimentu itxiak beharrezkoak izango ziren lehenengo sistema genetikoak garatzeko

RNA molekulen arteko elkarrekintza edo RNAREN eta polipeptidoen arteko harreman estua posible izateko, sistema horien elementuak fisikoki gertu egon behar zuten. Hasieran, elementu horiek bilduta egon zitezkeen euskarri moduan jokatuko zuen solido baten azalean (buztinen edo beste egitura kristalino baten azalean); baina sistema horien eraginkortasuna askoz handiago bihurtuko litzateke elementuak konpartimentu itxi batean sartuta egongo balira.

Nolakoak ziren lehenengo konpartimentuak? Segur aski, gaurko zeluletan gertatzen den bezala, molekula anfipatikoz osatuta egongo ziren; molekula horiek, uretan daudenean, elkartzeko joera izaten dute egitura desberdinak sortuz (3-6 irudia). Bestalde, orain dela gutxi agertu da gantz-azidoz osatutako besikulen eraketa buztinek eragin dezaketela. Beraz, litekeena da buztinak, polimero organikoaren eraketan ez ezik, lehenengo mintzen agerpenean ere parte hartu izana.

Ez dakigu noiz gertatu zen sistema errepikatzaileen konpartimentazioa. Agian oso fenomeno goiztiarra izan zen, RNA sistema autokatalizatzaileen garaikoa, edo beranduagoa, RNA sistemak konplexuagoak izango zirenekoa. Edonola ere, segur aski konpartimentazioa ezinbestekoa izan zen RNAREN eta polipeptidoen arteko elkarrekintza (itzulpena) ezartzeko, horrela bakarrik izango baitzen posible kode genetiko zehatza garatzea.

Lehenengo zelulak prokariotoak ziren

Lehenengo zelulak mintz batez mugatutako barrunbeak izango ziren, non RNAz eta polipeptidoz osatutako sistema errepikatzaileak egongo ziren. RNA-geneak eta produktu peptidikoak laburrak izango ziren; segur aski, gene-kode batzuk sortu ziren, baina kode bakar bat izan da arrakastatsua: izaki bizidun guztietan gene-kodea berdina da. Horrek adierazten du gaurko zelula guztiak lerro zelular beretik eratorriak direla.

Lehenengo molekula informatiboa RNA zen, baina gaurko zelula guztietan informazioa DNAn metatzen da, eta ez RNAn (3-7 irudia). Zein da DNAREN abantaila? DNA kate bikoitz batez osatuta dago (bi harizpi osagarri osatua), askoz gogorragoa eta egonkorragoa. Gainera, errazago konpon daiteke mutazioak gertatzen direnean: kate bat eredu gisa hartzen da bestea konpontzeko. Ezaugarri horiengatik, DNA molekula handiagoa izan daiteke, eta informazio gehiago (gene gehiago) eraman dezake. DNAk, beraz, RNA ordezkatu zuen (ordezkapena oso goiz gertatuko zen), eta, ondorioz, zelulak konplexuago bihurtu zitezkeen. Hortik aurrera, DNA informazio genetikoaz arduratuko zen, proteina katalizatzaile nagusi bihurtuko ziren, eta RNA bitartekari moduan geratuko zen DNAREN eta proteinen artean.

Bestalde, zelula primitiboetan erreakzio metaboliko sinpleak gertatzen ziren. Segur aski, lehenengo zelulak heterotrofoak izango ziren: molekula organiko sinpleak inguruetik zuzenean hartu eta erabiltzen zituzten beste osagaiak ekoizteko edota energia lortzeko. Litekeena da glukolisia izatea garatu zen bide metaboliko zaharrenetarikoa: bide anaerobioa da, eta zelula guztietan gertatzen da.

Biziaren jatorriaren jokalekua: zopa prebiotikoa, isuri termalak edo mineralen azaleko poroak

Non sortu zen bizia? Ikuspegi tradizionalaren arabera, biziaren agerpena uretan gertatu zen, itsaso primitiboaren sakonera gutxiko eremuetan. Denborarekin, molekula organikoen aniztasuna gero eta handiagoa izango zen eremu horietan (**zopa prebiotikoa**); gainera, lurrunketaren eraginez, molekulen kontzentrazioa bereziki altua izango zen; horrek guztiak molekulen kondentsazioa erraztuko zuen, eta, hortaz, polimero zelularren agerpena. Ikuspegi horren arabera, zelulak gainazaleko uretan sortuko ziren, molekula organikoen metaketaren ondorioz.

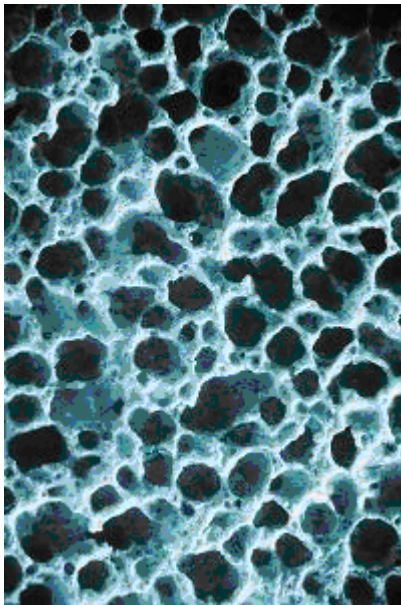
Baina, benetan posible izan zitekeen metaketa hori Lur primitiboaren baldintzetan? Egia da ez zegoela ez oxigenorik ez izaki bizidunik (gaur egun materia organikoaren degradazioa eragiten duten eragileak); hala ere, mundu prebiotikoan erradiazio ultramorea oso altua izango zen, eta, haren eraginez, molekulak apurtuko liriateke, batez ere gainazalean zeudenak, eta polimeroen metaketa galaraziko zuten.

Arazo hori saihesteko, beste jokaleku bat proposatu da: bizia Lurraren gainazaletik oso urrun agertu zen, itsasoaren hondoko isuri hidrotermalen ondoan. Hipotesi horren arabera, lehenengo zelulak termofiloak izango ziren, gaur egun gune ekologiko horretan bizi diren arkeobakterioak bezalakoak (3-8 irudia). Zelula horiek anaerobioak dira, eta energia geotermikoa erabiltzen dute beren metabolismoa sustatzeko.

Azkenik, biziaren garapena ahalbidetuko zuen beste mekanismo bat plazaratu da azken urteotan: lehenengo sistema biziak mineral porotsuen gainazalean garatuko ziren. Hipotesi horren arabera, poroak oso egitura egokiak izango ziren sistema kimiko konplexuak, hasieran, eta gero, zelulak sortzeko: alde batetik, osagaiak biltzeagatik (konpartimentazioa), eta, beste alde batetik, ingurune baldintza bortitzen aurrean babesa ematen dutelako.



A)



B)

3-7 irudia. A) Beharbada, lehenengo zelulak termofiloak izango ziren (iturria: Wikipedia). B) Euskarri porotsuak egokiak izan omen ziren lehenengo zelulak sortzeko.

ZELULA PROKARIOTOEN EBOLUZIOA ETA ZELULA EUKARIOTOEN AGERPENA

Onartzen da zelula zaharrenak prokariotoak direla. Lurrean bizi dira sortu zirenetik gaur egun arte, ia 4.000 milioi urtez. Epe luze horretan, prokariotoak oso gutxi aldatu omen dira egiturari dagokionez. Hala ere, Lurraren kolonizazioa oso fenomeno goiztiarra izan zen: erregistro fosilak adierazten duenez, zelulak leku guztietan barreiatu ziren, eta baldintza desberdinetara moldatu ziren. Horretarako, zelulek hainbat elikagai-mota eta energia-iturri erabiltzen ikasi behar izan zuten; hau da, bide metaboliko berriak garatu zituzten. Jarduera metaboliko horren ondorioz, prokariotoek Lurraren baldintzak zeharo aldatu dituzte: atmosfera oxidatzaile bihurtu zen. Aldaketa horrek eragin handia izan du eukariotoen agerpenean, eta, oro har, organismoen eboluzioan.

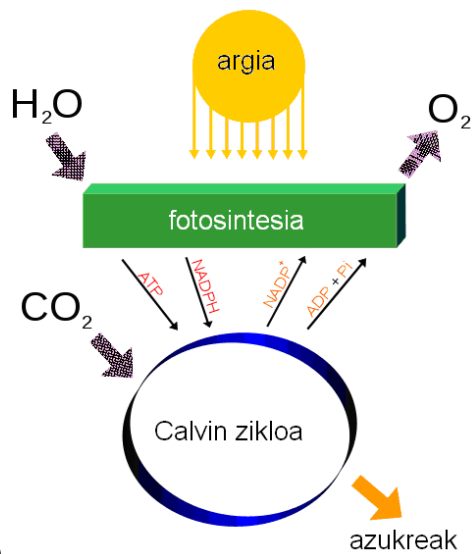
Prokariotoek oso goiz asmatu zuten fotosintesia

Segur aski, lehenengo zelula prokariotikoak anaerobikoak eta heterotrofoak izango ziren. Ingurunean molekula organiko ugari zegoen bitartean, arazorik gabe bizi eta ugalduko lirateke. Hala ere, zitekeena zen elikagaiak gero eta urriago izatea, zelularen jardueraren ondorioz, hain zuzen. Murriztapen hori saihesteko, zelulek estrategia berriak asmatu zituzten, eta autotrofo bihurtu ziren: molekula ez-organikoetatik abiatuta, molekula organikoen sintesia egitea lortu zuten. Bide metaboliko horien artean fotosintesia dugu, agian historia ebolutiboan zehar garatu den bide metaboliko garrantzitsuen.

Fotosintesian argiaren energia erabiltzen da CO_2 -a erreduzitzeko eta horrela molekula organikoak sintetizatzen. Segur aski, lehenengo fotosintetizatzaileek hidrogeno atmosferikotik (H_2) edo jarduera bolkanikoen ondorioz sortzen zen sulfurotik (SH) atera zuten CO_2 -a erreduzitzeko behar den gaitasun erreduzitzailea; gaurko sufre-bakterioek egiten duten bezala (SH_2 -a oxidatu, eta sufre molekularra sortzen dute) (3-8 irudia). Beste bakterio batzuek, ordea, H_2O -a erabiltzen ikasi zuten: bide metaboliko horretan ur molekula apurtzen da argiaren energia erabiliz; H_2 erabiltzen da CO_2 -a erreduzitzeko, eta hondakin moduan oxigeno molekularra (O_2) askatzen da (hortik, fotosintesi oxigenikoa). Ura oso molekula ugaria zenez, bide metaboliko berria izugarriko abantaila izango zen, eta hura asmatu zuten zelulak (agian zianobakterioak) leku guztietara hedatu ziren.

Fotosintesi bakterianoaren eraginez, atmosfera oxidatzaile bihurtu zen

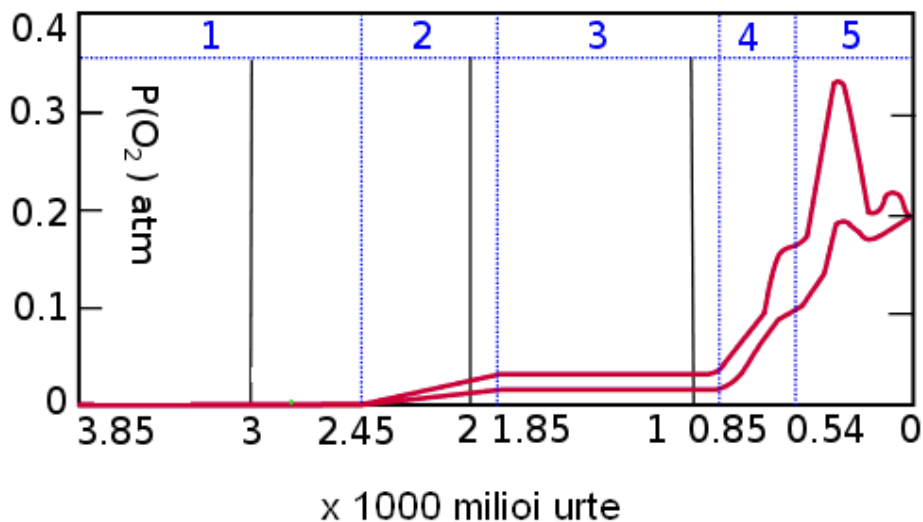
Fotosintesi oxigenikoaren asmakuntzak eragin handia izan zuen ondorengo zelulen eboluzioan, ingurune erreduzitzaile batetik ingurune oxidatzaile batera igaro baitzen. Hasieran, oxigenoaren agerpena hondamendi hutsa izango zen zelulentzat: zelula guztiak anaerobioak ziren, eta oxigenoa



3-8 irudia. Bide metabolikoak. A) Sulfuroa oxidatzen duten sufre-bakterioak. B) Fotosintesia (iturria: Wikipedia).

produktu toxikoa izango zen haientzat. Zenbait zelulak, ordea, oxigenoa erabiltzen ikasi zuten energia lortzeko (ATPa sintetizatzeke), hau da, arnasketa asmatu zuten. Gero, zelula aerobioak garatu ziren, eta Lur osoan barreiatu ziren, zelula anaerobioak baztertuz: gaur egun, organismo gehienek, prokariotoek barne, arnasketa erabiltzen dute.

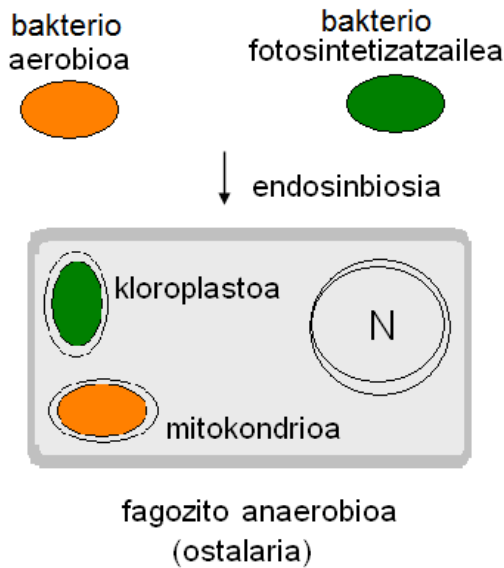
Zianobakterio fosilak aurkitu dira 3.000 milioi urteko harkaitzetan; beraz, oxigenoaren askapena oso goiz gertatu zen. Oxigenoaren metaketa atmosferikoa, berriz, prozesu progresiboa izan zen, eta gaurko kontzentrazioa (% 20) duela 1.500-500 milioi urte inguru lortu zen (3-9 irudia). Nolanahi ere, zelula anaerobioek gero eta zailtasun handiagoak izango zituzten irauteko. Egoera berriari moldatzeko, segur aski, hainbat estrategia asmatu zituzten anaerobioek; haietako bat bereziki garrantzitsua izan da, hain zuzen ere, zelula eukariotoaren agerpeneraino iritsi zen bide ebolutiboa.



3-9 irudia. Oxigenoaren metaketa atmosferikoa (iturria: Wikipedia)

Zelula eukariotoa zelula anaerobio eta aerobioen arteko sinbiosiaz sortu zen

Arnasketa oso bide metaboliko eraginkorra da, eta nahitaezkoa da eukariotoen behar energetikoak sustatzeko. Zelula eukariotoan, mitokondrioetan gertatzen da arnasketa; organulu horiek, beraz, zelularen energia-zentroak dira. Gaur egun onartzen da mitokondrioen agerpena funtsezkoa izan zela lehenengo zelula eukariotoak sortzeko. Hipotesi horren arabera, zelula eukariotoa hainbat zelularen arteko sinbiosiaz sortu zen. Haietako bat mitokondrioaren aitzindaria izango zen: zelula prokarioto aerobio bat.



3-10 irudia. Mitokondrio eta kloroplastoen jatorri ebolutiboa.

Simbiosia bi espezie edo organismoren arteko harreman iraunkorra da, eta, gehienetan, bientzat onuragarria. Zelula eukariotoa agertzea eragin zuen fenomeno sinbiotikoan zelula ostalaria anaerobioa izango zen. Zelula horretan prokarioto aerobio bat sartu, eta han geratu zen, **endosimbionte** bihurtuta. Simbiosi-prozesu horretan, bi zelulek probetxua atera zuten: ostalariak elikagaiak eta babesa ematen zizkion endosimbionteari, eta hark energia eta oxigenoaren aurkako babesa ostalariari. Denborarekin, endosimbionte horiek gaurko mitokondrioak bihurtuko ziren (3-10 irudia). Antzeko prozesu baten bidez sortu ziren kloroplastoak, baina zelula aitzindaria fotosintetizatzailea izango zen. Landare-zeluletan badaude kloroplastoak eta mitokondrioak ere; beraz, bi fenomeno endosimbiontiko gertatuko ziren (3-10 irudia).

Zer froga edo ebidentzia dago hipotesi hori sustatzeko? Batez ere, mitokondrio eta kloroplastoen ezaugarriak: bi organuluek gai genetikoak gordetzen dute (DNA molekula zirkularra, bakterioek bezala), erribosomak dituzte, eta oinarriko funtzio genetikoak (erreplikazioa, transkripzioa, itzulpena) gertatzen dira organuluen barruan. Gainera, mintz bikoitz batez inguratuta daude (bata zelula aitzindariaren mintz plasmatikoa izango litzateke, eta, bestea, zelula ostalariatik eratorria), eta bakterioak bezala ugaltzen dira.

Litekeena da zelula eukariotoaren barne-konpartimentuak mintz plasmatikoen inbaginazioz agertu izana

Zelula eukariotoek, mitokondrioak izateaz gainera, beste ezaugarri batzuk ere badituzte: besteak beste, gai genetikoak barrunbe batean gordea izatea eta barneko mintz-sistema konplexu bat izatea. Nola agertu ziren egitura horiek? Onartzen den ereduaren arabera, hasieran zelula eukariotoaren aitzindariak horma zelularra galdu zuen, eta mintz plasmatikoa inbaginazio edo tolesturak agertu ziren.

Tolestura horiek gero eta ugariak izango ziren; aldi berean, zelularen tamaina handiago bihurtu zen. Denborarekin, tolesturak mintz plasmatikotik askatu ziren, eta zelularen barruan geratu ziren, horrela barneko konpartimendu itxiak sortuz. Mintz horietariko batzuek DNA inguratu zuten, eta, hala, nukleoa sortu zen. Bestalde, zelula gero eta konplexuagoa zenez, zitoeskeletoa garatu zen, zelula antolatze eta kromosoma eukariotiko ugari banatzeko. Era berean, eukariotoaren aitzindariak funtzio berri bat garatu zuen: fagozitosia (segur aski, hori ere zitoeskeletoari esker). Agian, etapa horretan fagozito primitibo anaerobioak zelula aerobioak barneratuko zituen, erlazio endosimbiontiko ezarriz, eta, denborarekin, mitokondrioak (edota kloroplastoak) sortu ziren.

Proposatu da fagozito primitiboaren aitzindaria arkeobakterio bat izan zela, baina puntu hori oso iluna da. Era



A)

3-12 irudia. A) Giardia protozoa (iturria: Wikimedia/Janice Carr).

berean, ez dago argi noiz agertu ziren lehenengo zelula eukariotoak. Arnasketa nahitaezkoa da zelula eukariotoen metabolismoa sustatzeko; beraz, benetako zelula eukariotoak oxigenoaren metaketa gertatu ondoren agertu ziren nahitaez. Hala ere, fagozito primitiboaren eboluzioa askoz lehenago hasiko zen agian.

Zein da gaur egun existitzen den eukarioto sinpleena?, edo, beste modu batean esanda, badago bide ebolutibo hori islatzen duen tarteko formarik? Protozoo bat, Giardia izenekoa, zelula eukarioto primitiboena izan liteke. Giardiak badauka nukleoa (bi nukleo ditu) eta zitoeskeletoa, baina ez dauka mitokondriarik, ezta beste organulurik ere (3-12 irudia). Dena den, badago beste aukera bat ere: Giardia zelula eukarioto endekatua da. Azken finean, parasito bat da (giza zeluletan bizi izaten da, bizkarroi moduan), eta agian organuluak galtzea bizimoduaren ondorioa izan da.

Zelula eukariotoaren genomak bere jatorri ebolutiboa islatzen du

Endosinbiosia gertatu ondoren, zelula eukarioto primitiboan, hasieran, bi genoma zeuden: ostalariarena eta endosinbiontearena. Gero, endosinbiontea organulu zitoplasmatiko bihurtu zen, eta, horrekin batera, endosinbiontearen informazio genetikoa nukleora pasatu zen: gene asko ostalariaren genomaren osagai bihurtu ziren. Organuluaren barruan, berriz, gene gutxi geratu ziren; horiek dira gaurko mitokondrio edo kloroplastoen genoma osatzen dutenak.

Gaurko zelula eukariotoen genoma aztertzen badugu, haren jatorri hibridoa agerian geratzen da. Oro har, prozesu metabolikoetan inplikaturik dauden gene eukariotikoak eubakterioetatik gertuago daude; oinarrizko prozesu genetikoekin erlazionaturik daudenak, ordea, hau da, DNAREN erreplikazioan, transkripzioan eta itzulpenean inplikaturik daudenak, arkeobakterioetatik gertuago daude.

Biziaren zuhaitza: hiru adar

Azterketa genomikoak agerian utzi du nolakoak diren izaki bizidunen arteko erlazio ebolutiboak. Azterketa horretan oinarrituz eraiki den zuhaitzak hiru adar ditu: arkeobakterioak (*archaea*), eubakterioak (*bacteria*), eta eukariotoak (*eucarya*) (2-13 irudia).

Hiru adarrak enbor komun batetik sortuak dira, eta oso goiz aldenitu ziren. Genomaren sekuentziak oso dagoeneko lortu da hiru taldeetako hainbat espezieetan: 100 genoma prokariotoetan (12 filum, eta, haien artean, 16 arkeo) eta mota guztietako eukariotoak (giza genoma barne). Genoma horiek konparatuz agertu da 239 gene-familia zelula gehienetan agertzen direla; haietatik gehienak transkripzioan, itzulpenean eta aminoazidoen metabolismo eta garraioan inplikaturik

daude. Gene horiek izan litezke, hain zuzen ere, biziaren hiru adarren herentzia komuna, hau da, lehenengo zelulek izango zituzten geneak.

GAIA JORRATZEKO GALDERAK

- Zein izango ziren Lur primitiboaren ezaugarriak?
- Zer frogatzen dute sintesi prebiotikoko esperimenduek?
- Zergatik da hain zaila polimero organikoen berezko sintesia?
- Zer dira erribozimak?
- Zertan datza “RNAren mundua” hipotesia?
- Zein da konpartimentazioaren garrantzia zelulen agerpenean?
- Noiz eta non sor zitezkeen lehenengo zelulak?
- Nolakoak izango ziren lehenengo zelulak?
- Zer garrantzi izan du fotosintesiak zelulen eboluzioan?
- Zein da teoria endosinbiotikoaren proposamena?
- Zein izan litezkeen mitokondrioaren eta kloroplastoen aitzindariak?
- Zer urrats gertatuko ziren zelula eukariotoa garatu arte?
- Zer esaten du genomikak zelulen arteko erlazio ebolutiboari buruz?