

# **SEJTBIOLÓGIA**

biomérnök hallgatók számára

**Novák Béla**  
egyetemi tanár

Copyright © 1998

BME, Mezőgazdasági Kémiai Technológia Tanszék

## Bevezető

A természetben **hierarchia** uralkodik. Az atomok atommagból és elektronokból épülnek fel, az atomok pedig molekulákat alkotnak. A molekulák atomi szerveződésével a kémia tudománya foglalkozik. A molekulák összekapcsolódásával óriásmolekulák jönnek létre, melyek tanulmányozása a biokémia tárgya.

A biológiában is hasonló hierarchia érvényesül. A szövetek sejtekből állnak, a szövetek pedig szerveket alkotnak. A szervek szervrendszereket képeznek és ezek összessége alkotja a szervezetet (egyedet). Az azonos fajba tartozó egyedek populációba tömörülnek és a különböző fajok populációi társulásokat alkotnak.

Láthatjuk, hogy a biológiai szerveződés **strukturális** alapegysége a SEJT. A sejt azonban nemcsak strukturális, hanem **funkcionális** egysége is az életnek: a sejt az a legkisebb egység, ami az ún. életjelenségeket (növekedés, szaporodás) mutatja.

Mivel a sejtek molekulákból épülnek fel, a természeti hierarchia kémiai és biológiai szintje igen szoros kapcsolatban áll egymással.

A sejtek -kevés kivételtől eltekintve- olyan mikroszkopikus képződmények, melyek egy vegyi gyárhoz hasonlíthatók. Akárcsak a gyárak, a sejtek sem egyformák, mégis vannak általános jellemzői. E sejtbiológiai kurzus célja, hogy megismerjük egy ilyen mikroszkopikus vegyi gyár működését és törvényszerűségeit.

Mi mindenben hasonlítanak a sejtek a vegyi gyárakra? Először is, hasonlóan a gyárakhoz, a sejtek a térnek egy szigorúan körülhatárolt részét képviselik, melyet a külvilágtól -akárcsak a gyárat a gyárfal- sejtmembrán (ill gyakran sejtfal) választ el. A környezettől való elválasztódás azonban nem jelent elszigeteltséget, hiszen akárcsak a gyárak, a sejtek is intenzív anyag- és energia-forgalomban állnak a környezetükkel (**nyílt rendszerek**).

Mi történik a gyár belsejében? A sejtekben, -akárcsak a hétköznapi gyárakban- anyag és energia átalakítás folyik. A sejtekben e folyamatok összességét **anyagcsere**nek (**metabolizmus**) hívjuk, hangsúlyozni kell azonban, hogy ez nem a környezettel folytatott anyagcsere utal!

A hétköznapi gyárakban **gépek**, hasznos munkát végző szerkezetek dolgoznak, amelyek az emberi tudásban felhalmozódott **információ** alapján készülnek és működnek. A sejteknek is "gépekre" van szüksége; a sejtekben ezeknek a gépeknek a **fehérjék** felelnek meg. Fehérjék

végzik a sejtekben végbemenő kémiai átalakításokat (**enzimek**). Akárcsak az ember által készített gépek előállításához, a fehérjék létrehozásához is információra van szükség. Ezt a szerepet a sejtekben a nukleinsavak töltik be. A sejtek ráadásul olyan gyárak, ahol a gépek előállítása is magában a gyárban következik be.

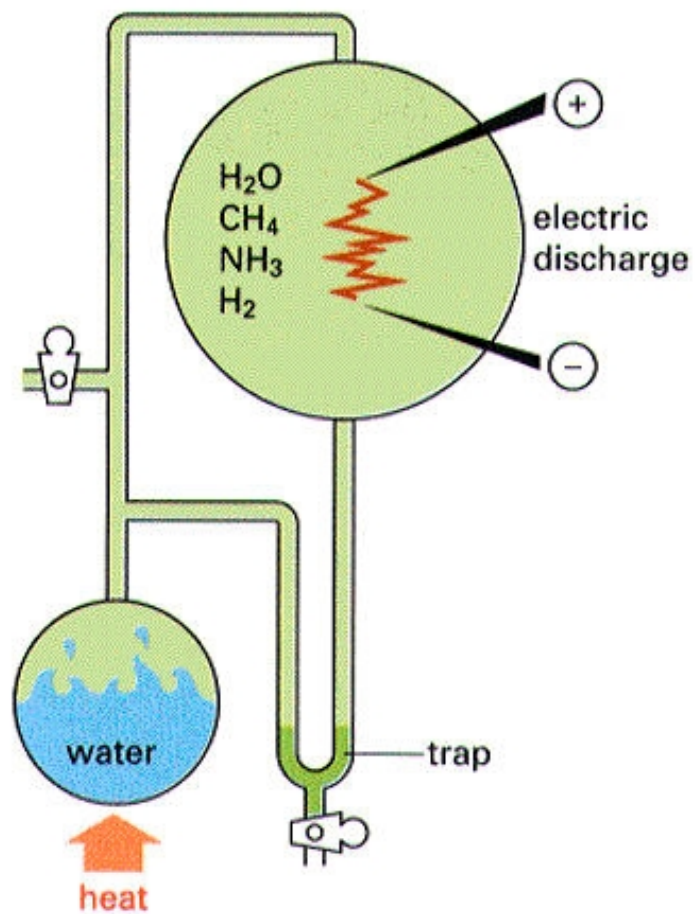
## A sejtek evolúciója

### A molekuláktól az első sejtekig (prebiológiai evolúció)

#### Egyszerű biomolekulák prebiotikus körülmények között is képződtek

Földünk kb. 4.6 milliárd éve keletkezett. A szakemberek még vitatkoznak azon, milyenek is voltak a földi feltételek az első milliárd év alatt. Nem tudjuk, hogy a légkör redukáló ill. neutrális jellegű volt-e, az azonban bizonyos, hogy sem oxigént, sem ózont nem tartalmazott. Ennek az volt a következménye, hogy a világrútból érkező különféle sugárzások szabadon eljuthattak a Földre és ez távol tartotta a rendszert az egyensúlytól.

Haldane és Oparin az 1920-as években vetették fel az élet kialakulásának spontán lehetőségét ilyen oxigénmentes környezetben.



Urey professzor (a Chicagói Egyetem oktatója) könyvet írt az égitestekről "The Planets" címmel, melyben megadta a Föld feltételezett légkörét. A professzor Miller nevű tanítványa pedig megpróbálta laboratóriumi kísérletben ellenőrizni, hogy milyen egyszerű szerves vegyületek képződhetnek ebben a légkörben az Oparin - Haldane hipotézis szerint. Miller gázkeveréket ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$  és  $\text{H}_2$ ) melegített vízzel, és elektromos szikrakisüléseket hozott létre, miközben hűtőn kondenzáltatta a vízgőzt és visszavezette azt az edénybe.

A vízgőz reakcióba lépett a gázeleggyel, és két hét után az 1-2. ábrán bemutatott vegyületeket lehetett kimutatni az oldatból. Természetesen a valóságban sokkal több idő (10-100 millió év) állt rendelkezésre ezeknek a vegyületeknek a kialakulására.

- 1.
2. A felsorolt vegyületek további reakciókba léptek egymással illetve más, az ósóceánban megtalálható vegyületekkel. A hidrogén-cianidból pl. nukleinsavbázisok (pl. adenin) keletkeztek, míg a
3. a formaldehidből komplikált reakciósorozatban (**formóz reakció**) szénhidrátok (pl. ribóz) képződtek.

Végeredményben elmondható, hogy a mai élőlényekben előforduló szerves molekulafajták minden reprezentánsa keletkezett az Urey-Miller kísérletben: aminosavak, cukrok, purin és pirimidin bázisok. Ezek a vegyületek bemosódtak az ósóceánba, és ott feldúsultak; ezt nevezzük "**Haldane-levesnek**". Ezek a molekulák az **építőkövei** a mai élőlényekben előforduló makromolekuláknak mint pl. az RNS, a DNS és a fehérjék. Tulajdonképpen sokkal több képviselője keletkezett ezeknek az építőköveknek, mint amit mai élőlények használnak. A ma élő sejtek fehérjeiben csak 20 féle aminosav, a ribonukleinsavaikban pedig csak 5 féle nukleotid fordul elő. Hogy miért pont ezek, azt nem lehet tudni.

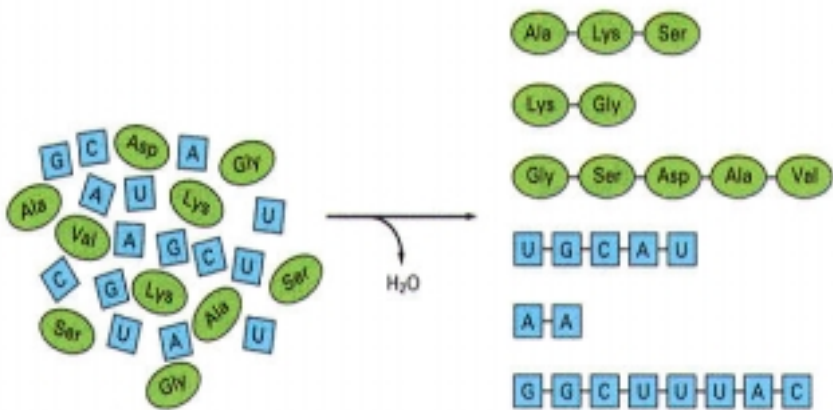
HCHO	formaldehyde
HCOOH	formic acid
HCN	hydrogen cyanide
$\text{CH}_3\text{COOH}$	acetic acid
$\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$	glycine
$\begin{array}{c} \text{CH}_3\text{CHCOOH} \\   \\ \text{OH} \end{array}$	lactic acid
$\begin{array}{c} \text{NH}_2\text{CHCOOH} \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$	alanine
$\begin{array}{c} \text{NH} - \text{CH}_2\text{COOH} \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$	sarcosine
$\begin{array}{c} \text{NH}_2 - \text{C} - \text{NH}_2 \\    \\ \text{O} \end{array}$	urea
$\begin{array}{c} \text{NH}_2\text{CHCOOH} \\   \\ \text{CH}_2 \\   \\ \text{COOH} \end{array}$	aspartic acid

Az Urey-Miller kísérletben az aminosavaknak és szénhidrátoknak két optikailag eltérő módosulata keletkezett, melyek a polarizált fényt ellentétes irányba forgatják (D és L konfiguráció). A mai élőlényekben viszont az aminosavaknak csak az L-formája (kivéve: baktériumok sejtfalát) és a szénhidrátoknak a D-formája fordul elő. Ennek a jelenségnek sem ismert még a pontos oka ill. magyarázata.

### Az aminosavak és nukleotidok spontán polimerizálnak

Az aminosavak peptidkötés létesítésével, a nukleotidok pedig foszfodiészter kötés képződése mellett polimerizálódhatnak. Mindkét reakció vízképződéssel jár, ezért vizes oldatban nem kedvezményezettek, azaz a polimerizációhoz energiára van szükség.

Az aminosavak és a nukleotidok polimerizációja



Ezt a problémát a mai élőlények úgy oldják meg, hogy aktivált építőelemeket polimerizálnak. Hogyan játszódhatott le a polimerizáció régen, az élet kialakulása előtt?

Az ősi Földön a polimerek kialakulásának az alábbi lehetőségei jöhettek számításba:

1. hő biztosíthatta a szükséges energiát a polimerizációhoz. Ennek bizonyítékául Sidney Fox kísérleteiben az aminosavak por alakú keverékénél (nem vizes oldat) 130-150<sup>o</sup>C-ra történő hevítést követően polipeptideket mutatott ki.
2. Bernal elmélete szerint agyagásványok katalizálhatták az első polimerizációkat, vagyis az ósóceán partján, a pocsolyákban keletkezettek az első biopolimerek.

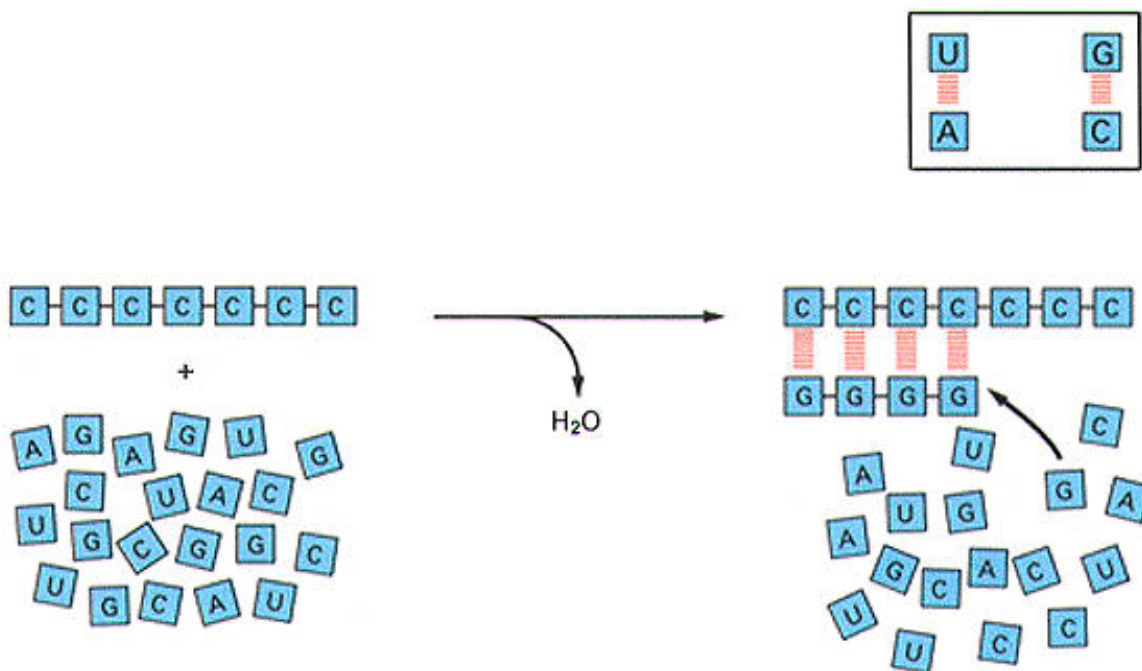
Az élőlények által szintetizált biopolimerekkel szemben azonban ezekben az abiotikus úton végbemenő polimerizációkban a nukleinsavak és a fehérjék változó lánchosszúságban és random összetétellel keletkeztek.

## A polinukleotidok saját szintézisüket képesek irányítani

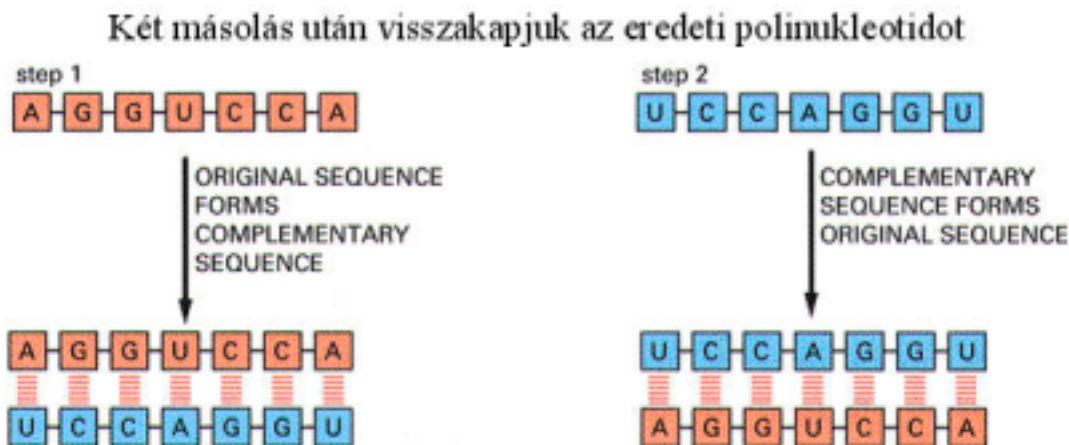
A sejtek alapvető tulajdonsága az **önreprodukciós** képesség, vagyis hogy önmagukkal azonos utódot képesek létrehozni (egy sejtől két sejt lesz). Kémiai rendszerekben sem ismeretlen ez a képesség, de a kémiában inkább **autokatalitikusnak** hívjuk azt a folyamatot, amikor a reakció végterméke elősegíti önmaga képződését. Fontos kérdés, hogy a önreprodukciós képesség mikor jelent meg az evolúció során?

Az autokatalízis megjelenését Gánti Tibor **chemoton elmélete** a kémiai folyamatokban, míg Manfred Eigen **hiperciklusa** a makromolekulák képződésében jelöli meg elsőként.

## A polinukleotidok saját szintézisüket képesek irányítani



Melyik makromolekulának van autokatalitikus tulajdonsága? A polipeptidek jó katalizátorok, de nem tudják saját szintézisüket nukleinsavak nélkül irányítani. Ezzel szemben a polinukleotidok képesek önmaguk szintézisének irányítására **komplement pár képzés** révén. Az egyik szál **templátként** szolgál egy másik szál képződéséhez. Például egy poli-C egy poli G lánc felépülését irányíthatja és *vice versa*. Könnyű belátni, hogy két másolás után visszkapjuk az eredeti polinukleotid láncot (templát -> replika -> templát).



Ez a mechanizmus azonban csak a **potenciális lehetőségét** teremti meg az önreprodukciós képességnek, mert a folyamat önmagában nagyon lassú, és ahhoz, hogy mérhető sebességgel játszódjon le, valamilyen formában katalízisre van szükség. Manapság a katalitikus funkciót a specifikus fehérjék, enzimek biztosítják a nukleinsavak másolásához. Ha végiggondoljuk a dolgot, máris a legősibb tyúk-tojás problémával találjuk magunkat szemben: mi volt előbb? Nukleinsavak vagy fehérjék? A mai élőlényekben az RNS-ek szintézisét fehérjék katalizálják, az RNS-ek pedig a fehérjeszintézist segítik. A **prebiotikus (ős-) leves**-ben lehettek primitív polipeptidek, de az RNS molekulák ritkák maradtak, ha ők maguk nem tudták a **saját szintézisüket** serkenteni. Sokáig azt hittük, hogy a nukleinsavak csak információ tárolásra és átvitelre képesek, de katalízisre nem.

### Specializált RNS-ek biokémiai reakciókat katalizálnak

Az önreprodukáló struktúrák létrejöttének megértésében fontos szerepe volt annak a néhány évvel ezelőtti felismerésnek, miszerint az RNS-ek kémiai reakciók katalízisére is képesek. A katalitikus RNS neve **ribozim**.

Az RNS katalitikus tulajdonságát háromdimenziós szerkezete (feltekeredése) határozza meg. Az RNS molekula feltekeredési módja pedig a szekvenciájából következik, a molekulán belüli komplementer (kiegészítő) szakaszok ugyanis párosodni tudnak egymással: pl. egy GGGG párosodni tud egy CCCC-vel azonos molekulán belül és egy komplex 3 dimenziós szerkezet jön létre.

## Az önreprodukáló molekulák természetes szelekciója

Tételezzük fel, hogy létrejött egy megfelelő nukleotid sorrendű RNS, mely katalizátora lehetett egy másik RNS templát polimerizációs replikációjának. Abban az esetben, ha ez a templát éppen a saját kópiája, ez a bizonyos RNS molekula **autokatalitikusan** elszaporodik. Elvileg több ilyen autokatalitikus rendszer is kialakulhatott, és ekkor megindult köztük a versengés. Miért versenyeztek? A versengés az építőkövekért, vagyis a táplálékért folyt. A nukleinsavak másolása során hibák is keletkeztek, és az új kópiák nem feltétlenül voltak azonosak a kiindulási templáttal. Könnyen észrevehetjük, hogy azok a változatok szaporodtak el az építőkövekért folytatott versenyben, melyek katalitikus aktivitásukat javítani tudták a “szüleikhez” képest vagyis rátermettebbek lettek. Megfigyelhetjük, hogy az önreprodukáló molekulák körében a természetes szelekció (variáció és a rátermettebb elszaporodása) érvényesül.

## Információ áramlás a polinukleotidoktól a polipeptidekig

3.5 - 4 milliárd évvel ezelőtt a Földön valószínűleg önreprodukáló RNS molekulák és különféle polipeptidek lehettek jelen. A makromolekulák között ugyanolyan verseny folyt az prekursorokért, akárcsak mai a élőlények között a táplálékért. De ki nyerte a végső versenyt? Hosszú távon semmiképpen nem azok az RNS-ek, akik maximálták a katalitikus aktivitásukat. Az RNS-ek katalitikus aktivitása ugyanis korlátozott! Hosszú távon az az autokatalitikus rendszer nyerte a versenyt, amelyben a katalitikus RNS-ek önzetlen alapon segítették olyan RNS-ek másolását, amelyeknek nem volt katalitikus funkciója az RNS-ek másolásában. Ezek az RNS-ek így más funkcióra specializálódhattak és ez a más funkció a polipeptidek szintézisének irányítása volt.

De hogyan tudja egy polinukleotid egy teljesen másfajta polimer (fehérje) aminosav sorrendjét meghatározni? Ehhez a következőkre van szükség:

1. polipeptid sorrendjét meghatározó **RNS templátra**,
2. az aminosavakat polipeptiddé kapcsoló **katalizátor RNS-re**, és
3. olyan **adapter RNS** molekulákra, amelyek specifikus aminosavakat kötnek.

A templát és az adapter molekulák a komplementer bázispár képzés elve alapján összekapcsolódnak, és ezáltal a templát az adaptereken keresztül meghatározza a fehérje aminosav sorrendjét. A katalizátor RNS-ek pedig összekapcsolták az aminosavakat, és így mehetett végbe az ősi protein-szintézis.



Ma a protein szintézist a **riboszómák** végzik, melyek RNS-ekből (rRNS-ek) és fehérjékből álló szerkezetek. Az a tény, hogy a mai fehérjeszintézisben is fontos szerepe van az rRNS-eknek, sejtetni engedi, hogy az ősidőkben egyedül ők voltak a katalizátorok.

Az RNS irányította protein szintézishez szükség van egy **kódra**, aminek alapján a nukleinsav szekvencia meghatározza a fehérje aminosav sorrendjét. Ez a kód látszólag teljesen azonos a ma élő élőlényekben, ezért feltehetően azok mind egy közös őstől erednek.

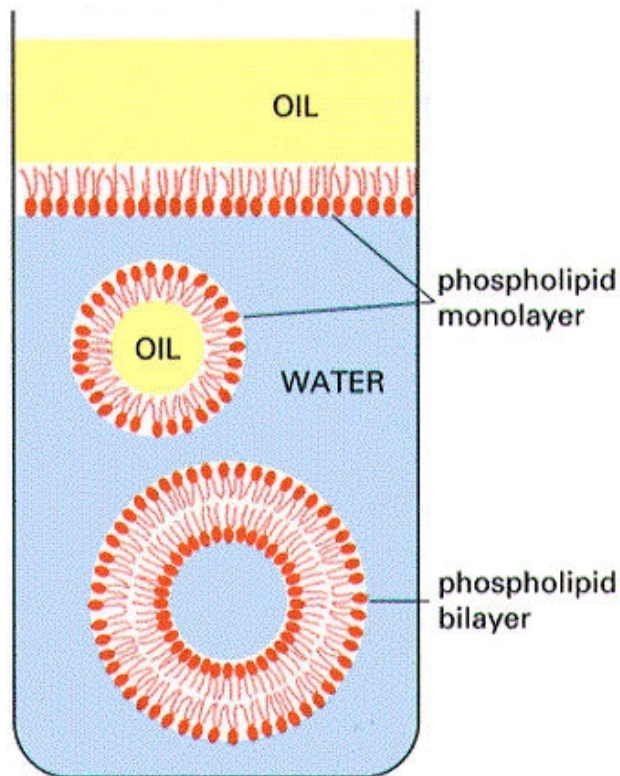
Ez a közös ős az RNS-irányított proteinszintézis kimunkálásával olyan fehérjék szintézisét oldotta meg, melyek hasznos **gépeknek** bizonyulhattak:

- az RNS-ek másolásában (pl. RNS polimeráz), valamint
- a gépek (proteinek) gyártásában (riboszóma fehérjék).

Mivel a fehérjék sokkal jobb katalizátorok, mint a nukleinsavak, ezért ez az ős olyan előnyhöz jutott az evolúciós küzdelemben, hogy ezt a vívmányát sohasem feledte el.

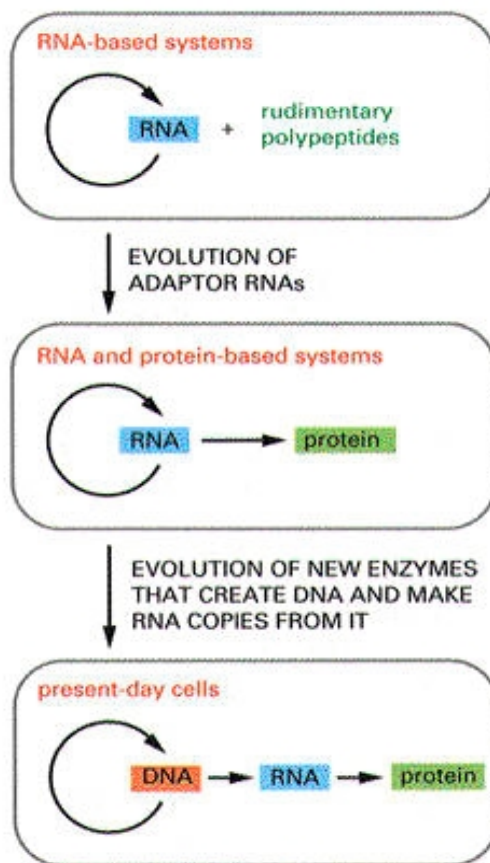
### Membrán definiálta az első sejtet

Az RNS segítségével szintetizálódott fehérjemolekula nem feltétlenül csak azt a bizonyos RNS-t tudta segíteni a reprodukciójában, ami őt létrehozta, amíg ki nem alakult a plazmamembrán. A plazmamembrán kialakulása egy meghatározott kompartment létrehozását jelenti, amelyben együtt maradhatnak azok az RNS-ek és fehérjék, melyek egymás képződését segítik elő. Ez a funkció egy másik molekula csoport által valósulhatott meg, amely alkalmasnak bizonyult határfelület létrehozására. A hidofil és hidrofób részekből álló foszfolipidek kiválóan alkalmasak erre a funkcióra, mivel vizes oldatban spontán **kettős réteget (bilayer)** alkotnak. A prebiotikus levesben tehát a spontán aggregálódó foszfolipidek vehették körül a replikálódó RNS és fehérjemolekulákat.



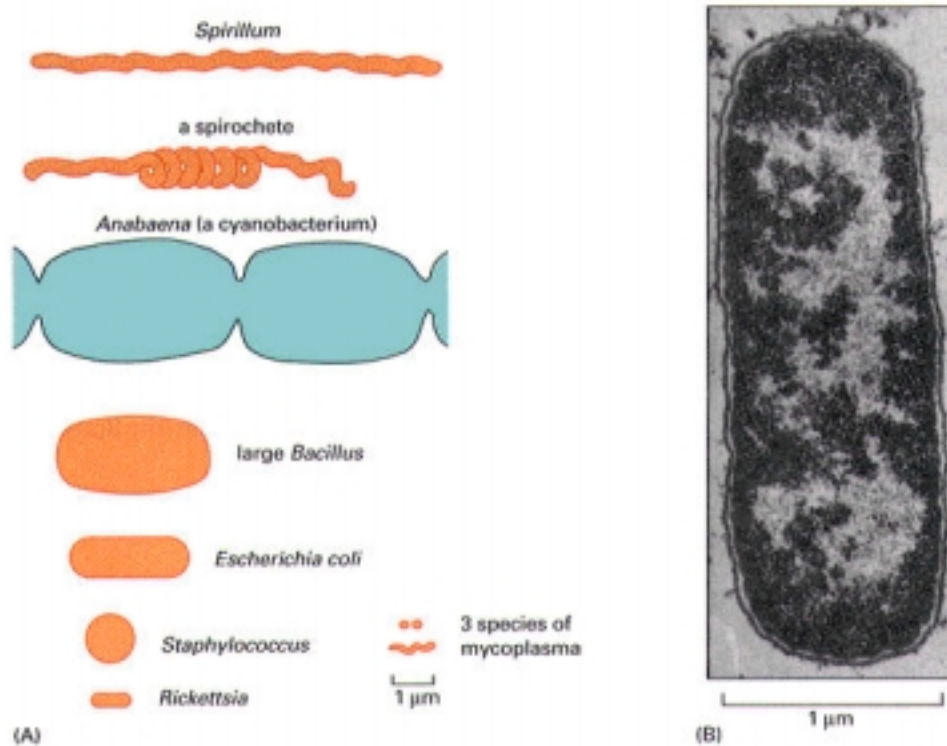
## Minden ma élő sejtben a DNS az örökítő anyag

Idáig egy spekulatív prebiológiai történettel ismerkedtünk meg, amely talán fő vonalaiban érvényes, és aminek eredményeként 3-4 milliárd évvel ezelőtt kialakult az első primitív sejt. Ez a sejt feltehetően a ma élő legegyszerűbb és legkisebb (átmérőjük  $0.3\ \mu\text{m}$ ) sejtekhez, az ún. **mikoplazmákhoz** (csupasz, sejtfall nélküli baktériumok) volt hasonló. Van azonban egy döntő különbség a Földön kialakult első sejtek és a ma élő legegyszerűbb sejtek között: nevezetesen, hogy a mai “modern” sejtekben kivétel nélkül a DNS az örökítő anyag és nem az RNS. Ez azt jelenti, hogy az evolúció során valamikor az RNS molekulák, melyek kezdetben mind információ tároló és katalitikus szerepet is betöltöttek, nemcsak a katalitikus funkciójukat adták át a fehérjéknek, hanem az információt hordozó szerepüket is elvesztették illetve átadták a DNS-nek. Ezt követően az RNS-ek mint összekötő kapocs maradtak meg a DNS és a fehérjék között.



## A prokarióták kialakulása és fejlődése

A ma élő sejtek **közös őse** tehát mintegy 3-4 milliárd évvel ezelőtt születhetett meg, és kedvező tulajdonságainak köszönhetően túlszaporodott a vetélytársain. Ennek a sejtnek feltehetően nem volt különösebb belső struktúrája, és ma élő legközelebbi rokonait a Földön **prokarióta (elősejtmagvas: pro = előtt, karion = mag)** sejteknek hívjuk. A prokarióták (**baktériumok**) tehát a közös őse legközelebbi rokonai, akik 2 milliárd éven keresztül egyedül uralták a Földet. Ezek ma is a legegyszerűbb organizmusok a Földön, amelyek igen változatos formákat illetve alakot öltenek. Méretük mikrométer nagyságrendű. Sejtfelépítésük azonban már sokkal komplikáltabb mint a közös őse volt, hiszen a mikoplazmákat leszámítva sejtmembránjukat sejtfall határolja. A természetben a legváltozatosabb helyeken előfordulnak, mert biokémiailag igen változatosak.



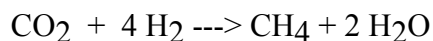
A prokarióták két nagy csoportját szokás megkülönböztetni:

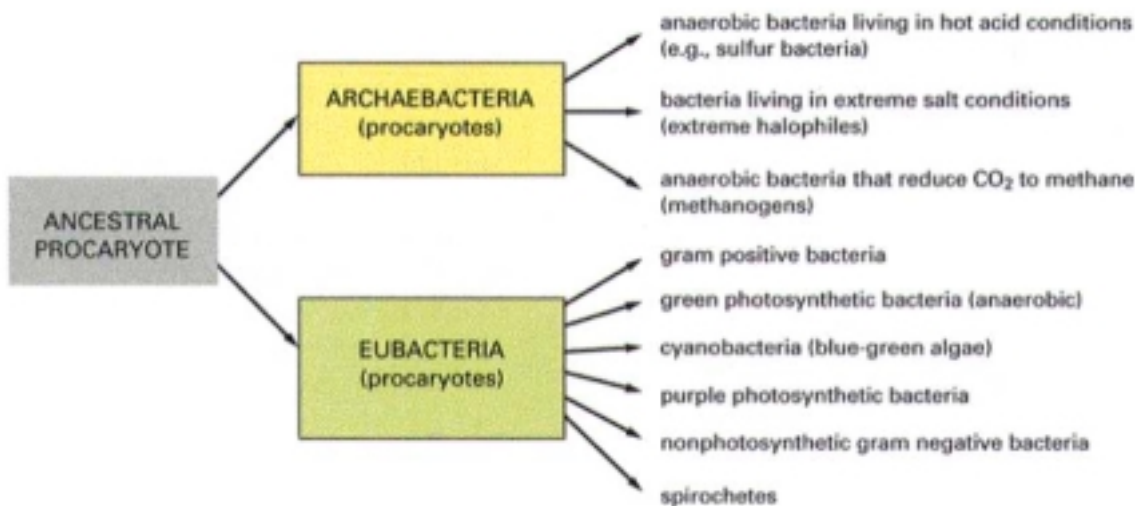
1. eubaktériumok (valódi baktériumok),
2. ősbaktériumok (archaeobacteria).

Az ősbaktériumok olyan szokatlan élőhelyeken élnek, mint mocsarak, tengerek mélye vagy hőforrások, amelyekben a körülmények nagyon hasonlítanak az ősi Földön uralkodó viszonyokhoz. Ebből régebben arra következtettek, hogy ennek a prokarióta csoportnak a tagjai alakultak ki először a Földön, és erre utal az ősbaktérium elnevezés is. A molekuláris vizsgálatok azonban kiderítették, hogy ez az állítás nem érvényes és az ősbaktériumok semmivel sem ősbibek a valódi baktériumoknál. Mindössze arról van szó, hogy e két prokarióta csoport fejlődése nagyon korán elvált egymástól.

Az ősbaktériumok három nagy csoportját szokás megkülönböztetni:

- *thermoacidofilek*: forró, savas környezetben (pH = 2 és t=80°C) élnek (pl. *Thermoplasma acidophilum* (“csodaszervezet”).
- *extrém halofilek*: szinte telített sóoldatban élnek (pl. *Halobacterium*).
- *metanogének*: a CO<sub>2</sub> redukciójával metánt állítanak elő (metánképzők):





### Metabolikus reakciók fejlődése a bakteriális evolúció során

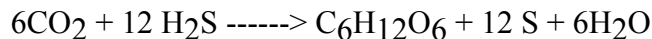
A mai baktériumokban enzimek százai energiát és építőköveket gyártanak az ún. **metabolikus útvonalakon**. Régen azonban ezeknek az építőköveknek és energiában gazdag molekuláknak a többsége szabadon rendelkezésre állt a környezetben, az ósóceán tehát szinte maga a “Paradicsom” volt az első sejtek számára. Mivel - mint már említettük-  $O_2$  nem volt jelen a légkörben, ezért az első sejtek **anaerobok** ( $O_2$  hasznosítására képtelenek) voltak, és szerves vegyületekre voltak utalva (**heterotrófok** ill. **organotrófok**). Az általuk felhasznált szerves vegyületek abiotikusan keletkeztek az ősi Földön. Az élet kialakulását követően azonban ezen szerves molekulák mennyisége rohamosan csökkent a környezetükben, mivel a sejtek folyamatosan felélték, felhasználták azokat. A környezet tehát állandóan romlott a sejtek számára, ezért azok a sejtek, amelyek alkalmazkodni tudtak az állandóan romló feltételekhez, hatalmas evolúciós előnyre tettek szert a többiekkel szemben. Ez az alkalmazkodás új molekulák és új energiaforrások hasznosítását jelentette. Ehhez természetesen új enzimek kialakulására volt szükség, minek következtében a sejtek enzimmérszlete növekedett.

Ez az alkalmazkodás a változó környezetekhez azonban nem érintette a metabolizmus alapreakcióit (“gyökerét”). Ennek következtében ezek a reakciók minden ma élő sejtben

azonosak, ami megint nemcsak azt bizonyítja, hogy ezek nagyon régi eredetű reakciók, hanem azt is, hogy a ma élő sejtek közös őstől származnak.

A sejtek az evolúció során válságok és azok megoldása alapján fejlődtek. A legtöbb válságot prokarióták élték át, hiszen ők jelentek meg először Földön. Ennek következtében a prokarióták mutatják a legnagyobb változatosságot a biokémiai reakciókban.

Az első válság akkor következett be, amikor a környezetből elfogytak az építőkövek és az energiaszolgáltató vegyületek (szénhidrátok). A kismolekulájú anyagokért való versengés felgyorsulásával azok a sejtek jutottak előnyhöz, amelyek a légkör CO<sub>2</sub>-ját mint szénforrást hasznosítani tudták (**autotróf** szervezetek). A környezetben CO<sub>2</sub> nagy mennyiségben volt jelen, de a hasznosításához energiára volt szükség, hiszen a CO<sub>2</sub> a szénnek a legoxidáltabb formája, és a sejtfelepítéshez redukálni kell. A sejtek a CO<sub>2</sub> hasznosításához az energiát fényből nyerték (**fotoszintézis**), egy olyan pigment-molekula (klorofill) kialakításával, melynek elektronját a fény gerjeszteni képes. A legelső fény hajtotta reakció a CO<sub>2</sub> redukációjához szükséges **redukáló erő** előállítását volt a Földön. E reakció során az elektron egy gyenge elektrondonortól egy erős elektrondonorra vándorol a klorofill által befogott fényenergia segítségével. Az erős redukálószer pedig redukálja a CO<sub>2</sub>-t. A legelső elektrondonor a H<sub>2</sub>S lehetett; ekkor a folyamatban elemi kén keletkezett:

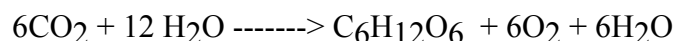


Ez a folyamat először a zöld-kénbaktériumokban alakult ki.

A baktériumok egy másik csoportja az energiaválság leküzdésére felfedezte a napenergia hasznosítását és így kialakultak a **fortróf** szervezetek. Klorofill tartalmú pigmentek segítségével kidolgoztak egy elektrontranszport rendszert, amelynek segítségével a fényenergiát kémiai energiává (ATP szintézis) alakították.

### A cianobaktériumok CO<sub>2</sub> -t és N<sub>2</sub> -t fixálnak

A **cianobaktériumok** (vagy másnéven **kékes-zöldalgák**) egyesítették és tovább tökéletesítették a kétféle bakteriális fotoszintézis előnyeit és ennek eredményeként a H<sub>2</sub>O lett az elektrondonor és a folyamatban O<sub>2</sub> keletkezett a fotoszintézisük eredményeként:



Az O<sub>2</sub> felszabadításával járó fotoszintézis óriási jelentőségű volt, mivel ehhez a folyamathoz minden szükséges alapanyag bőségesen rendelkezésre állt, és ezért az élet felvirágzott. Ebből arra gondolhatnánk, hogy nem is volt több válság!

Ekkor jött azonban a nitrogén válság, mert a szerves nitrogén források elapadtak. Molekuláris nitrogén rengeteg volt a légkörben, azonban ez nagyon nehezen lép reakcióba. A cianobaktériumok azonban ezt a problémát is megoldották és kidolgozták a N<sub>2</sub>-fixálást folyamatát, amelyben nitrogenáz enzimet használnak. Ebben a folyamatban rengeteg energia árán ammóniává redukálják a molekuláris nitrogént. A cianobaktériumok még ma is a szén és a nitrogén fő fixálói; ezek a legönfenntartóbb organizmusok a Földön, hiszen vízen és levegőn (CO<sub>2</sub> és N<sub>2</sub>) képesek élni és ezenkívül csak napenergiát igényelnek. Kialakulásuk következtében azonban a földi feltételek alapvetően megváltoztak.

### **A baktériumok a tápanyag molekulák aerob oxidációjára képesek**

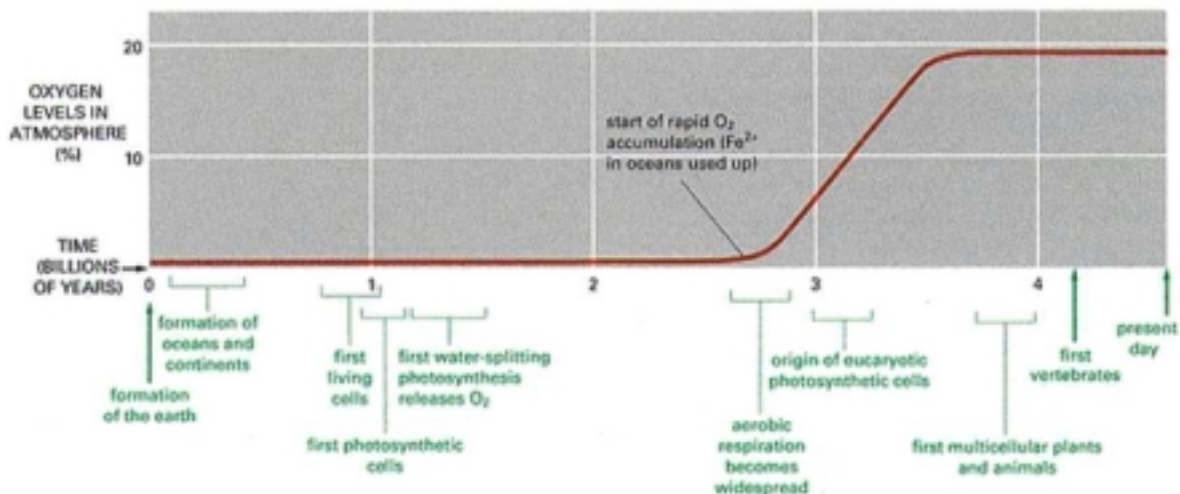
Régen nem az ember, hanem más organizmusok csináltak forradalmi változást a környezetben. Nagyon fontos azonban, hogy ezek a változások sokkal lassabban következtek be, mint manapság az emberiség által okozott környezeti változások. A környezeti változások sebességi aspektusa azért fontos, mert a lassú változásokhoz az élővilág alkalmazkodni tud, a gyors változások viszont elpusztíthatják az életet.

Az emberiség megjelenése előtt a legjelentősebb környezeti változás valószínűleg az oxigén megjelenése volt a cianobaktériumok működése következtében. Mivel az élet O<sub>2</sub> mentes (anaerob) környezetben alakult ki, és az oxigén nagyon reaktív, miáltal a sejtalkotókkal reakcióba lép, ezért **toxikus** hatású volt az első élőlényekre. Ezt bizonyítja a mai anaerob sejtekre gyakorolt hatása: az anaerobok (melyek nem rendelkeznek e téren semmiféle védekező mechanizmussal) O<sub>2</sub> jelenlétében azonnal elpusztulnak. Az O<sub>2</sub> megjelenése tehát újabb válságot okozott a Földet akkoriban benépesítő anaerob sejtek számára (**O<sub>2</sub> válság**).

Az oxigén megjelenését követően az anaerob sejtek az alábbi lehetőségek közül választhattak, hogy elkerüljék az O<sub>2</sub> toxikus hatását:

1. olyan anaerob környezetbe bújtak, ahol nem volt oxigén,
2. kifejlesztettek egy enzimes védekező mechanizmust az O<sub>2</sub> károsító hatásával szemben és kialakultak az aerob baktériumok.



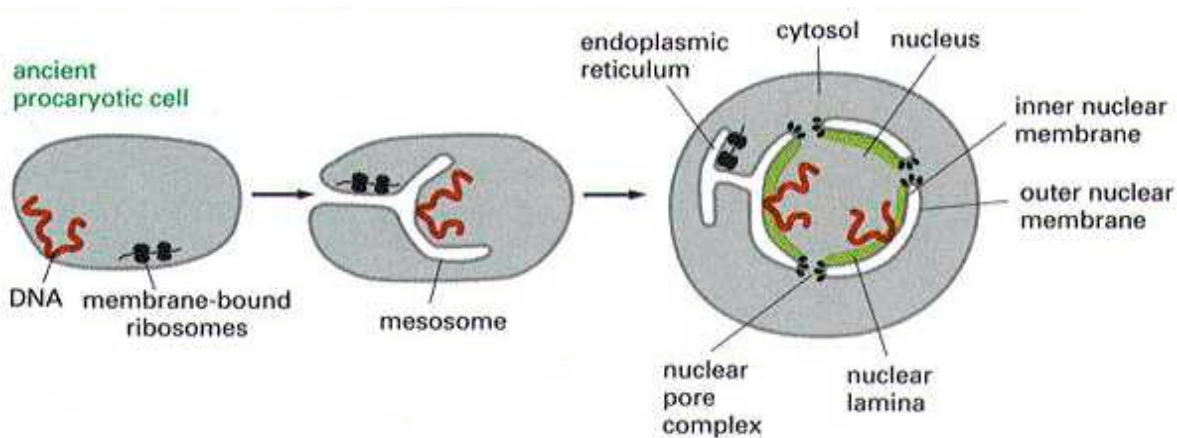


Az  $O_2$ -nek azonban nemcsak negatív, hanem pozitív hatásai is voltak az élet földi fejlődésére:

1. Az  $O_2$ -es légkör felső határán kialakult az ózon réteg és kiszűrte a Nap UV sugarait. Az oxigénmentes légkörben az UV sugárzás elől a vizek alsóbb rétegeibe bújtak sejtök meghódíthatták a vizek felső rétegeit és a szárazföldet is.
2. Az  $O_2$  hallatlan reaktivitása révén megteremtette a vegyületekben lévő kémiai energia sokkal teljesebb kiaknázásának lehetőségét, és nem csoda, hogy a sejtök ezt a lehetőséget ki is használták. Az  $O_2$  lehetővé teszi az energiaszolgáltató molekulák  $CO_2$ -á és  $H_2O$ -é történő sokkal teljesebb elégetését, aminek eredményeként sokkal több energia szabadul fel. Ezt a folyamatot **légzésnek (respirációnak)** hívjuk és a fotoszintézishez hasonló mechanizmussal ATP szintézist eredményez. A bakteriális fotoszintézisben kialakult elektrontranszport lánc módosításával kialakult az aerob sejtök **légzési elektron transzport lánc**.

### Az eukarióta sejtök kialakulása

1.5 milliárd évvel ezelőtt egy újabb mérföldkő következett be a sejtök fejlődésében. A prokarióta sejtök egy csoportja ugyanis nemcsak a biokémiai reakcióit "finomította", hanem az egyszerű belső struktúrája vált komplexebbé. A DNS a prokariótákban nagyon gyakran a citoplazma membrán környezetében helyezkedik el illetve ahhoz kapcsolódik. Egy ősi prokarióták egy csoportjában valamilyen oknál fogva a plazmamembrán befűződött, és a DNS-t kettős membránnal ölelte körül. A citoplazma membrán ily módon történő lefűződésével jöhetett létre a valódi sejtök és annak kettős membránja és kialakultak az ún. **eukarióta (valódis sejtök)** sejtök (eu = valódi).



### Az eukarióták gazdag belső membránstruktúrával rendelkeznek

Az újonnan kialakult eukarióta sejtekben a sejtmagmembrán a DNS számára védelmet biztosított és így annak mennyisége jelentősen növekedhetett a prokarióta sejtekhez képest. Egy humán sejt például 1000-szor annyi DNS-t tartalmaz, mint egy baktérium. A DNS mennyiségének gyarapodása a sejtek térfogatának növekedésével is együtt járt. Az eukarióta sejtek kb. 100-szor nagyobbak, mint a prokarióták. A sejtméret ilyen mértékű növekedése azonban számos problémát okozott az eukarióták számára. A nagyobb sejtméret ugyanis nagyobb sejtfelületet is igényel, mert:

1. az anyagok a plazmamembránon keresztül lépnek be a sejtbe,
2. a membrán ezen kívül fontos biokémiai reakcióknak (lipid szintézis, légzési elektrontranszport stb.) is a helyszíne.

Ha gömbszerűnek képzeljük a sejtet, akkor könnyen belátható, hogy a méret (a gömb sugara) növekedésével a térfogat köbösen növekszik, míg a felület csak négyzetesen. Ez azt jelenti, hogy a méret növekedésével a fajlagos felület csökken. Ezért, hogy a nagy eukarióta sejtek megtartsák a prokariótákra jellemző nagy fajlagos felület arányt, **belső membrán struktúrákat** alakítottak ki.

Ennek első lépése az lehetett, hogy a sejtmaghártya egy labirintus alakú kompartmentet, az ún. **endoplazmás retikulumot** (ER) alakított ki. Az ER membránján lipidek és fehérjék szintézise történik. Az endoplazmás retikulumból lesarjadzó vezikulumokból képződtek a **Golgi apparátus** lapos zsákjai, amelyek az ER-ben szintetizált molekulák módosítását és továbbítását végzik.

Felvetődik a kérdés, hogy a belső membrán-struktúrák kialakulása miként oldja meg a fajlagos felület csökkenésének előbb említett problémáját? Erre a kérdésre az a válasz, hogy ezek a belső membránok állandó és dinamikus kapcsolatban állnak a citoplazma membránjával. Nevezetesen, a Golgi zsákjaiból folyamatosan vezikulumok hasadnak el és olvadnak össze a

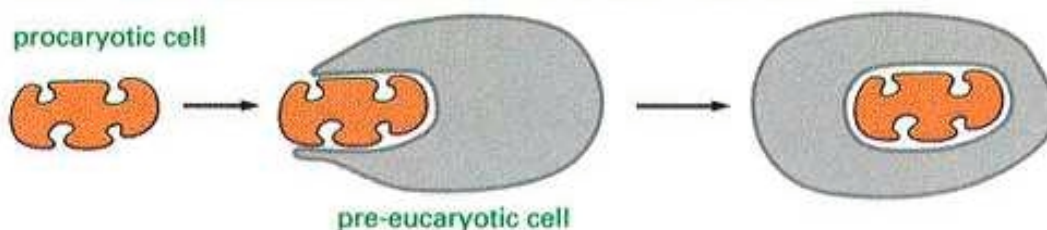


sejtmembránnal, miközben tartalmukat a sejt környezetébe ürítik. Ez a folyamat az **exocitózis**, amelynek révén a sejt belsejében elhelyezkedő membránnal határolt organelumok a sejt környezetébe tudnak anyagot exportálni és a sejtfelszín növelését is szolgálják.

Az eukarióták membránnal határolt vezikulumokkal nemcsak anyagot tudnak exportálni, hanem a környezetükből anyagot is képesek felvenni. Ez az exocitózissal ellentétes folyamat az **endocitózis**, melynek során a citoplazmamembrán egy darabja befűződik, leszakad és egy citoplazma-membrán határolta vezikulumot hoz létre, ami külső anyagot vagy a sejtfelszínen megtapadt anyagot tartalmaz. Ezzel a módszerrel bizonyos eukariótasejtek egészen nagy részecskéket (pl. idegen sejteket) is képesek bekebelezni (**fagocitózis**).

Természetesen ezeket a sejt környezetéből felvett anyagokat meg kell emészteni, ami ugyancsak membrán határolt organelumokban, a **lizoszómákban** történik, melyek emésztőenzimeket tartalmaznak. Szintén membrán határolja az eukarióták **peroxiszómáit** is, melyeknek a  $H_2O_2$  termelésben van szerepük. Ezek a fentebb tárgyalt belső membrán-struktúrák egy különálló kompartmentet alkotnak az eukarióták **citoplazmájában**, és a sejt térfogatának felét is elfoglalhatják. A citoplazma maradék részét **citoszólnak** nevezzük.

### A mitokondriumok kialakulása



Az oxigén megjelenését az eukarióta sejtek őse úgy vészelte át, hogy **szimbiózist** alakított ki egy aerob baktériummal; így alakult ki az eukarióták mitokondriuma. Ez a Lynn Margulis-tól származó ún. **endoszimbiózis** elmélet a legkézenfekvőbb magyarázat az **eukarióta (valódi sejtmagvas)** sejtek keletkezésére. Ennek megfelelően a mitokondriumok felelősek az eukarióta sejtek légzéséért. Az endoszimbiózis elképzelést számos bizonyíték támasztja alá:

- a mitokondriumok mind a méretüket, mind az alakjukat tekintve nagyon hasonlóak a ma élő baktériumokhoz és osztódásra képesek.
- saját DNS-el rendelkeznek, amely szerkezetét tekintve hasonló a prokariótákéhoz.
- saját fehérje-szintetizáló apparátussal rendelkeznek, mely szintén a prokarióta apparátushoz hasonló.

A legmeggyőzőbb bizonyítékot a mitokondriumok endoszimbiózisos eredetére azok a köztes állapotok jelentik az eukarióta fejlődésben, amelyek még ma is fellelhetők:

1. Vannak ugyanis olyan ősi eukariótára hasonlító ma élő eukariótasejtek, melyek oxigénszegény környezetben (bélben) élnek és nincs mitokondriumuk (pl. diplomonad).
2. Az amőba *Pelomyxa palustris*-nak pedig nincs mitokondriuma mégis van oxidatív metabolizmusa, mert a citoplazmájában baktériumok élnek.

Az aerob baktériumokban a plazmamembrán felelős a légzési energia termelésért. Az eukariótákban a mitokondrium átvette ezt a funkciót a citoplazmamebrántól, ezért a plazmamembrán új feladatokat láthat el.

### A kloroplasztok is bekebelezett prokarióták leszármazottai

A kloroplasztok a cianobaktériumokhoz hasonló  $O_2$  felszabadulással járó fotoszintézist végeznek, ezért nem meglepő, hogy ezek bekebelezett cianobaktériumok leszármazottai.

Nagyon fontos azonban, hogy a mai eukarióták mitokondriumi és kloroplasztjai sok mindenben különbözik a ma élő aerob baktériumoktól és cianobaktériumoktól:

1. DNS-ük is kisebb, mint a baktériumoké,
2. sok molekulát nem maguk állítanak elő, hanem készen kapják a gazdasejtől.

Ezen különbségeknek az a magyarázata, hogy mindketten szimbiózis eredményeként baktériumokból erednek, de nagy evolúciós változáson mentek keresztül, és ma már nagy részben a gazdasejtől függenek. Emellett a mitokondriumok általánosak az eukariótákban, kloroplaszt viszont csak növényi sejtekben fordul elő.

### Az eukarióta sejteknek belső váza van

Minél a nagyobb a sejt és minél strukturáltabb a belseje, annál fontosabb ezeknek a struktúráknak a megfelelő helyen való tartása és esetleges mozgatása. Minden eukarióta sejtnek van **citoszkeletonja**, ami a sejtnek alakot biztosít, a mozgás képességet adja, az organellumok elhelyezkedését és mozgását biztosítja.

A citoszkeleton fehérje fonalakból (**filamentumokból**) áll. A két legfontosabb típus:

1. aktin filamentumok.
2. mikrotubulusok.

Ezek a fehérjefonalak nagyon régi képződmények lehetnek, mert szinte változatlanok az eukariótákban.

Mindkét filamentum kulcsszerepet játszik a sejtek ill. a szervezetek mozgásában;

- az aktin az izomban,
- a mikrotubulusok pedig a csillókban és ostorokban találhatók meg

A belső mozgásokban is szerepük van: mikrotubulusok alkotják a **mitózis oszlopot**. Enélkül az eukarióta sejt nem tud szaporodni.

### **Az eukarióta sejtben a genetikai anyag igen komplex módon csomagolt**

Az eukarióták igen sok DNS-t tartalmaznak (egy humán sejt 1000-szer többet, mint egy baktérium). A DNS hossza olyan nagy, hogy nagy a törés és szakadás veszélye. Ezért jól be van "csomagolva". Az eukariótákra jellemző fehérjék a **hisztonok**, amik a DNS-hez kötnek, és "becsomagolják" őket kezelhető **kromoszómákba**. A DNS kromoszómákba "csomagolása" előfeltétele a sejtosztódásnak. Kevés kivételtől eltekintve minden eukariótában vannak hisztonok és ezek nagyon konzervatív fehérjék .

A DNS-t az eukariótákban magmembrán is védi. A genetikai információ kifejeződésének két fő lépése így térben elválasztódik:

1. DNS transzkripciója (átírás)
2. RNS translációja (átfordítás)

A prokariótákban ezek a folyamatok nincsenek térben elválasztva: az RNS szekvenciák translációja azonnal megindul, amint az átíródott (mielőtt a szintézise befejeződött volna). Az eukariótákban a transzkripció színtere a sejtmag, míg a fehérjeszintézisre a citoplazmában kerül sor. Mielőtt az RNS elhagyná a sejtmagot **érési folyamaton (RNA processing)** kell keresztül mennie, melynek során egy része kivágódik, más része pedig módosul.