

Gazsó-Fodor István

AZ ÖNSZERVEZŐ ANYAG



Az élő rendszerek útja
a molekuláktól
a társadalmakig



Gazsó-Fodor István

AZ ÖNSZERVEZŐ ANYAG

Az élő rendszerek útja
a molekuláktól a társadalmakig



MOZAIK KIADÓ – SZEGED, 2014

TARTALOM

Bevezetés	6
I. RÉSZ – AZ ÉLET ÉPÍTŐKÖVEI	
1. FEJEZET – A MEGSZELÍDÍTETT KÁOSZ	9
1.1. A káosz a rend szolgálatában	10
1.2. A káosz mint az evolúció motorja	19
1.3. Entrópia, információ és a rend eredete	29
2. FEJEZET – ÉLŐ REAKCIÓHÁLÓZATOK	37
2.1. Az élet mibenléte	38
2.2. A legegyszerűbb élőlény	48
3. FEJEZET – A SZUPERCHEMOTON	59
3.1. Modern membránok	60
3.2. Ciklusok kavalkádja: a modern anyagcsere	72
3.3. A modern szoftver	82
3.4. A modern sejt mint autokatalitikus rendszer: a sejtciklus	97
4. FEJEZET – MEGJÓSOLNI A JELENT	105
4.1. A por döntése	106
4.2. Út a superchemotonhoz	131
II. RÉSZ – EGYSÉGBEN AZ ERŐ	
5. FEJEZET – SEJTMONSTRUMOK	143
5.1. A sejtek együttműködésének durva hangolása: a test szerkezete	144
5.2. A sejtek együttműködésének finomhangolása: a reflexektől az elméig	155
6. FEJEZET – AZ EGYÜTTMŰKÖDÉS MOZGATÓRUGÓI	177
6.1. Az együttműködés eredete	178
6.2. A kooperáció arcai	203
ZÁRSZÓ	216
FELHASZNÁLT ÉS HIVATKOZOTT IRODALOM	218

BEVEZETÉS

Hogy átszõ mindent az Egész!

Egyik a másban hat s tenyész!

(Goethe: Faust)

Az egyes tudományok a világegyetemben fellelhetõ objektumokat más és más nézõpontokból vizsgálják. Ezért sokszor ugyanazok a dolgok különbözõnek látszanak, ahogy egy pénzérme is innen nézve kerek, amonnan nézve pedig lapos. Például egy embert jellemezhetünk szociológiai nézõpontból. Ekkor a szüleivel való kapcsolatára, vagy a társadalmi helyzetére összpontosítunk. Vizsgálhatjuk a pszichológia szempontjából: ekkor az érzelmi reakcióit, azok életani tüneteit figyeljük meg, vagy épp egy kisgyermekkorai traumára vezetjük vissza a viselkedését. Leírhatjuk mindezt a fiziológia nyelvén: elemezhetjük az idegi kapcsolatokat, a sejtmembránok elektromos jelenségeit, vagy a vérnyomás változásait. Kémiai szinten az embert felépítõ molekulákkal foglalkozunk, a fizika szintjén az anyagi világot kormányzó (vagy inkább leíró) legalapvetõbb törvényekre (az elektromágnességre, a gravitációra, az erõs és a gyenge kölcsönhatásokra) vezetjük vissza a szervezet mûködését. Egyre részletesebb elemzéssel egyre mélyebb, egyre alapvetõbb szintekre juthatunk el. Ez azonban nem biztos, hogy mindig praktikus, hiszen elõállhat az a helyzet, amikor „nem látjuk a fától az erdõt”, azaz elveszünk a végeredmény szempontjából felesleges részletekben. Például egy orvosnak nem szükséges egy depressziós páciense agyát felépítõ atomok kvantumállapotát ismernie ahhoz, hogy hatékonyan kezelje a beteget a megfelelõ gyógyszerekkel. Szerencsére egy történésznek sem kell Napóleon minden egyes gárdistája agyában ismernie a neurotranszmittermolekulák mennyiségét és eloszlását ahhoz, hogy megértse, mi történt Waterloonál. Mindig az adott cél eléréséhez megfelelõ szempontú és mélységû elemzést kell elvégezni, azaz a megfelelõ tudományterület eszköztárához kell folyamodnunk. Egyik nézõpont sem igazabb, helyesebb a másiknál, legfeljebb praktikus, vagy kevésbé az.

A fizika törvényei – például a gravitáció – korlátozzák a jogászok munkáját, a jogszabályok viszont semmilyen módon sem befolyásolják a bolygómozgást. Az egyes tudományok egymáshoz való viszonya tehát aszimmetrikus. Ennek alapján egy jellegzetes hierarchia rajzolódik ki. A legalsó szinten a fizika áll, ez a tudomány foglalkozik az anyagot irányító legalapvetõbb kölcsönhatásokkal és az anyag jellegzetességeivel, egészen az elemi részecskék szintjéig hatolva. A kémia az elemi részecskékbõl álló kémiai elemekkel, vegyületekkel foglalkozik. A biológia az ezekbõl felépülõ élõ rendszereket vizsgálja. A társadalomtudományok az élõlények közül az embereket és az általuk alkotott csoportokat tanulmányozzák.

A hierarchiában fölfelé haladva a vizsgálat tárgyát képezõ objektumok köre egyre szûkül, és az alsóbb szinteken elhelyezkedõ tudományok törvényei korlátozzák a felsõbb szintek törvényeit. Ez azt is jelenti, hogy egy élõlény csak

arra lehet képes, amit a fizika és a kémia törvényei lehetővé tesznek számára. Ugyanakkor olyan speciálisan az élő rendszerekre vonatkozó törvények (például a genetika, vagy a biológiai evolúció szabályai) is befolyásolják a működését, amelyek az élettelen anyagra nem érvényesek.

Egy rendszer működését részeinek elemzése által érthetjük meg. Egy műszerész sem képes megjavítani egy elektromos eszközt, ha nem ismeri a felépítését és egy orvos sem tud hatékonyan meggyógyítani egy beteget, ha nem tudja, melyik szerv működésével van probléma. A rendszerszintű ismeretet az alkotórészek szintjére vezetjük vissza, redukáljuk.

A redukcionizmus szerint az egyes tudományokat egymásra redukálhatjuk, mivel a vizsgált rendszert és jelenségeit egyre jobban felbontva végül a részecskék és a legalapvetőbb fizikai kölcsönhatások szintjére jutunk.

Az 1. fejezetben megmutatjuk, hogy a biológia törvényei semmilyen módon nem mondanak ellent a fizika törvényeinek; nem mások mint fizikai törvények speciális alkalmazásai, megfogalmazásai. Két tudomány között az átjárás sok ponton lehetséges. A mi fő „átjárási pontunk” a fizika és a biológia között a termodinamika második főtétele lesz, amely a világegyetem rendezetlenségének növekedését mondja ki. Ezután a 2. fejezetben definiáljuk az életet és bemutatjuk az élet *Gánti Tibor* által kidolgozott minimálrendszerét, a chemotont. A 3. fejezetben az élet alapegységével, a sejttel ismerkedünk. A mai sejtekre vonatkoztatva a chemotonmodellt, a sejtek működésének legáltalánosabb, legmélyebb alapelveit ismerjük meg. A 4. fejezetben az élettelen és az élő anyag közti átmenettel, a primitív chemotonszerű elősejtek keletkezésével ismerkedünk. A könyv második részében a sejtek által felépített komplexumokkal foglalkozunk. Az 5. fejezetben az egyedi szervezet felépítését és működését vizsgáljuk meg a magasabb rendű agytevékenységekkel bezárólag. A 6. fejezetben pedig megmutatjuk, hogy a biológia törvényei hogyan vezetnek el a soksejtű élőlények, a kultúra, a társadalmak, az államok kialakulásához.

E könyv egyik célja rávilágítani arra, hogy a tudományok és azok részterületei nem elszigeteltek, az élőlényekre vonatkozó természeti törvények alapvetőbb természeti törvények speciális megnyilvánulási formái, illetve a társadalomtudományok is ezer szállal kapcsolódnak a biológiához. Így kirajzolódik az olvasó előtt a tudományok egysége.



I. RÉSZ

AZ ÉLET ÉPÍTŐKÖVEI

A megszelídített káosz

Az első fejezetben a fizika szintjén vizsgáljuk az élet egyes alapjelenségeit. Termodinamikai összefüggésekre alapozva az élő rendszerekben fellelhető rendezettség és komplexitás eredetét járjuk körül, és megmutatjuk, hogy paradoxnak tűnő módon az élőlények rendezettsége épp a rendezetlenség állandó növekedéséből fakad. A fejezet három részre tagolódik.

Az első alfejezetben bevezetjük az entrópia fogalmát és a termodinamika második főtétele. Majd a második főtétel mikroszintű következményeit, a diffúzió és az ozmózis jelenségeit taglaljuk, és utalunk azok néhány sejt- és szervezetszintű következményére.

A második alfejezetben a második főtétel és a természetes szelekció makroszintű következményeként tárgyaljuk a biológiai evolúciót.

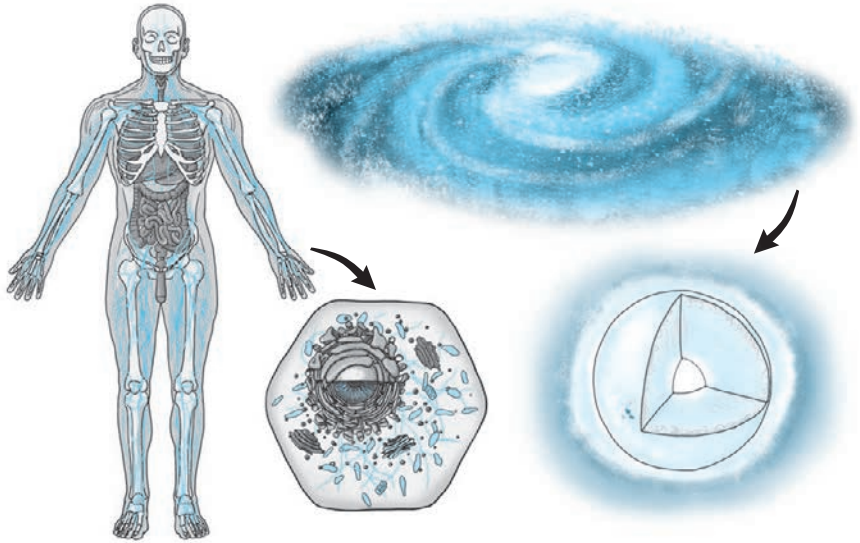
A harmadik alfejezetben az élő rendszerek információtartalmát vizsgáljuk meg az entrópiafogalom segítségével. Látni fogjuk, hogy az entrópia és az információ egy tőről fakadnak. Ezután már könnyen megérthetjük a bioszféra alacsony entrópiájának eredetét.

1.1. A KÁOSZ A REND SZOLGÁLATÁBAN

A termodinamika második főtétele

Az élőlényekre jellemző, hogy rendezett állapotukat és működésüket képesek pusztulásukig fenntartani. A rendezettség a biológia összes szerveződési szintjén megfigyelhető, elég csak a DNS-molekula szabályos kettőshélix szerkezetére, egy növényi levél kifinomult felépítésére, egy rovar testének szimmetriájára, vagy egy énekesmadár-populáció hím egyedeinek egyenletes eloszlására gondolnunk. Az élő rendszerek összehasonlíthatatlanul bonyolultabbak és rendezettebbek, mint a legkomplexebb élettelen objektumok, például egy galaxis (1.1. ábra). Ezt a nagyfokú rendezettséget annyira megszoktuk, hogy talán észre sem vesszük, hogy magyarázatra szorul.

Az élő anyag rendezettebb, mint az élettelen.



1.1. ábra. A természet alkotásai közül az élőlények mutatják messze a legnagyobb komplexitást, rendezettséget

A termodinamika második főtétele • Nap mint nap tapasztaljuk a rendezetlenség spontán növekedését. A világegyetemben a dolgok valamiért hajlamosak szétszóródní, rendezetlenebb állapotba kerülni. A kávéban feloldott cukor nem gyűlik újra össze. A levegő nem áramlik be magától egy gázpalackba. Egy üvegpoharat kis energia árán össze tudunk törni, de ha a szilánkokat földhöz csapjuk, azok nem állnak össze pohárrá. A hó magától nem megy át a hidegebb testről a melegebb testre, ehelyett a hőmérséklet kiegyenlítődik. A rendrakás sokkal munkaiányesebb folyamat, mint a rendetlenség előidézése. Mi a feltétele annak, hogy a vizsgált rendszerben a rendezetlenség csökkenjen? Könnyű észrevenni, hogy ehhez munkavégzés szükséges, tehát a rend fenntartása és növelése energiaiányes folyamat. A rendezetlenség mértéke az entrópia, amire

egy központi jelentőségű természeti törvény vonatkozik: a világegyetem teljes entrópiája minden folyamat során növekszik. Ez a termodinamika (hőtan) második főtételének egyik megfogalmazása.

Másrészt nyilvánvaló, hogy bizonyos esetekben a vizsgált rendszerben az entrópia csökkenhet (például amikor rendet rakunk a szobánkban). Ez az „ellentmondás” persze könnyen feloldható, ha észrevevesszük, hogy egy folyamat egyszerre növelheti (a világegyetem egészére vonatkozólag) és csökkentheti (lokálisan a vizsgált rendszerre, például a szobánkra vonatkoztatva) az entrópiát; a növekedés mindig nagyobb, mint a csökkenés. Amikor rendet rakunk egy szobában, tárgyaink rendezettebb állapotba kerülnek ugyan, de eközben munkát kell végeznünk, ami hőtermeléssel jár. A hő pedig nem más, mint a részecskék kaotikus mozgása. Ez a hő növeli – többek közt – a körülöttünk levő levegő entrópiáját. Tehát a rend növelésének mindig ára van, és végső soron az ár nagyobb, mint a haszon. Persze vajmi kevésbé zavar minket, hogy a levegő entrópiája a rendrakás során megnő, hiszen ezt jó esetben egy rövid szellőztetés után el is felejthetjük. Ugyanígy egy magzat fejlődése során termelődik ugyan hő, de ez kevésbé látványos ahhoz az entrópiacsökkenéshez képest, ami akkor történik, amikor a kaotikusan kavargó molekulák sejtekké és szervekké rendeződnek.

Az entrópia exportja • Teljesen téves az a gyakran hangoztatott elképzelés, miszerint az élőlényekre nem volna érvényes a termodinamika második főtétele, vagy az, hogy az élőlények képesek volnának azt „megkerülni”, „kijátszani”. Természetesen az élő rendszerekre éppúgy vonatkoznak a fizika törvényei, mint egy fűdémelemre vagy egy gőzgépre: mi is lefelé esünk a tetőről, és hőtermelésünkkel mi is nagyobb mértékben növeljük működésünk közben környezetünkben az entrópiát, mint amennyire szervezetünkben csökkentjük azt. A második főtétel fentebb használt megfogalmazása az egész világegyetem entrópiájának növekedését írja elő, és nem tiltja, hogy az entrópia lokálisan csökkenjen. Ez történik egy hűtőszekrény működése közben is. A hűtőszekrények működésének magyarázatakor nem szokás semmiféle hókuszpókuszt feltételezni, és erre az élőlények esetén sincs szükség. Az élőlények és a hűtőszekrények egyaránt nyílt rendszerek, ami azt jelenti, hogy anyagot és energiát is cserélhetnek környezetükkel. Szervezetünkben az entrópia növekedése energiabevitellel megakadályozható, a biokémiai folyamatok során keletkező hő pedig a környezetbe távozik. Tehát az entrópia az anyagcsere-folyamataink során növekszik, de nem (csak) a szervezetünkben, hanem elsősorban a külvilágban, azaz az entrópiánövekedést képesek vagyunk exportálni környezetünkbe.

A világegyetem egésze izolált rendszerként fogható fel, amely sem energiát, sem anyagot nem képes cserélni környezetével. Ugyanis a világmindenségnek definíció szerint nincs környezete, hiszen akkor az is a világegyetem része lenne. Ezért a világegyetem az entrópiát nem képes exportálni, így entrópiája elkerülhetetlenül nő. A második főtételt megfogalmazhatjuk úgy is, hogy a „világegyetem” szó helyére az „izolált rendszer” kifejezést helyettesítjük: egy izolált rendszer teljes entrópiája minden folyamat során növekszik.

A világegyetem entrópiája folyamatosan nő.

Az élőlények entrópiát exportálnak.

A diffúzió

Oldatok és élő rendszerek • Először a második főtételek oldatokban megnyilvánuló következményeit elemezzük röviden. Miért jelentős ez az élő rendszerek szempontjából? Az élőlények felfoghatók egymástól többé-kevésbé elhatárolt, felosztott folyadékterek összességévé. Például a sejtek belsejében található sejtplazma is oldat, és maga a sejt is általában valamilyen oldatban helyezkedik el: édes- vagy tengervízben, vérben, vagy épp szövetnedvben. Így érthető, hogy az oldatokban megnyilvánuló entrópiánövekedés az élőlények működésére óriási hatást gyakorol.

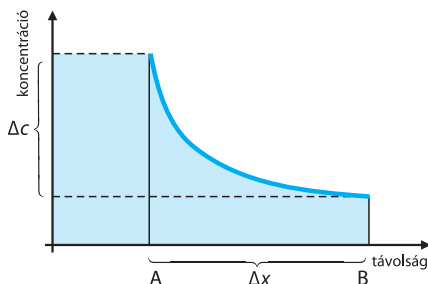
Ha vízbe festéket cseppentünk, bizonyos idő elteltével a festék egyenletesen oszlik el a folyadékban; ha egy szobában virágot helyezünk el, illata hamarosan az egész helyiségben érezhető lesz. Ezek a jelenségek példák a diffúzióra, azaz a spontán elkeveredésre.

A diffúzió az entrópia növekedésének megnyilvánulása.

Koncentrációgradiens • A részecskék szétszórt eloszlása nagy entrópiájú állapotot képvisel; a második főtételek szerint a diffúzió az entrópia növekedésének megnyilvánulása. Ha két térrészben az oldott anyag koncentrációja eltér, a koncentrációkülönbség koncentrációgradienst (gradiens = lejtő) hoz létre. Ezt szemlélteti az 1.2. ábra.

Az oldott anyag részecskéi a lejtőn lefelé „törekcsenek” (éppen úgy, ahogyan egy golyó is spontán mindig lefelé gurul egy lejtőn a gravitációs mezőben a nagyobb gravitációs potenciálú magasabb pontról a kisebb potenciálú alacsonyabb pontra). Ha a gradiens ellenében – lejtőn felfelé – akarjuk mozgatni a részecskéket, munkát kell végeznünk. Minél nagyobb a két térrészben mérhető koncentrációértékek különbsége, annál meredekebb a koncentrációgradiens és annál nagyobb a részecskékre ható hajtóerő. Más szóval: nagyobb koncentrációkülönbség esetén nagyobb a potenciálkülönbség, így több munkát kell végeznünk, hogy gradiens ellenében egy részecskét egyik térrészből a másikba juttassuk.

Egy oldatban az oldószer részecskéi is diffúziót végeznek, méghozzá az oldott anyag részecskéivel ellentétes irányban. Ha például egy kockacukrot dobunk egy pohár vízbe, nemcsak a cukormolekulák diffundálnak a kockacukorból kifelé, hanem a vízmolekulák is a kockacukor belsejébe. Hiszen ahol nagyobb az oldott anyag koncentrációja (ahol az oldat töményebb), ott az oldószer koncentrációja alacsonyabb: az oldószer-molekulák koncentrációgradiense az oldott anyag koncentrációgradiensével ellentétes irányba lejt.



1.2. ábra. A koncentrációgradiens. Az oldott anyag koncentrációja az A térrészben nagyobb, mint a B térrészben. A koncentrációkülönbség (Δc) gradienst hoz létre. E gradiens irányába áramolnak spontán az oldott anyag részecskéi, ahogyan a gravitációs mezőben is a lejtőn lefelé gurul egy golyó

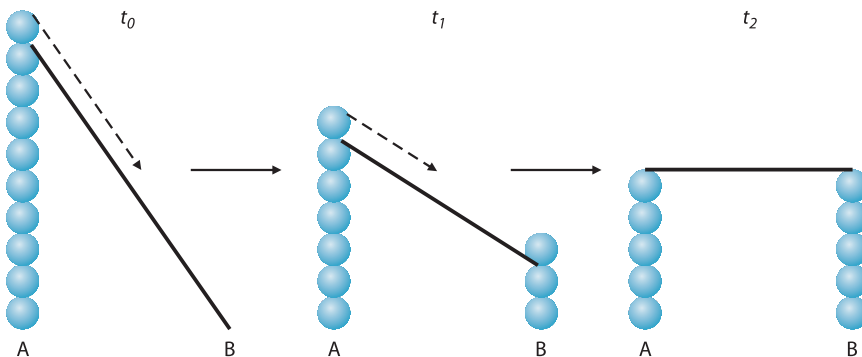
Fick I. törvénye • A diffúzió „erősségét” az áramsűrűség (fluxus, J) jellemzi, ami nem más, mint az egységnyi keresztmetszeten időegység alatt átáramlott anyag mennyisége. A fluxus egyenes arányban áll a koncentrációgradiens meredekségével, ami a koncentrációk különbségének (Δc) és a megtett útnak (Δx) a hányadosa (ld. 1.2. ábra). Azonban a gradiens meredeksége önmagában nem határozza meg az áramsűrűséget, ahogyan önmagában egy lejtő meredeksége sem határozza meg a rajta lecsúszó test gyorsulását: utóbbit befolyásolja a test anyagi minőségétől függő súrlódási együttható. Hasonlóképpen a diffúzió fluxusának meghatározásához is szükség van egy – az anyagi minőségtől függő – állandóra; ez a diffúziós állandó (D), ami az áramló részecskék tömegétől, alakjától, a közeg viszkozitásától és a hőmérséklettől függ. Így már felírható a diffúzió áramsűrűségét megadó közelítő egyenlet:

$$J = D \left(-\frac{\Delta c}{\Delta x} \right),$$

ahol a negatív előjel arra utal, hogy a gradiens negatív mennyiség. Ez Fick I. törvényének arra a speciális esetre vonatkozó megfogalmazása, amikor Δc és Δx nagyon kicsi; ekkor a gradiens lineárisnak tekinthető. Ez a valóságban nem így van, de kis koncentrációkülönbség és kis távolság esetén jó közelítés.

A differenciálszámítás felhasználásával felírható Fick I. törvényének pontosabb alakja: $J = D \left(-\frac{dc}{dx} \right)$, amelynek a $J = D \left(-\frac{\Delta c}{\Delta x} \right)$ alakú egyenlet egy közelítése, speciális esete. A törvény e megfogalmazása már számol azzal, hogy a gradiens meredeksége térben változik, ezért a tetszőlegesen kicsiny dc és dx szerepel benne.

A koncentrációgradiens meredeksége nemcsak térben, hanem időben is változik: a diffúzió során a gradiens meredeksége a koncentrációkülönbség csökkenése miatt pillanatról pillanatra csökken (1.3. ábra). (Ennek matematikai leírása parciális deriválást igényel, ami meghaladja e könyv kereteit és nem szükséges a továbbiak értelmezéséhez.)



1.3. ábra. A diffúzió során a koncentrációgradiens meredeksége csökken. Egyszerűsítésként a gradienseket lineárisnak tüntettük fel, ami közelítőleg igaz, ha a koncentrációkülönbség, illetve a távolság kicsi. A körök száma a részecskék mennyiségét szimbolizálja. A t_0 időpontban az A térrészben az adott anyag részecskéinek koncentrációja lényegesen nagyobb, mint a B térrészben. t_1 időpontban a részecskék A-ból B-be történő diffúziója miatt a koncentrációgradiens csökken, míg t_2 időpontban megszűnik, és dinamikus egyensúly áll be

A diffúzió erősségét az áramsűrűség jellemzi.

A szuperchemoton

Ebben a fejezetben a chemotonmodellt alkalmazzuk a ma élő, „modern” sejtekre. Eközben követjük a chemoton tárgyalásánál alkalmazott logikai felépítést: megismerjük a határoló, az anyagcsere- és az információs alrendszer működését, majd a szaporodás kapcsán (is) elemezzük az alrendszerek kapcsolatait. Így képet alkothat az olvasó arról, hogy az evolúció során honnan hova jutottak el a földi sejtek. Előzetesen le kell szögezzük: nem állítjuk azt, hogy az ősföldi primitív sejtek pontos modellje a chemoton. Például azt nem kell feltételeznünk, hogy a replikáció terméke kapcsolta össze a templátreplikációt a membránképződéssel. Ez egy egyszerű kapcsolási mechanizmus, de más módok is elképzelhetőek erre.

Mivel a mai sejtek a chemotonszerű primitív elősejtek leszármazottai, rájuk is jellemző az autokatalitikus ciklusok összehangolt működése és a három alrendszer megléte. Emiatt a mai sejtek működését leíró modellrendszert szuperchemotonnak nevezzük.

3.1. MODERN MEMBRÁNOK

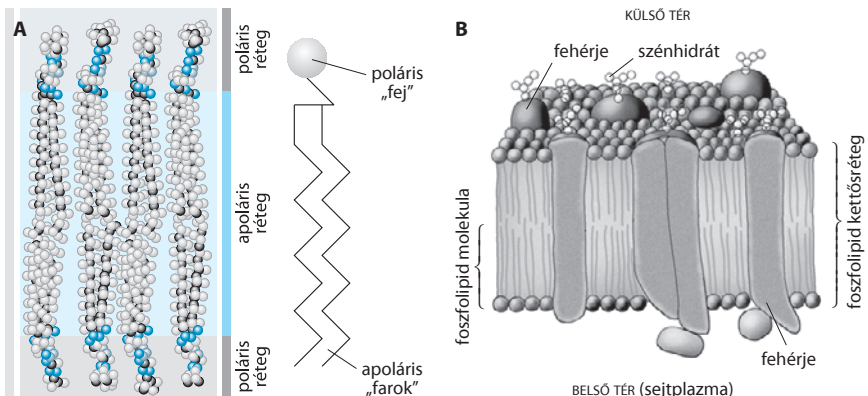
A 2.2. alfejezetben megismertük a chemoton határoló alrendszerét, mely amfipatikus molekulákból áll. Ezek orientációja attól függ, hogy az oldószer poláris vagy apoláris jellegű. A földi sejtek esetén ez az oldószer a poláris molekulákból álló víz, a membrán pedig nagyrészt amfipatikus foszfatidokból épül fel, melyek kettősréteget alkotnak. A szuperchemoton lényegesen kifinomultabb működésű, mint a chemoton, ennek megfelelően membránja is komplexebb: a foszfatidokon kívül találunk benne többek között koleszterint, szénhidrátokat és fehérjéket. Ezek kulcsfontosságúak abban, hogy a sejt megfelelően reagálhasson a környezet változásaira. Megemlítendő, hogy a chemoton határoló alrendszeréhez hasonlóan a sejtmembrán is autokatalitikus rendszert képez, ugyanis a sejtosztódás során megkettőződik.

Ebben az alfejezetben megismerhetjük *Singer* és *Nicholson* fluid mozaik membránmodelljét és összevetjük a chemotonmodell által támasztott elvárásokkal. Ezután a modern membránokon keresztül zajló transzportfolyamatokat tekintjük át, különös tekintettel a membránok elektromos jelenségeire és az anyagcsere-folyamatokkal való kapcsolatokra.

Felépítés

A foszfatidok amfipatikus molekulák.

A foszfatidok • A membránok legfontosabb alkotórészei a foszfatidok. Ezek a molekulák a lipidek csoportjába tartoznak. Amfipatikus molekulák, azaz vízdoldékony (hidrofil, poláris) és vízben nem oldódó (hidrofób, apoláris) részekre tagolódnak. Általános szerkezetüket a 3.1.A. ábra részletezi. Speciális



3.1. ábra. A foszfolipidek általános szerkezete (A). A molekula poláris „feji” és apoláris „farki” részekre tagolódnak. A poláris részt a glicerol (esetleg szfingozin), a foszforsav és egy nitrogéntartalmú csoport alkotja. Az apoláris rész zsírsavakból áll. Ezek lehetnek telítettek, vagy telítetlenek (kettős kötést tartalmazók). A foszfatid kettősréteg (B). Az amfipatikus molekulák energetikailag legkedvezőbb elrendeződési módja, amikor az apoláris molekularészek egymás felé fordulnak, a polárisak pedig a vizes közeg irányába. Így lipid kettősréteg jön létre

oldódási tulajdonságaik miatt vizes közegben kettősréteget alakítanak ki úgy, hogy a két réteg lipidjeinek hidrofób zsírsavláncai egymás felé fordulnak, a víz pedig kiszorul közülük (3.1.B. ábra).

A foszfatidok mozgása • A foszfolipidek háromféle mozgást végezhetnek: ezek a flip-flop, a rotáció és a laterális diffúzió.

A foszfolipidek háromféle mozgást végezhetnek.

A flip-flop mozgás során a molekula az egyik rétegből „átpattan” a másikba. Mivel eközben a poláris résznek át kell haladnia az apoláris rétegen, ez a mozgás ritkán fordul elő spontán módon (sejtjeinkben a flippáz enzimek katalizálják).

A rotáció a membránlipidek hossz tengelyük körüli forgását jelenti. A membrán szerkezetét lazítja, ha nagy mennyiségben tartalmaz telítetlen zsírsavakat, mert ezek a láncok megtörnek, „kiállnak” a foszfatidmolekulából, így forgás közben a térkitöltésük nagyobb. Emiatt egy adott hőmérsékleten a több telítetlen zsírsavat tartalmazó membránok kevésbé merevek. A változó testhőmérsékletű állatok hideghez való alkalmazkodásának egyik módja, hogy növelik a membránok telítetlenzsírsav-tartalmát.

A rotáció és a harmadik mozgásforma, a laterális (egy rétegen belüli) diffúzió könnyen, gyakorlatilag akadálymentesen végbemehet. Mivel a lipidek az adott rétegből igen ritkán lépnek ki, de abban szabadon mozoghatnak, a membrán kétdimenziós folyadékként viselkedik.

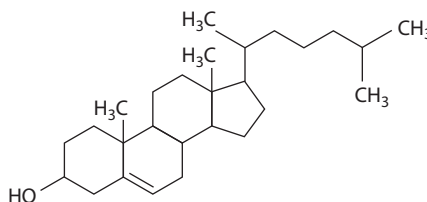
A membrán kétdimenziós folyadék.

A chemoton T molekulája • A 2.2. alfejezetben bemutattuk a chemoton határoló alrendszerét. A Gánti által feltételezett amfipatikus T molekulák a földi sejtekben a foszfatidok. A chemotonmodellben támasztott elvárásoknak ezek a molekulák és az általuk alkotott membránok maradéktalanul megfelelnek. A foszfolipidek amfipatikusak, ezért a membrán önrendeződő. A lipidek szabad oldalirányú mozgása és a ritka flip-flop miatt a membrán kétdimenziós folyadékként viselkedik, ami nagyfokú alkalmazkodóképességet biztosít a chemotonnak, amennyiben az esetleges mechanikai torzító hatásokra és az ozmotikus stresszre kellő rugalmassággal képes reagálni. Ezt nagyban segíti, hogy a lipidmolekulák mozgása miatt átmenetileg képződő hézagokon át a víz képes a membránon átdiffundálni.

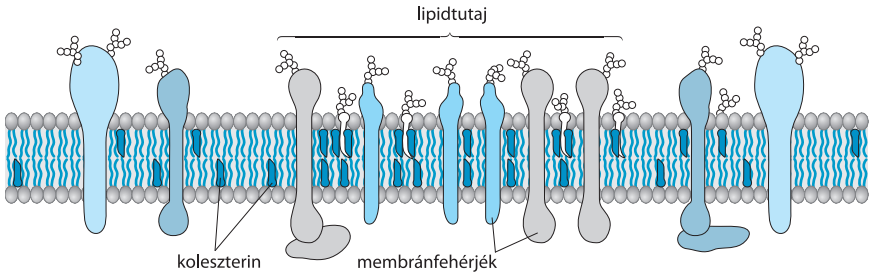
A koleszterin • A membrán a foszfatidokon kívül más lipideket is tartalmaz, melyek közül ki kell emelni a szteránvázis koleszterint (3.2. ábra).

A koleszterin növeli a membrán merevségét.

A koleszterin a zsírsavláncok közé épülve növeli a membrán merevségét, rigiditását. E tulajdonsága miatt fontos a lipidtutajok kialakításában (3.3. ábra).



3.2. ábra. A szteránvázis koleszterin szerkezete



3.3. ábra. A koleszterin elhelyezkedése a membránban és a lipidutajok felépítése. A funkcionálisan kapcsolt fehérjék egymás közelében pozicionálódnak

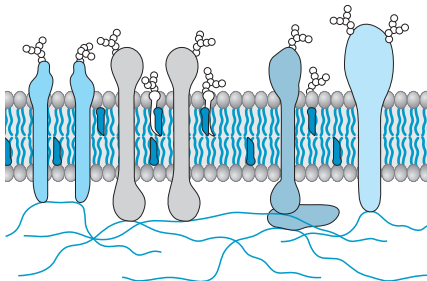
A szorosan együttműködő membránfehérjék egymás közeléből történő eldiffundálását meg kell akadályozni. A rigiditás növelése az oldalirányú diffúziót akadályozza, emiatt a fehérjék egymás közelébe horgonyozódnak.

A membránfehérjék • A biológiai membránok több-kevesebb fehérjét is tartalmaznak. Mennyiségük átlagosan 50% körül mozog, de ez jelentősen eltérhet sejttípustól, vagy a sejt pillanatnyi állapotától függően.

Elhelyezkedésük szerint megkülönböztetünk perifériás és a membránba épülő integráns fehérjéket. Utóbbiak fontos típusát képezik a transzmembránfehérjék, melyek a lipid kettősrétegen keresztülnyúlnak. A membrán belsejébe nyúló részek apoláris aminosavai miatt az integráns fehérjék a membránból igen ritkán lépnek ki. Ugyanakkor oldalirányban képesek diffundálni, amit viszont akadályozhat, hogy a membránfehérjék eukariótákban a sejtváza fehérjéihez rögzülhetnek (3.4. ábra).

A membránfehérjék feladatai szerteágazóak. Jelentősek a jelátviteli folyamatokban és így a sejt környezeti ingerekre adott reakciójában. Egyes membránfehérjék (illetve a hozzájuk, vagy a lipidekhez gyakran kapcsolódó szénhidrátláncok) teszik az immunrendszer számára felismerhetővé a sejtet, mások a sejtek egymáshoz való kapcsolódásában fontosak.

A sejtváz • A sejtváz a fehérjék rögzítésén kívül felel egyebek közt a membránátrendeződéssel járó transzportfolyamatokért, a sejt szervecskék és a kromoszómák pozicionálásáért, a sejt alakjának megtartásáért és az ozmotikus duzzadás ellensúlyozásáért. Ezekre ebben és a következő fejezetben többször kitérünk.



3.4. ábra. A membránfehérjék a sejtváza (citozskeleton) rögzülhetnek

A membránfehérjék a sejtváza fehérjéihez rögzülhetnek.

Sejtmonstrumok

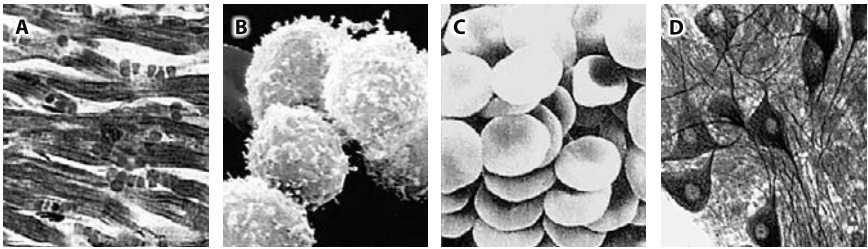
A 2. fejezetben a következőképpen definiáltuk az élő rendszereket. „Az élet alapegységei – a sejtek – olyan homeosztatis, evolúcióképes rendszerek, melyek információs, anyagcsere- és határoló alrendszerekből épülnek fel; az információs alrendszer programozza az anyagcsere-folyamatokat, ezen keresztül saját replikációját. Ezek a rendszerek összehangolt működésű, nagyobb egységekbe szerveződhetnek, és szervezeteket, illetve társadalmakat alkothatnak.” Eddig a sejtekről volt szó. A könyv második részében a sejtekből felépülő komplexumokkal foglalkozunk.

A baktériumok jellemzően magányosan, esetleg kisebb csoportokban élnek, míg a növények és az állatok evolúciója során kialakult a sejtek közötti nagyfokú differenciáció és munkamegosztás. Ez is, az is működőképes stratégia. Ha egy emberi szervezet 10^{14} sejtből áll, akkor 7 milliárd ($7 \cdot 10^9$) fővel számolva bolygónkon $7 \cdot 10^{23}$, tehát közel 10^{24} emberi sejt él! Ez óriási szám, amit az ismeretterjesztő irodalomban divatos módon így is mondhatunk: millió-milliárd-milliárd. És ezek csak az emberi sejtek, de a Földön hatalmas tömegben élnek más soksejtű élőlények: állatok, növények és gombák. Tehát a magas szinten szervezett, munkamegosztáson alapuló életforma mindenképpen sikeresnek nevezhető. Az egyedi soksejtű organizmusok pedig jól szervezett szuperorganizmusokat, társadalmakat alkothatnak.

5.1. A SEJTEK EGYÜTTMŰKÖDÉSÉNEK DURVA HANGOLÁSA: A TEST SZERKEZETE

A földi élet evolúciója nem állt meg az egysejtű élőlények szintjén. Bizonyos sejtek valamiért hajlamosak társulni egymással és kisebb-nagyobb csoportokat alkotni. A kisebb csoportok, melyek egymáshoz igen hasonló sejtekből állnak, a sejthalmazok: ezekben a sejtek alakai és működési különbségei legfeljebb minimálisak, köztük munkamegosztás lehet ugyan, de az közel sem olyan kifinomult, mint a komplexebb szervezetekben. A sejthalmazoknál differenciáltabbak a telepes élőlények, mint például a mohák, vagy egyes moszatok. Az állatok esetében az ennek megfelelő szerveződési szintet álszövetesnek nevezzük.

A legmagasabb rendű szerveződést képviselik a szövetes élőlények. Ezekben a differenciáció, a sejtek munkamegosztása igen magas fokú. Ez különösen az állati szervezetekben látványos, ezért a továbbiakban ezekkel foglalkozunk. Az egyes állati sejttípusok között az alakai és működésbeli differenciálódás jelentős (5.1. ábra).



5.1. ábra. Néhány emberi sejttípus (A: szívizomsejtek, B: fehérvérsejtek, C: vörösvérsejtek, D: idegsejtek) alakai eltérései. Az ábra a nagyfokú differenciációt illusztrálja

A munkamegosztás a hatékonyság radikális növelését okozza.

A munkamegosztás előnyei • Milyen előnyei vannak a differenciációnak és a munkamegosztásnak? Ennek megértéséhez gondoljunk az iparban is alkalmazott munkamegosztásra, ami a hatékonyság radikális növelését okozza. Például egy atomerőművet egyetlen szakember nem tudna teljes egészében megépíteni. Nem érthet az összes munkafolyamathoz: a nukleáris tüzelőanyag megfelelő kezelésétől a hegesztésen át az elektronikáig. Az, hogy az egyes munkafolyamatokra szakemberek specializálódnak, összehasonlíthatatlanul hatékonyabbá teszi a munkát és rendkívül komplex szerkezetek megépítését teszi lehetővé.

Hasonlóképp a szervezet sejtjei is különböző feladatokat látnak el. Az ivarsejtek felelnek az örökítőanyag utódokba való átadásáért, a fehérvérsejtek képesek kiiktatni a kórokozókat, a vörösvérsejtek oxigént szállítanak, a zsírsejtek tápanyagot raktároznak, az idegsejtek elektromos jeleket továbbítanak. Mindezen feladatokat egyetlen sejt még nagyon rossz hatékonysággal sem lenne képes ellátni.

A munkaszervezés • Egy ilyen differenciált struktúrában, amelyen egy komplex szervezet, minden sejtnak pontosan ismernie kell a feladatát, másképp a rendszer működése káoszba fulladna. A különböző sejtípusoknak nem véletlenszerűen összekeveredve, hanem meghatározott rendben, térbeli mintázat szerint kell elhelyezkedniük és szerveket, szervrendszereket, testtájakat alkotniuk. A különböző szervek működését az aktuális környezeti hatásoknak, szükségleteknek megfelelően be kell állítani és össze kell hangolni.

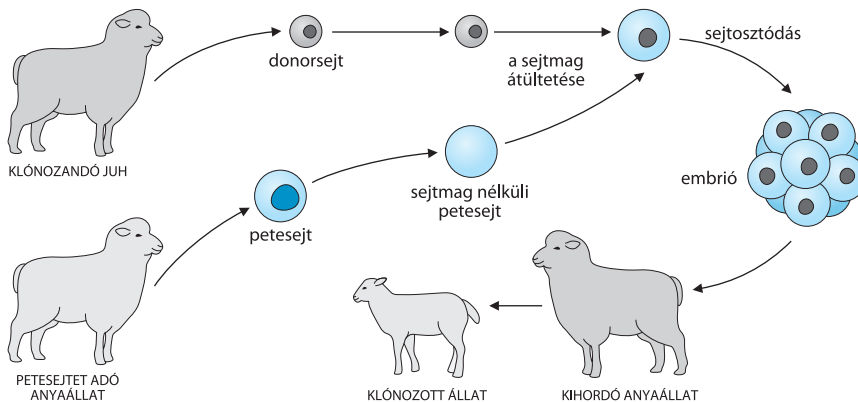
Minden sejtnak pontosan ismernie kell a feladatát.

Hogyan zajlik a sejtek differenciációja? Hogyan kódolja a DNS a szervezet térbeli felépítését? Hogyan képes a szervezet összehangolni a sejtek működését és milyen módon tud egységes egészként reagálni a környezet változásaira? Ebben az alfejezetben ezeket a kérdéseket vizsgáljuk meg, elsősorban az állati szervezetek vonatkozásában. És persze a figyelmes olvasó fejében felmerülhet még egy probléma: miért működnek együtt a sejtek? Ha megértjük az együttműködés módját, mechanizmusait, még nem értjük az okát. Ez már a következő fejezet tárgyát képezi.

A differenciáció: a különböző feladatokra specializálódott sejtípusok elkülönülése

A genomi ekvivalencia • Testi sejteink mindegyike egyetlen sejtől, a zigótából alakul ki. Sejteink különbségére kézenfekvőnek látszik az a magyarázat, hogy egyikből ezek, a másiból pedig amazok a gének vesznek el, s ez okozza a differenciációt. Ez azonban nem így van. A genomi ekvivalencia elve értelmében egy szervezet minden testi sejtje ugyanazt a genetikai állományt tartalmazza, függetlenül a sejt felépítésétől és működésétől. (Kivételt képeznek például a kifejlett vörösvérsejtek, amelyek az érés során elveszítik sejtmagjukat.) A sejtek közötti különbség nem a génösszetétel-beli különbségből ered, hanem abból, hogy a különböző típusú sejtekben ugyanabból a génkészletből más és más gének aktívak.

Különböző sejteink ugyanazt a genetikai állományt tartalmazzák.



5.2. ábra. Juh klónozása. A petesejt sejtmagjának helyére testi sejt magját ültetik, majd az így létrehozott zigótát osztódásra bírják. Az embriót azután egy nőstény méhében ültetik, ahol kifejlődik és megszületik az utód