A BIOLÓGIAI JELENSÉGEK FIZIKAI HÁTTERE

Zimányi László

Az alapvető fizikai kölcsönhatások
Termodinamika és komplexitás
Elektrosztatika a biológiában
Membránpotenciál
Elektromágneses sugárzás

Az alapvető fizikai kölcsönhatások

A fizikai törvényszerűségek érvénye az élővilágra is kiterjed. A jelenleg ismert élővilág 0 és 200°C közötti hőmérsékleteken és nem túl nagy nyomáson lejátszódó olyan atomi és molekuláris folyamatokon alapul, amely folyamatokban alapvető szerepe van a víznek és az elemek egy viszonylag szűk körének.

A négy ismert alapvető kölcsönhatás, tehát az erős, az elektromágneses, a gravitációs és a gyenge kölcsönhatás közül messze a legnagyobb jelentőségű az élet szempontjából az elektromágneses kölcsönhatás. Az erős és a gyenge kölcsönhatás hatótávolsága ugyanis az atommagok (10^{-15} m), illetve az elemi részecskék (10^{-18} m) mérettartományába esik, ennél nagyobb távolságokban nincs jelentőségük. Az elektromágneses kölcsönhatás és a gravitációs kölcsönhatás (azaz az általános tömegvonzás) hatótávolsága elvileg végtelen. A gravitációs kölcsönhatás igen gyenge, ezért csak nagyon nagy tömegek esetén van jelentősége. Az elektromágneses kölcsönhatás nagyságrendekkel erősebb a tömegvonzásnál, de a tömegvonzással ellentétben leárnyékolható, hiszen elektromos töltésből van negatív és pozitív is (szemben a mindig pozitív tömeggel). A molekuláknak az életfolyamatokat is megalapozó kialakulását és viselkedését a kvantummechanika magyarázza meg, a kvantummechanika pedig az atomi (molekuláris) méretű testek viselkedésének elmélete elsősorban elektromágneses térben.

Termodinamika és komplexitás

Az élő anyag legfontosabb tulajdonságai az összetettség és a bonyolultság (komplexitás): a szerves molekulákból általában jól meghatározott szerkezetű makromolekulák, ezek kapcsolódásából sejtalkotó elemek (pl. citoszkeleton, lipid-fehérje membránok stb.), sejtek, szövetek, szervek és egyedek épülnek fel. Mindez ellentmondani látszik a termodinamika második főtételének, amely a rendetlenség (az azt leíró fizikai mennyiség, az entrópia) növekedését „írja elő” minden magától végbemenő folyamatra (ilyenek például az életfolyamatok). Az entrópia növekedésének törvénye azonban csak a zárt rendszerekre igaz. Az élő rendszerek termodinamikai értelemben nyitott rendszerek, környezetükkel együtt alkotnak zárt rendszert. Egy nyitott rendszer és környezete esetén a rendszerbe a környezetből áramló energia teszi lehetővé azt, hogy a rendszer szerkezete bonyolultabb, szervezettsége, rendezettsége egyre magasabb fokú legyen, de ennek „ára” a rendetlenség növekedése a környezetben. A földi bioszférára vonatkoztatva végül is az állandóan beáramló energia forrása a Nap, és ez teszi

lehetővé a bioszférában tapasztalt magas fokú szerveződést. Ahogy a termodinamika második főtétele, ugyanúgy az első főtétel, az energiamegmaradás is általános érvényű az élő rendszerekben, illetve az élő rendszerek és környezetük együttesében. Az energiamegmaradás törvénye akár egyetlen molekulára vagy atomra és a környezetére is érvényes. Az entrópia (rendetlenség) növekedésének törvénye viszont valószínűségen alapuló törvény, ezért csak nagyszámú egyedből (pl. hasonló molekulákból) álló sokaságra értelmezhető. Az élő sejtekben lezajló (bio)kémiai folyamatokra már teljesül ez a feltétel, tehát a folyamatok – ahogy a kémiai folyamatok általában – azért mennek maguktól végbe, mert a rendszernek és környezetének az összes entrópiája növekszik. Ha csak a rendszert szemléljük a környezete nélkül, akkor a spontán folyamatok irányát az energiaminimumra és entrópiamaximumra való együttes törekvés szabja meg (ez az elméletben úgy írható le, hogy egyensúly esetén a rendszer szabadentalpia függvényének minimuma van – ez a függvény a rendszernek mind az energiáját, mind az entrópiáját tartalmazza). A törvény azonban nem mond semmit a folyamatok sebességéről. Azt a nem egyensúlyi termodinamika magyarázza meg. Eszerint a spontán folyamatok sebessége (pl. az energia és az anyag áramlásának sebessége) annál nagyobb, minél távolabb van a folyamat az egyensúlytól. Az élő rendszerek a környezetükkel folytatott energia- és anyagcsere miatt sohasem érik el a termodinamikai egyensúly állapotát.

Az ekvipartíció elve szerint T abszolút hőmérsékleten egy rendszer minden szabadsági fokára átlagosan $kT/2$ energia jut, ahol k a Boltzmann állandó ($1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K). Ez szobahőmérsékleten (295 K) kb. $2 \cdot 10^{-21}$ J energiát jelent. A (bio)kémiai reakciók, így például az enzimreakciók sebességét a hőmérséklet is befolyásolja. Annak a valószínűsége, hogy a reaktánsok egységnyi idő alatt eljutnak az aktivált komplex állapotába, arányos $exp(-E_a/kT)$-vel, ahol E_a az aktiválási energia. Ez utóbbit csökkentik a katalizátorok (az enzimek), ezzel felgyorsítva adott T hőmérsékleten a reakciót.

Elektrosztatika a biológiában

Kiemelt szerepe van az álló (vagy elhanyagolható sebességgel mozgó) elektromos töltések közötti kölcsönhatásnak (lásd Coulomb-törvény). Elektromos kölcsönhatás jön létre töltések között, töltés és dipólus, dipólus és dipólus között. Egy töltés vagy dipólus elektromos terében egy semleges molekula polarizálódhat (indukált dipólus keletkezhet). Az élő anyagra jellemző elektrolitikus vizes oldatokban a töltések, dipólusok és indukált dipólusok között fellépő erők felelősek a nem kovalens kölcsönhatásokért. Maga a vízmolekula is dipólus, így töltések közelében rendeződik (jó példájaként az energiacsökkenésre és entrópianövekedésre való ellentétes törekvések egyensúlyának). Töltetlen, hidrofób molekulák közelében a víz rendeződését nem kompenzálja az elektrosztatikus kölcsönhatás, ezért kedvezőbb, ha ilyen találkozás minél kisebb felületen jön létre. Ez szerepet játszik olyan fontos jelenségekben, mint például a biomembránok vagy a fehérjék végleges szerkezetének kialakulása. Ugyancsak elektrosztatikus kölcsönhatások, valamint hidrogénkötések a felelősek sok molekuláris felismerőfolyamatban, mint amilyenek a fehérjealegységek, illetve a fehérjék és szubsztrátjaik összekapcsolódása (pl. a fehérjék felszínén olyan töltésmintázatok találhatók, amelyek ellentett töltésmintázata megtalálható a partner molekula felszínén).

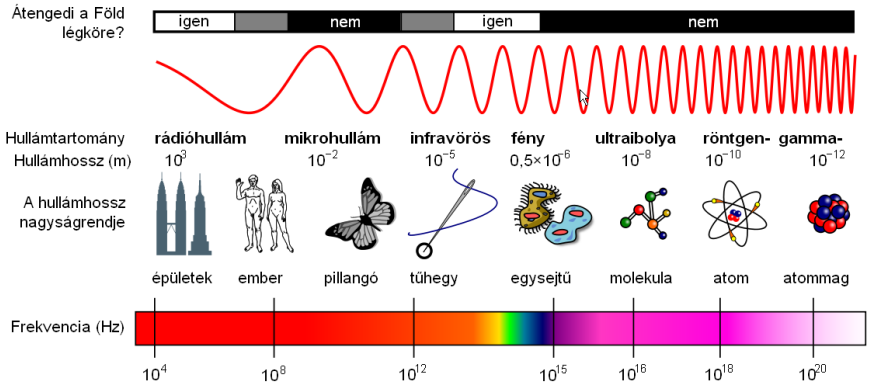
Membránpotenciál

A biológiai membránok a kisméretű ionok számára átjárhatatlanok, illetve csak speciális membránfehérjéken keresztül átjárhatók. A membránok két oldala között gyakran elektromospotenciál-különbség alakul ki, és egyes molekulák, ionok koncentrációja is eltérő lehet a két oldalon. Ez az energiaátalakító membránok esetén (pl. tilakoid membrán, a mitokondrium belső membránja) az elektrontranszportot (a redox reakciókat) és az ATP-szintézist összekötő energetikai kapocs. Az elektromospotenciál-különbség az elektrosztatikai, a koncentrációkülönbség az „entrópikus" hozzájárulást jelenti a teljes energiához.

Az F_1-F_0–ATP szintetáz (ATP-áz) enzim a legszebb példája az energiaátalakításnak. A protonok az elektrokémiai potenciálkülönbség hatására átáramlanak az ATP-áz transzmembrán, turbinaszerű részén (F_0), azt forgómozgásba hozva (elektrosztatikus kölcsönhatás). A mechanikai forgás áttevődik egy tengelyre, s ez a membránból kilógó fehérjerészben (F_1) forogva ciklikus konformációváltozást okoz (mechanikai kölcsönhatás). Az F_1 konformációváltozásai érintik saját ADP/ATP kötőhelyeit, energizálva az oda bekötő ADP- és foszfátmolekulákat, és létrehozva közöttük a kovalens kötést. Ugyancsak a transzmembrán potenciál, leginkább annak elektromos komponense teszi lehetővé az idegi ingerület kialakulását és terjedését.

Elektromágneses sugárzás

Az elektromágneses tér részecskeként hat kölcsön az anyaggal akkor, ha energiája *(E = hv)* megfelel például egy molekula alap- és gerjesztett állapota közötti energiakülönbségnek (rezonancia). Itt *v* a hullám frekvenciája (mértékegysége 1/s, azaz Hz), *h* a Planck-állandó ($6{,}63 \cdot 10^{-34}$ W). Az elnyelő (bizonyos esetekben fénykibocsátó) molekulák *hv* energiájú csomagok, ún. fotonok elnyelésére (kibocsátására) képesek, tehát ennyivel változtatják az elektromágneses tér teljes energiáját, azaz az intenzitást. A dózis a valamely időtartam alatt elnyelt összes foton energiája. Az ultraibolya és a röntgensugárzás fotonjainak energiája már képes a kémiai kötéseket felszakítani. Károsító hatásuk szempontjából a dózis a meghatározó. Az elektromágneses tér hullámként lép kölcsönhatásba az anyaggal akkor, ha a fenti megfelelés nem áll fenn. Ekkor a sugárzás (fény) számára átlátszó közeg, például a szem alkotóelemei a fénytörésen alapuló leképezésben, éles kép létrehozásában játszanak szerepet. *(1. ábra.)*



1. ábra. Az elektromágneses spektrum – forrás: http://hu.wikipedia.org/wiki/Elektromágneses_spektrum