

zõ felmelegedés olyan nagy mértékű lehet, hogy beindul a hélium magok fúziója. A héliumot égető csillagok sugárnyomása a csillag anyagát igen nagy méretűre képes fel-fújni. Ezek a vörös óriások.

A fentebb elmondottak szerint az Ia típusú szupernóvák segítségével megmérhetjük azon galaxisok távolságát is, amelyek esetén minden eddig ismert távolságmérési eljárás felmondja a szolgálatot. Két csillagász csoport, egymástól függetlenül arra a megállapításra jutott, hogy a nagyon távoli galaxisok esetén a sebesség és a távolság közötti összefüggés nem olyan lineáris függvény mint azt eddig hittük. Az egyenes elkanyarodik a nagyobb távolságok irányába.

7. Mi a magyarázata annak, hogy az Univerzum gyorsulva tágul?

Az utóbbi években a gyorsulásra számos magyarázatot próbáltak adni. Ezek közül a legdrasztikusabb az, hogy a gravitációelmélet módosításra szorul. Más magyarázatok a quintessencia, illetve a sötét energia fogalmával operálnak. Itt ezekre most nem térünk ki. Ehelyett inkább egy a józan ésszel könnyen átlátható, ezért szimpatikus magyarázatot ismertetünk, amelyet három fiatal kutató: Bene Gyula, Czinner Viktor és Vasuth Máttyás a közelmúltban publikált. Ez a magyarázat abból indul ki, hogy az égen a galaxisok eloszlása nem homogén. Ez biztosan igaz. Bevezetik a homogén eloszlástól való eltérést, a fluktuációkat a mértékét. A Friedmann egyenleteket a perturbáció számítás eszközeivel oldották meg, és másodrendű közelítésig figyelembe vették a fluktuációk hatását. Eredményül azt kapták, hogy a fluktuációk negatív nyomást eredményeznek. A fluktuációk mértékét meg lehet úgy választani, hogy a számítás visszaadja az Univerzum tágulásának gyorsulását. Ennek ellenére ez a magyarázat még ellenőrzésre szorul. Érdekes megemlíteni, hogy ez a magyarázat egy igen egyszerű formában is megfogalmazható. Az eredeti Friedmann modellben, a galaxisok alkotta gázt ideális gáznak tekintik, amit az jellemez, hogy a gáz részecskéi nem hatnak egymásra. Az állapotegyenlet:

$$p V = RT \text{ (ha } T \rightarrow 0, \text{ akkor } p \rightarrow 0)$$

Tekintsük ezt a gázt reális gáznak, amelyben a részecskék hosszúhatótávú vonzást gyakorolnak egymásra. A reális gázok van der Waals-féle állapotegyenlete:

$$(p + A \rho^2) (V - V_0) = R T,$$

ahol az $A \rho^2$ tag a vonzó kölcsönhatást veszi figyelembe, V_0 pedig a részecskék saját térfogata, ami annál jelentéktelenebb, mennél hígabb a gáz. Ezen, a reális gázokra vonatkozó állapotegyenletheől következik, hogy ha $T \rightarrow 0$, akkor $p \rightarrow -A \rho^2$, azaz a nyomás negatív! Ez kvalitatíve megegyezik a fluktuációk elemzéséből származó eredménnyel.

A fiatal kutatók által bevezetett magyarázat tehát azt mondja, hogy az Univerzumot alkotó galaxisok nem ideális gázt, hanem reális gázt alkotnak, ami nyilvánvalóan igaz, hiszen a galaxisok között gravitációs vonzás uralkodik.

Lovas István

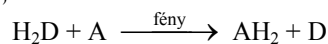
a Magyar Tudományos Akadémia tagja

Energiaátalakulási folyamatok a növényekben

A növényi anyagcsere egyik legjellemzőbb vonása, hogy a növények képesek a fényenergiát szerves anyagok előállítására felhasználni. Azon folyamatok összességét, melyek során a növényi szervezet fényenergia jelenlétében szervesanyagokból szerves anyagokat épít fel, fotoszintézisnek nevezzük. Ahhoz, hogy növekedési és fejlődési folyamatait, a testen belüli állandó megújulásokat, az aktív anyagszállítási és mozgá-

si jelenségeket, illetve életben maradását biztosítani tudja, minden élő szervezetnek szüksége van energiára. Az autotróf növények és egyes baktériumtípusok ezt az energiát közvetlenül a napfényből szerzik be. Az állati szervezetek, a gombák és a heterotróf mikroorganizmusok a napfény energiáját nem tudják közvetlenül hasznosítani, ezért ezek közvetetten jutnak a fény által biztosított energiához úgy, hogy növényeket, növényevő állatokat vagy elpusztult élőlényeket fogyasztanak. Tehát végső soron az egész élővilág számára az energiát a fotoszintézis során átalakított fényenergia szolgáltatja. A fotoszintézis általános jelentősége akkor is könnyen belátható, ha meggondoljuk, hogy a Föld jelenlegi légkörének oxigéntartalma fotoszintetikus eredetű. Továbbá, az üzemanyagként használt kőszén, kőolaj és földgáz is a régóta letűnt földtörténeti korok növényei által végzett fotoszintézis közvetlen vagy közvetett eredménye.

Ha általános reakcióegyenlet formájában akarjuk a fotoszintézis lényegét megfogalmazni, akkor azt kell szem előtt tartani, hogy a fotoszintézis egy redoxfolyamat, melynek során valamilyen elektrondonorról úgy jut át az elektron egy akceptorra, hogy ahhoz a szükséges energiát a fény szolgáltatja. Így a fotoszintézis legáltalánosabb egyenletét a következőképpen írhatjuk fel:



ahol H_2D az elektrondonor, A pedig az akceptor.

A fotoszintetizáló szervezetek döntő többsége, egyes zöldbaktériumokat és a bíborbaktériumokat kivéve, a vizet használja fel elektrondonorként ahhoz, hogy redukálja a szén-dioxidot vagy más elektrónakceptort. Ilyenkor a víz oxidációja során oxigén képződik. A szén-dioxid a fotoszintézisben a legjelentősebb elektrónakceptor, azonban a legtöbb növényben a szén-dioxid mellett a nitrát- és a szulfátion is betöltheti az elektrónakceptor szerepét. A nitrogénkötő cianobaktériumokban a molekuláris nitrogén, egyes zöldalgákban pedig a hidrogénion (H^+ , proton) is lehet akceptor, melyből ilyenkor oxigénmentes környezetben hidrogén gáz termelődik. A hidrogén előnyös tulajdonságokkal rendelkező üzemanyag, ezért jelenleg számos biotechnológiai kutatás foglalkozik előállításának a fényenergia segítségével történő hatékonyabbá tételével.

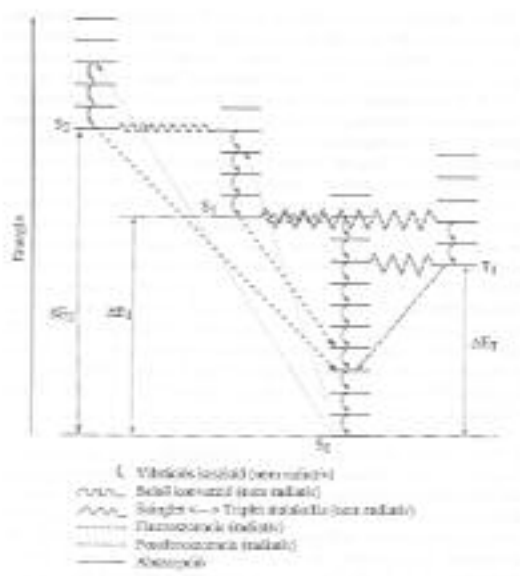
A fényenergia kémiai energiává történő átalakításának első lépése a *fény abszorpciója*. A Nap által kisugárzott fény spektruma az ultraibolyától az infravörös tartományig végig folytonos. Mivel a fotoszintézis során az elnyelt elektromágneses sugárzásnak kémiai változást kell előidéznie, az infravörös sugárzás energetikai okokból (túl kis energiátartalma miatt) nem alkalmas erre a célra. Az elnyelt foton energiájának nem szabad túl nagyra sem lennie, mert ebben az esetben az abszorbeáló molekula atomjaira bomolhat, ami a fotoszintézis szempontjából nem kívánatos. Ahhoz, hogy egy anyag kémiai reakcióba lépjen, elegendő, ha a foton a molekulát gerjesztett állapotba hozza. A hullámhossz növekedésével a fotonok energiátartalma csökken. A 350 nm hullámhosszú kék fotonok energiája 342 kJ/Einstein, míg a fotoszintézis alkalmával még elnyelődő 1050 nm-es sötétvörös fotonok energiája csupán 114 kJ/Einstein. Ez az energiáérték kisebb a kémiai kötések energiájánál. A víz O–H kötésének felbontása például 465 kJ energiát igényel. Tehát a fotoszintetizáló szervezetekben abszorbeált fotonok közvetlenül nem okoznak *fotolízist* (fény hatására történő bomlás), viszont energiájuk elegendő ahhoz, hogy egy kémiai kötést fellazítsanak, és így aktivált, tehát reakcióképes állapotba hozzák a molekulát.

Fényelnyeléskor a molekula alapállapotból gerjesztett állapotba, vagyis egy alacsonyabb energiaállapotból egy energiagazdagabb állapotba kerül. Azonban a molekulák már alapállapotban sincsenek teljesen azonos energiaszinten, mivel elektronjaik különböző vibrációs és rotációs energiaszinteket foglalnak el. Összetett molekulák esetében

ezek a szintek egymáshoz nagyon közel vannak, ezért nem adnak különálló abszorpciós vonalakat, hanem összemosódnak és széles abszorpciós sáv jelenik meg. Ez a helyzet a fotoszintetikus pigmentek (klorofilok és karotenoidok) fényelnyelése esetében is.

A fényabszorpciókor történő elektronátmenetekkel járó energiaváltozásokat úgynevezett energiadiagramokon szokták ábrázolni (1. ábra).

A foton elnyelésekor a molekulának egy π -elektronja a π -kötőpályáról π^* -lazítópályára lép át. A Pauli féle tilalmi elv értelmében minden pályán két elektron tartózkodhat, ellentétes spinnel. Ekkor a molekula szingulett (S) állapotban van. Alapállapotban a klorofillmolekulák szingulett állapotban vannak. A foton abszorpciója után az egyik elektron másik pályára kerül. Ha az átlépett és a visszamaradt elektron spinje továbbra is ellentétes (antiparalell), akkor a molekula szingulett gerjesztett állapotba kerül, ha pedig azonos spinűvé válik a két elektron, akkor metastabilis tripllett (T) állapotba jut a molekula.



1. ábra

Egy klorofill molekula lehetséges gerjesztési energiaszintjei és ezek kölcsönhatásai fényelnyelés során

Fényabszorpciókor a becsapódó foton által gerjesztett elektron különböző lazító pályákra kerülhet, melyeknek különböző az energiaszintje. A molekuláknak több szingulett és tripllett állapotuk létezhet (S_1 , S_2 , S_3 , T_1 stb.). A különböző szingulett és tripllett állapotoknak is egyenként több alszintjük van. A molekula a magasabb gerjesztett állapotból (S_2 , S_3 stb.) igen gyorsan fénykiszugárzás nélkül (hővé alakult energia leadásával) S_1 állapotba, azaz a legalacsonyabb gerjesztett szingulett állapotba jut. Az S_1 állapot sokkal stabilabb állapotot képvisel, mint az S_2 vagy S_3 állapotok, ezért az S_1 állapotba került molekula sorsa többféle képpen alakulhat. Az S_1 legalacsonyabb vibrációs alszintjéről a molekula visszatérhet az S_0 (alapállapot) bármelyik vibrációs alszintjére úgy, hogy közben az energiakülönbséget fénykiszugárzás formájában adja le. Ezt a fénykiszugárzást *fluoreszcenciának* nevezzük. A fluoreszcencia mindig nagyobb hul-

lámhosszaknál jelentkeznek, mint az abszorpciós sáv, mivel az $S_0 \rightarrow S_1 \rightarrow S_0$ átalakulások során a gerjesztési energia egy része hővé alakul.

Az S_1 állapotból a molekula fénykisugárzás nélkül is visszatérhet alapállapotba, amikor a gerjesztési energia teljes mértékben hővé alakul. Ezt a folyamatot *belső konverzió*nak nevezzük. Az S_1 molekula T_1 állapotba is kerülhet, szintén fénykisugárzás nélkül. Ekkor az S_1 és T_1 meghatározott vibrációs alszintjei azonos energiaértékeket képviselnek. Az $S_1 \rightarrow T_1$ átmenet után a molekula vibrációs energiája tovább csökken, egészen a legalacsonyabb vibrációs alszintig, amely kisebb energiaszintet képvisel, mint az S_1 legalacsonyabb vibrációs alszintje. A triplett állapot közepes élettartama több nagyságrenddel nagyobb, mint a szingulett állapoté. $T_1 \rightarrow S_0$ átmenet, habár viszonylag ritka, szintén történhet fénykisugárzással, amit *foszforeszcencia*nak nevezünk. A foszforeszcencia intenzitásában messze elmarad a fluoreszcenciától. A T_1 állapotból is van lehetőség fénykisugárzás nélkül visszatérni az alapállapotba. Mivel a T_1 állapot élettartama igen hosszú, lehetőség van arra is, hogy a molekula környezetéből energiát vegyen fel és végbemenjen egy $T_1 \rightarrow S_1$ átmenet, azaz a molekula triplett gerjesztett állapotból szingulett gerjesztett állapotba jusson vissza.

A gerjesztett állapotból fénykisugárzással vagy belső konverzióval való visszatérés az alapállapotba olyan folyamat, amelynek során az abszorbeált fényenergia a fotoszintézis számára elvész. A fotoszintézis során akkor hasznosul a gerjesztési energia, ha a gerjesztett klorofillmolekulák kémiai reakcióba lépnek. A *fotokémiai reakció* csak az S_1 és T_1 szintekről történhet. A fotoszintézisben a klorofilok fotokémiai reakciójának az a lényege, hogy a lazító pályára juttatott *elektront* a klorofillmolekula átadja egy, közvetlenül a környezetében lévő elektronakceptornak. Ezáltal a klorofill oxidációt szenved és az átadott energiadús elektron helyett egy, szintén a közvetlen környezetében lévő donortól vesz föl egy energiaszegény elektront. Vagyis az egész folyamat során az történik, hogy energia-befektetéssel, amelyet a klorofilok által elnyelt fény biztosít, a klorofill közvetítésével a donor molekuláról az akceptor molekulára jut egy elektron. Ahhoz, hogy a klorofillmolekula elektronközvetítésben vegyen részt az szükséges, hogy közvetlen kapcsolatban legyen mind az elektrondonorral, mind az akceptor molekulával. Azonban a klorofillmolekulák többsége olyan molekuláris környezetben helyezkedik el, ami nem ad lehetőséget a fotokémiai reakcióban való részvételre. A fotokémiai reakciók csak az úgynevezett reakciócentrumokban mennek végbe, ahol a molekuláris elrendeződés lehetővé teszi a résztvevő tagok között az elektroncserét. Ilyen reakciócentrumot pedig minden növényben csak kétféle *a*-típusú klorofill képvisel.

Az S_1 és T_1 állapotú klorofill nemcsak fénykisugárzással vagy belső konverzióval (hőleadással) térhet vissza alapállapotába, amikor is a gerjesztési energia a fotoszintézis számára elvész, hanem az ún. *rezgéstranszfer* során a gerjesztett S_1 vagy T_1 molekulák átadhatják gerjesztési energiájukat egy másik, alapállapotban lévő molekulának. Ebben az esetben az alapállapotban lévő molekula kerül S_1 , illetve T_1 állapotba. Az energiaátadás kémiaiilag különböző és azonos molekulák között is lejátszódhat. Ha kémiaiilag azonos molekulák között történik, akkor a folyamat többször ismétlődhet, azaz egy foton abszorpciója során a felvett gerjesztési energia molekuláról molekulára adódhat át, amit *energiamigráció*nak nevezünk. A kémiaiilag különböző molekulák (pl. *b*-klorofill \rightarrow *a*-klorofill) között lejátszódó energiatranszfert az azonos molekulák között (pl. *a*-klorofill \rightarrow *a*-klorofill) történő energiamigráció is követheti. A molekulák közötti energiatranszfer feltétele az, hogy az energiadonor molekula emissziós vagy fluoreszcencia spektrumát legalább részlegesen fedje át az akceptor molekula abszorpciós spektruma. A transzfer határfoka annál nagyobb, minél nagyobb mértékű a spektrumok átfedése. Erősen befolyásolja a határfokot a transzferben részt vevő molekulák egymástól való távolsága is.

Ha megvizsgáljuk a fotoszintetikus pigmentek abszorpciós és emissziós spektrumát, akkor azt tapasztaljuk, hogy köztük az energiatranszferhez szükséges spektrumátfedés

teljes mértékben teljesül. Így tehát az *a*-klorofill mellett előforduló kísérő pigmentekről (*b*-klorofill, *c*-klorofill, karotenoidok, fikobilinek) nincs energetikai akadály annak, hogy a gerjesztési energia átadódjon az *a*-klorofillnak. A fotoszintetikus apparátusban olyan nagy a pigmentek koncentrációja, hogy a molekulák elegendően közel vannak egymáshoz, így nagy valószínűséggel történhet meg az elnyelt fényenergia továbbításának folyamata.

Az *a*-klorofillokat kísérő egyéb pigmentek által abszorbeált fény csak akkor hasznosulhat a fotoszintézis folyamatában, ha a gerjesztési energia átadódik az *a*-klorofillnak, majd az energiamigráció következtében az elnyelt energia eljut a reakciócentrumok képviselő *a*-klorofill formákhoz. A reakciócentrumokban lévő *a*-klorofillok (melyek jelölése P₆₈₀ és P₇₀₀) energiacsapdaként viselkednek, mivel abszorpciós spektrumuk maximuma nagyobb hullámhossznál van, mint a közvetlen környezetükben található más *a*-klorofill formáké vagy kísérő pigmenteké. A reakciócentrumok körül a pigmentmolekulák fénygyűjtő antennákat képeznek, és bármelyik molekula nyeli el a fotont, a gerjesztési energia a reakciócentrum felé továbbítódik, ami egyenirányított energiagyűjtést jelent a fotokémiai rendszerben.

Amikor zavaró tényezők hatására a fotokémiai reakciók vagy az általuk eredményezett kémiai energiaraktárak felhasználási útjai gátolódnak, az elnyelt fényenergia egyre nagyobb hányada alakul át fluoreszcenciává vagy hővé, majd alkalmazkodási reakcióként módosul a fényenergia elnyelésének mértéke, a fénybegyűjtő pigmentrendszerek átrendeződése által.

A fentieket összefoglalva megállapítható, hogy a sugárzó napfény energiáját elnyelő fotoszintetikus pigmentek gerjesztett elektronállapotba jutnak, aminek következtében a fény energiáját négyféle képpen továbbíthatják: 1. fényt bocsátanak ki fluoreszcencia vagy foszforeszcencia által; 2. hőenergiát adnak le; 3. rezgésttranszfer útján átadják az energia egy részét egy másik pigmentmolekulának; 4. a fény energiáját átvevő elektron leadásával redoxreakciót indítanak el (elektromos energia átalakul kémiai energiává), új kémiai kötések alakulnak ki, új szerves molekulák képződnek. Ezáltal biztosítják a növények saját maguk számára és az egész élővilág számára azt az energiát, ami nélkül az életben maradás lehetetlen.

A növényekben végbemenő energiaátalakítási és tárolási folyamatok megértése hozzájárulhat a gyakorlatilag korlátlan mennyiségben jelen levő fényenergiának a jövőbeni minél nagyobb hatásfokkal való kiaknázásához, aminek következtében enyhülhetnének az élelmezési, valamint az energiahiányból adódó problémák. Ehhez viszont a növényekben zajló energiaátalakítások fizikai és kémiai folyamatainak a minél alaposabb megismerése szükséges.

Felhasznált irodalom

- 1] FODORPATAKI L., PAPP J. (2002): Ecophysiological studies based on chlorophyll fluorescence in algal cell cultures, *Contrib. Bot.*, 37: 221-230.
- 2] HALL, D. O., RAO, K. K. (2001): *Photosynthesis*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 58-66.
- 3] HELDT, H.-W. (1997): *Plant biochemistry and molecular biology*, Univ. Press, Oxford, 39-59.
- 4] KE, B. (2001): *Photosynthesis: photobiochemistry and photobiophysics*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 4-44.
- 5] LÁNG F. (1998): *Növényélettan*, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 197-226.
- 6] RAGHAVENDRA, A. S. (2000): *Photosynthesis: a comprehensive treatise*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 320-334.
- 7] RONTÓ GY., TARJÁN I. (1991): *A biofizika alapjai*, Medicina Kiadó, Budapest, 67-95.

Bartha Csaba,
egyetemi hallgató, BBTE