A termodinamika

- A metabolizmus keretében zajló anyag- és energiaáramlás a termodinamika törvényeit követi.
- **A termodinamika** a fizika energiaátalakulásokkal foglalkozó tudományterülete.
- Termodinamikai rendszerek:
  - elszigetelt rendszerek
  - zárt rendszerek
  - nyílt rendszerek

Az **elszigetelt rendszerek** és környezetük között anyag- és energiaforgalom nem zajlik. Kb. mint a termoszban lévő meleg tea.

A **zárt rendszerek** környezetükkel anyagforgalmat nem bonyolítanak le (energiaforgalom lehetséges). Kb. mint az zárt üvegben lévő meleg tea (hűl).

A **nyílt rendszerek** környezetükkel anyag és energiaforgalmat bonyolíthatnak le. Kb. mint a pohárban lévő meleg tea (párolog és hűl)..

Az energia megjelenési formái

Az energia a változás/változtatás képessége.

Az energia különböző formái:

- **Kinetikus energia = mozgási energia**
- **Termikus energia:** hőmozgással kapcsolatos kinetikus energia, **hőenergia**
- **Potenciális energia = helyzeti energia** (az anyag térbeli helyzetéből vagy szerkezetéből adódó)
- **Kémiai energia:** kémiai reakciók során felszabaduló potenciális energia.

Az energiaformák átalakulhatnak egymásba – a termodinamika 1. törvénye szerint.

Az univerzum energiatartalma állandó. A rendszer és környezete energiájának összege állandó.

Zárt rendszer energiája növelhető, ha munkát végzünk rajta, vagy hőt közlünk vele.

Szabadenergia

Fordítva: a zárt rendszer hőt adhat le a környezetének és munkát végezhet rajta miközben belső energiája csökken.

Az első főtételből azt gondolhatnánk, az energia-átalakulási folyamatok bármilyen irányban folyhatnak. Ez azonban nincs így →

A termodinamika 2. törvénye: zárt rendszer és környezete entrópiája nem csökkenhet. $\Delta S_{rendszer} + \Delta S_{környezete} \geq 0$

Az ekvilibrium (egyensúly) elérésekor a rendszer maximálisan stabil állapotba kerül. Ilyenkor S max.

A **szabadenergia**(változás) a belsőenergia(változás) munkavégzésre hasznosítható része (a többi hő formájában elvész).

Csak azok a folyamatok zajlanak le spontán, ahol ΔG *negatív.*

$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ *(G: Gibbs féle szabadenergia,; H a hőtartalom, ami állandó térfogaton megegyezik a belső energiával…)*

A metabolizmus a termodinamika szemszögéből

Az élő rendszerek sem szeghetik meg a termodinamika törvényeit.

A sejtek felépítő folyamatai során a keletkező struktúrák rendezettebbek, mint a kiindulási anyagok.

Az élő rendszerek nyílt rendszerek.

Az entrópia a szervezet növekedése során csökken, de a környezete (végső soron az univerzum) entrópiája nő.

A sejtek anyagcseréje didaktikailag (= oktatástan) két részre osztható:

Lebontó anyagcsere (katabolizmus)

Felépítő anyagcsere (anabolizmus, bioszintézis)

A két alapvető anyagcsereirány kiegészíti egymást. (Nem egymás ellen dolgoznak!)

Lebontó anyagcsere

Tápanyagokból indul ki

A tápanyagok többnyire **redukált, szerves anyagok**.

A lebontás során egyre kisebb és oxidáltabb anyagokká alakulnak. A lebontó folyamat **oxidáció** (= elektronelvonás). Az oxidáció többnyire **hidrogénleadás**sal jár (H = proton+elektron).

- A sejtekben a e^- (és a H^+) fogadómolekulája a **NAD^+**.
- Ennek egyik alkotórésze a **B3 vitamin = niacin**

Energiafelszabadító reakciósor

Az energia egy része **ATP**-ben raktározódik. A másik része hővé alakul, és elvész.

Bioszintetikus folyamatok

Egyszerű szerves vegyületekből - ill. autotrófok esetében CO_2–ból - indul ki. Az egyszerű szerves vegyületek többnyire a lebontó anyagcsere köztitermékei.

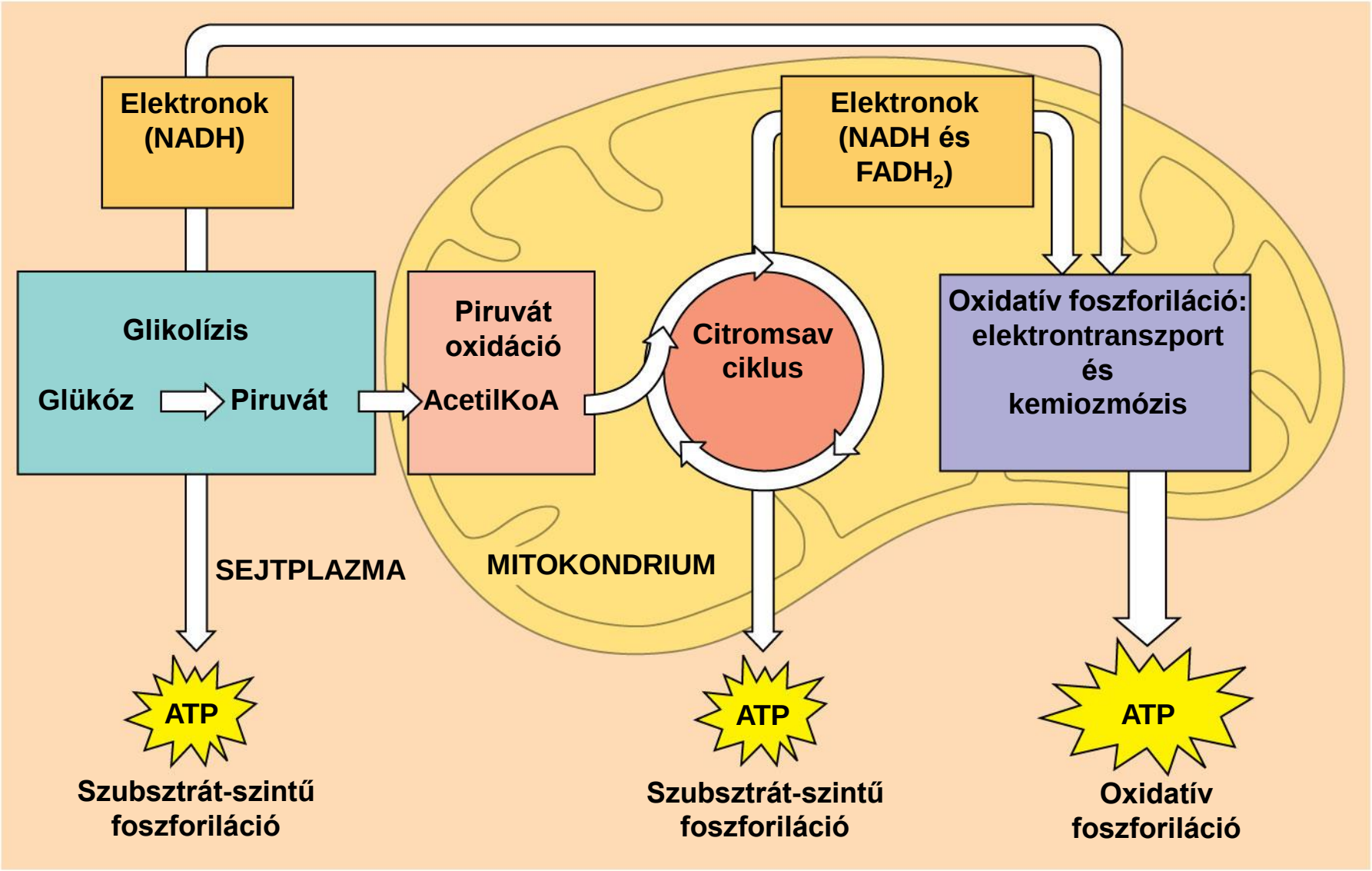
Redukciós folyamat, egyre bonyolultabb vegyületek képződnek. A szükséges elektronokat (többnyire protonnal együtt, azaz H formájában) a **NADPH** szolgáltatja.

Energiafelhasználó folyamat. Az energia **ATP**-ből származik.

- Az ATP az anyagcsere „fizetőeszköze"
- Az ATP a lebontó folyamatokban vagy a fényenergia hasznosításával képződik.
- Az ATP összeköti a lebontó és felépítő folyamatokat.

A bioszintézis mértéke nem haladhatja meg a lebontást (heterotrófokban).

A szénhidrátlebontás áttekintése



© 2011 Pearson Education, Inc.

Glikolízis

A **glikolízis** a szénhidrátok katabolizmusának kezdő lépése, melynek során egy molekula glükóz két molekula piroszőlősavvá (piruvát) oxidálódik 2ATP és 2NADH képződése mellett.

Minden élőlény képes kivitelezni és minden sejt meg tudja csinálni.

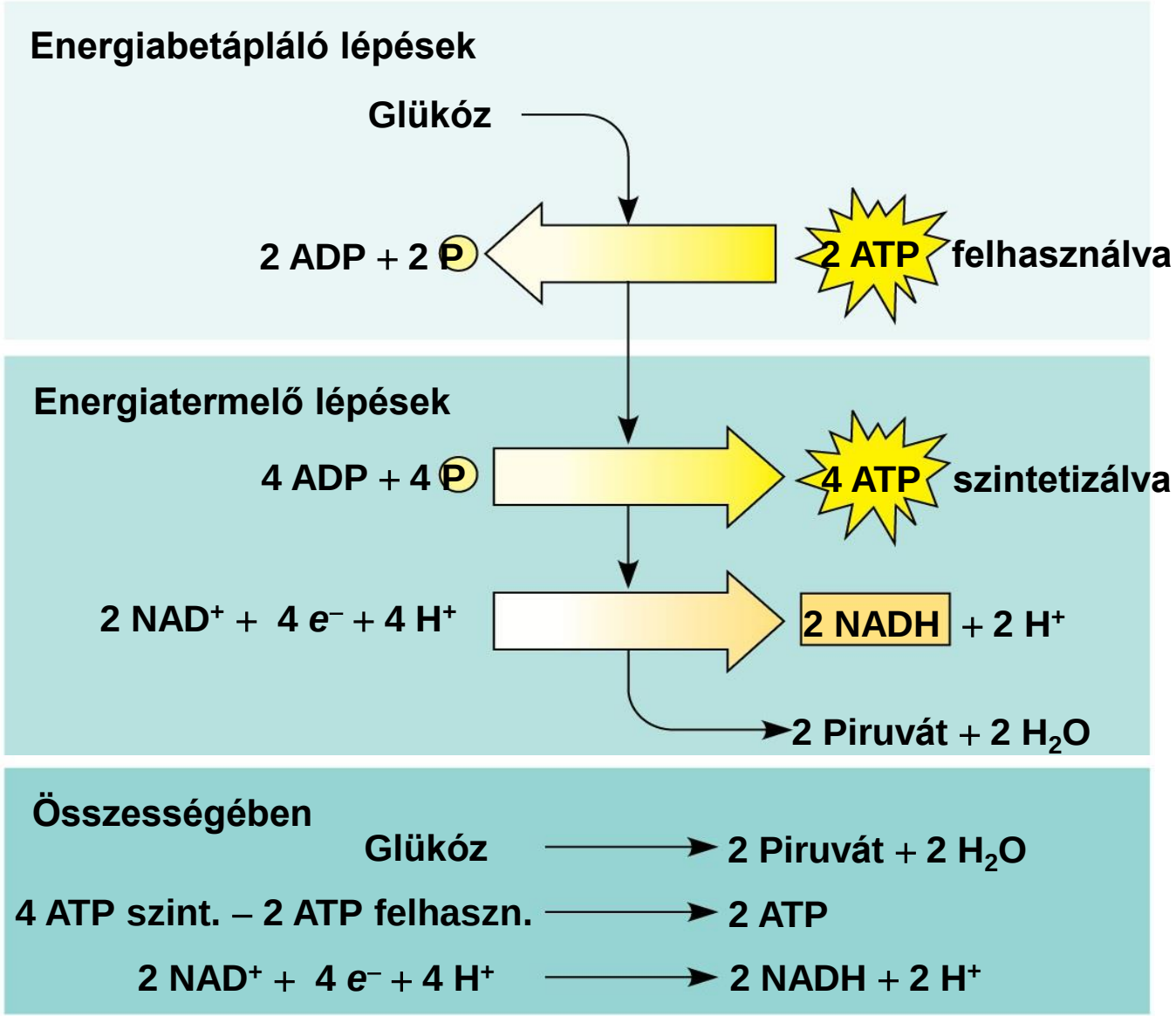
A folyamat három alapvető célt szolgál:

1. Makroerg molekulák (**ATP, NADH**) termelése

2. **Piroszőlősav** termelése a citromsavciklus számára

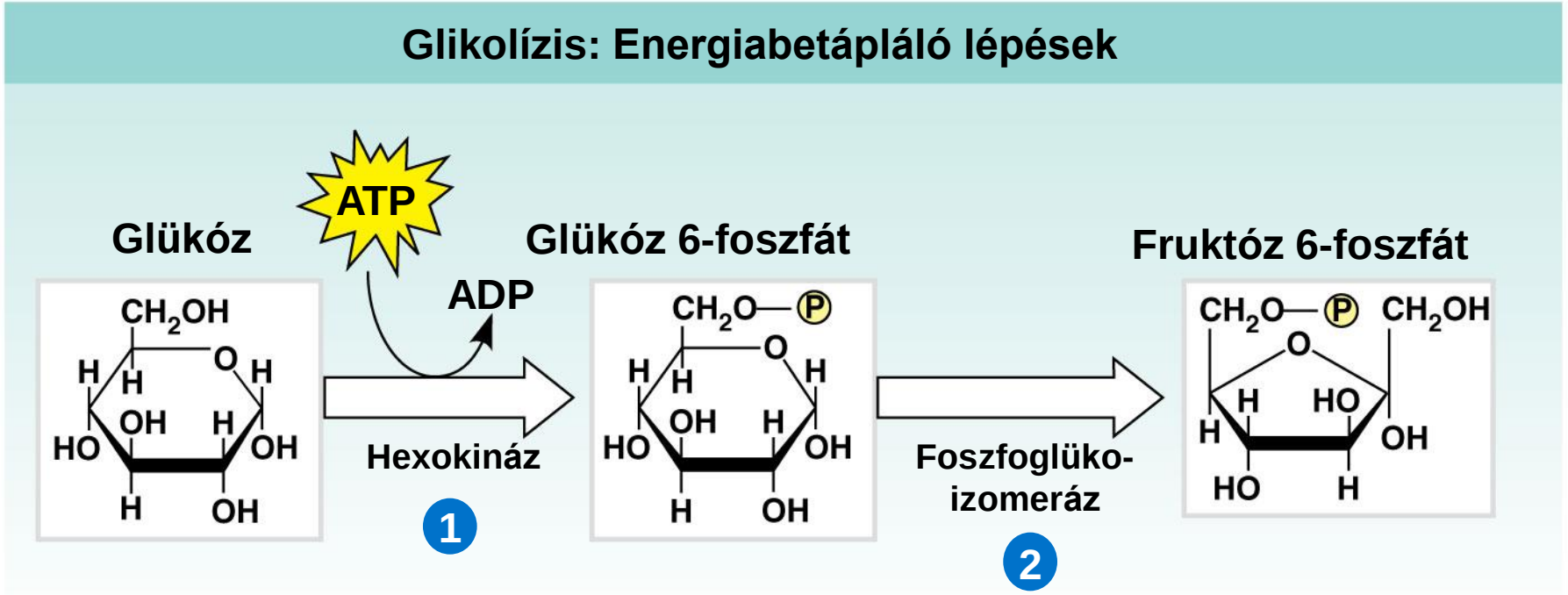
3. Hat- és háromszénatomos **köztitermékek** termelése más anyagcsere-folyamatok (pl. aminosavszintézis) céljaira.

A glikolízis áttekintése



© 2011 Pearson Education, Inc.

A glikolízis lépései 1.

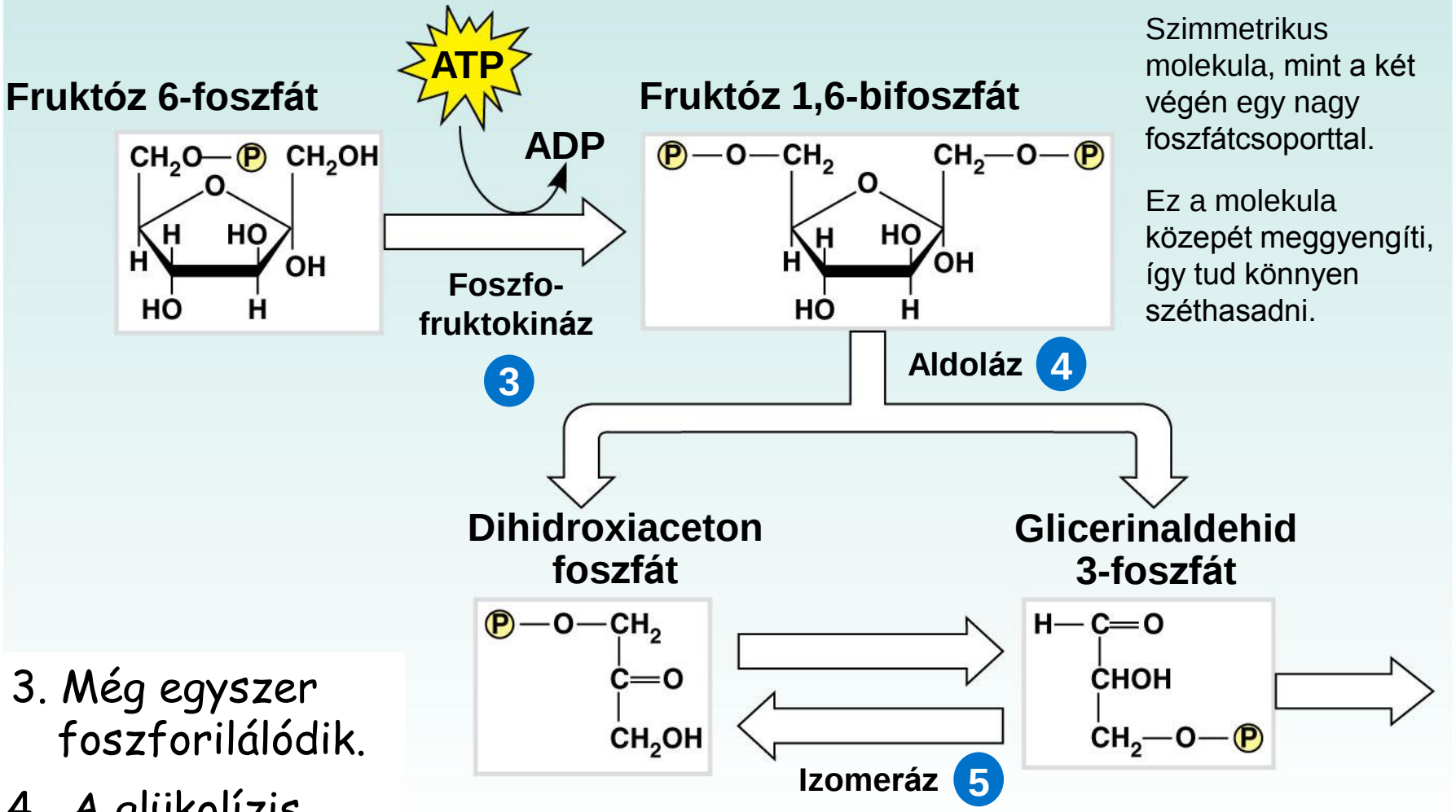


1. ATP-vel foszforilálódik.

2. Izomerilálódik, fruktóz-P-tá alakul át.

A glikolízis lépései 2.

Glikolízis: Energiabetápláló lépések

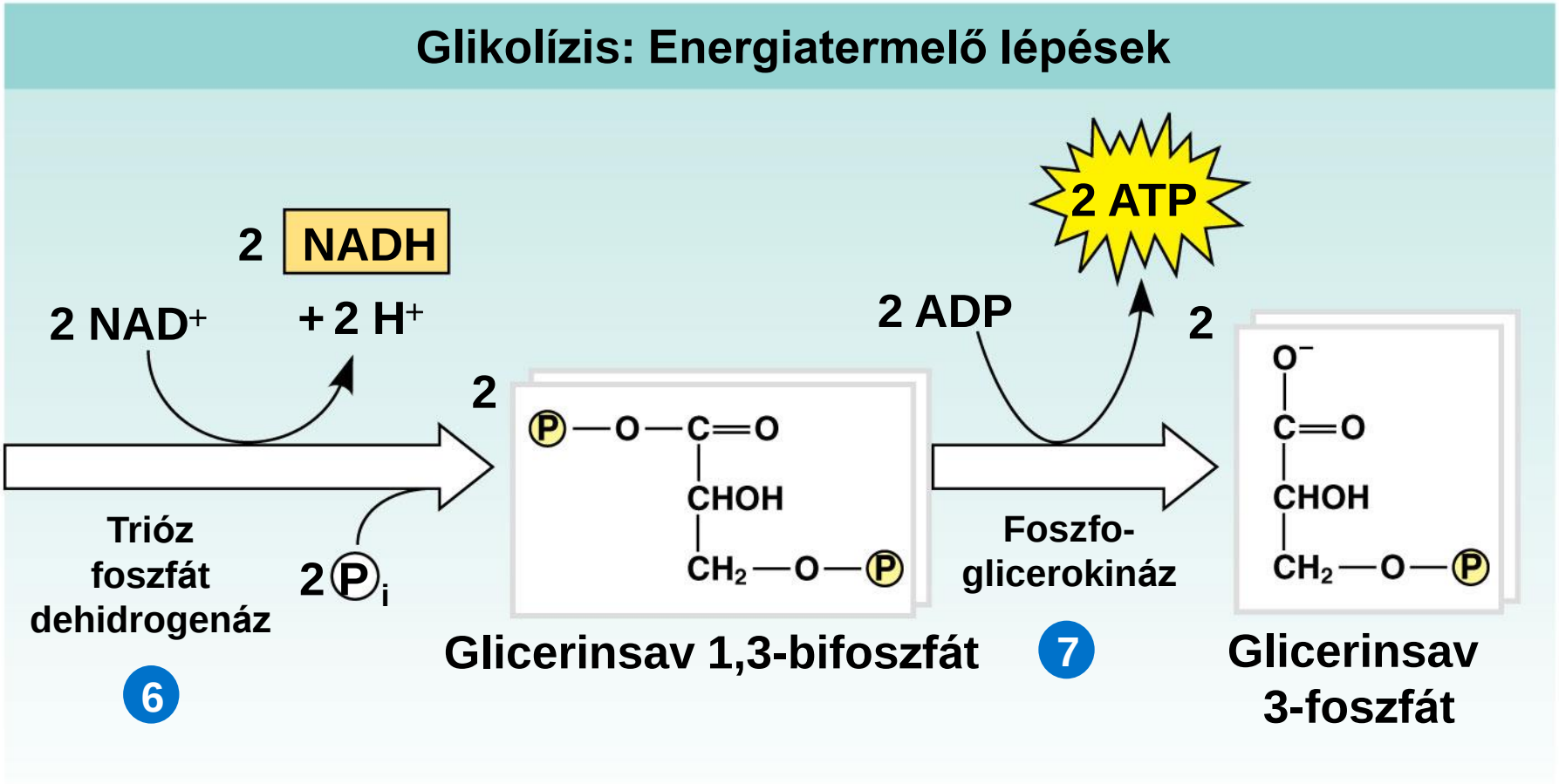


Szimmetrikus molekula, mint a két végén egy nagy foszfátcsoporttal.

Ez a molekula közepét meggyengíti, így tud könnyen széthasadni.

3. Még egyszer foszforilálódik.
4. A glükolízis.

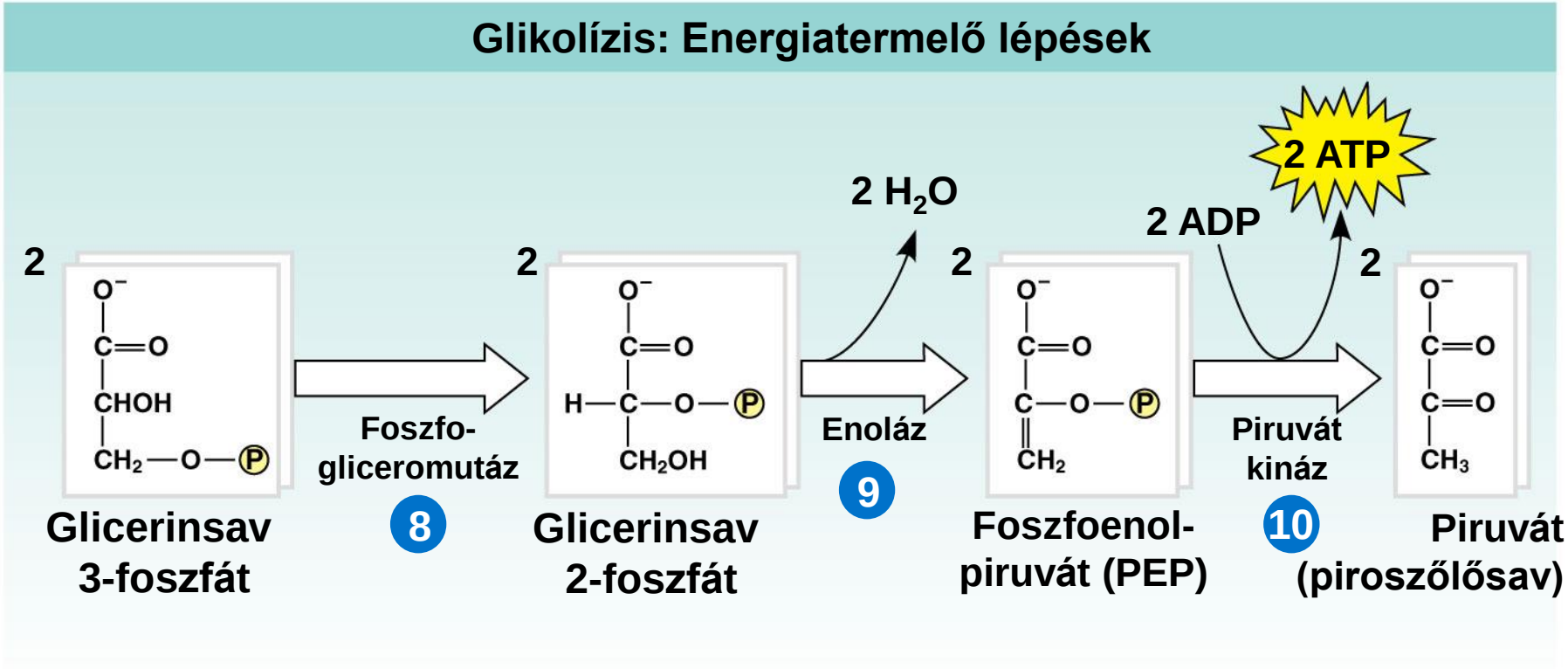
A glikolízis lépései 3.



6. Oxidáció. Két NADH képződik. Egy szervetlen foszfát beépül.

7. A befektetett energia visszanyerése: Első ATP szintézis. A korábban elhasznált 2 ATP-t visszanyertük.

A glikolízis lépései 4.



8. Izomerizáció (A foszfátcsoport középre kerül. Így a követező lépés könnyebben megy.)
9. Vízelvonás.
10. Energianyerés. Második ATP szintézis.

Az erjedés

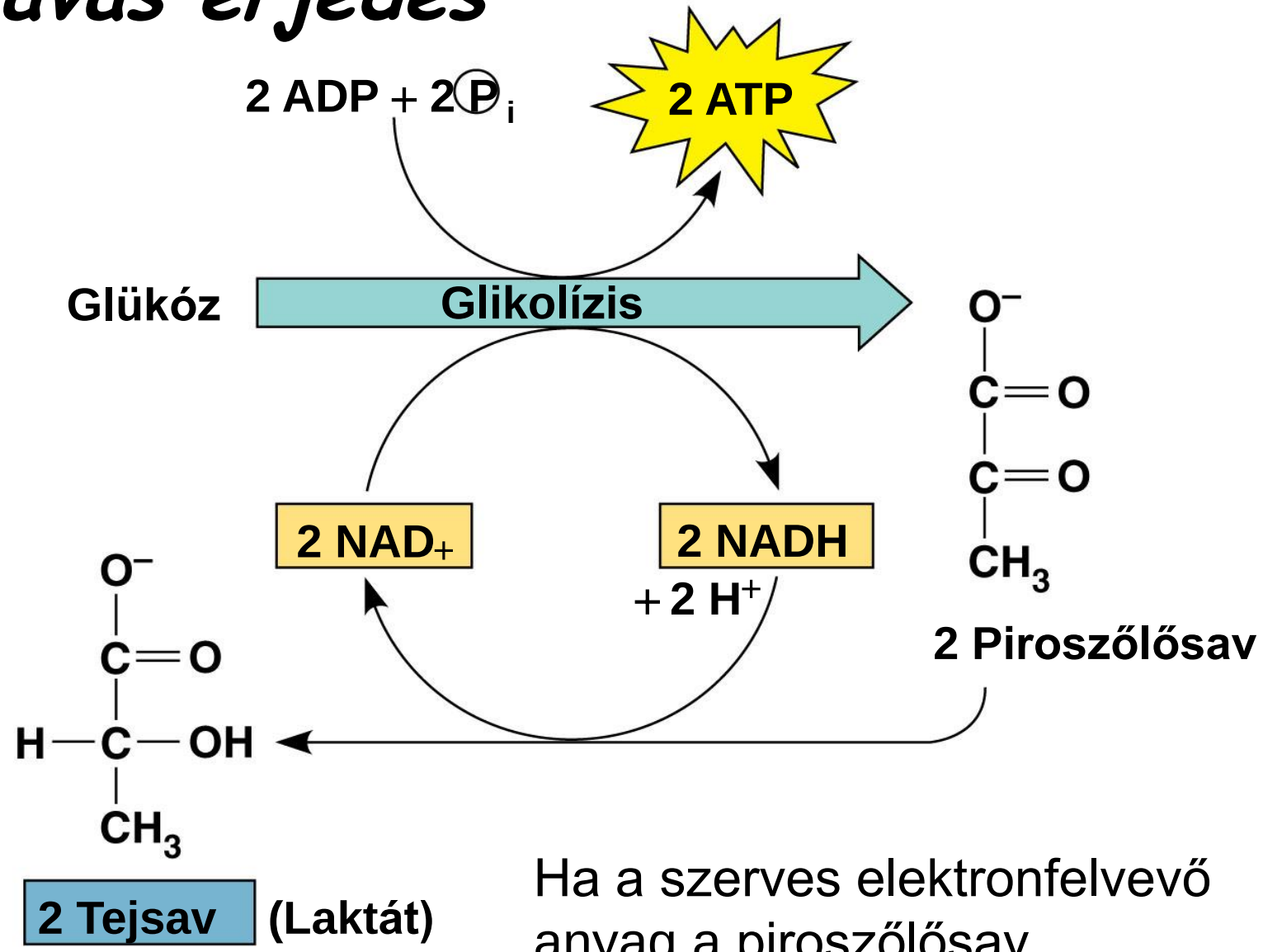
Mi legyen a NADH-val? Ha az összes NAD^+-ot elhasználjuk a folyamat leáll. Az élő szervezetek többféle módon oldják meg.

Egyik mód az erjedés.

- tejsavas erjedés
- alkoholos erjedés
- vajsavas erjedés
- metanogén erjedés

Mindig a végtermék alapján nevezzük el.

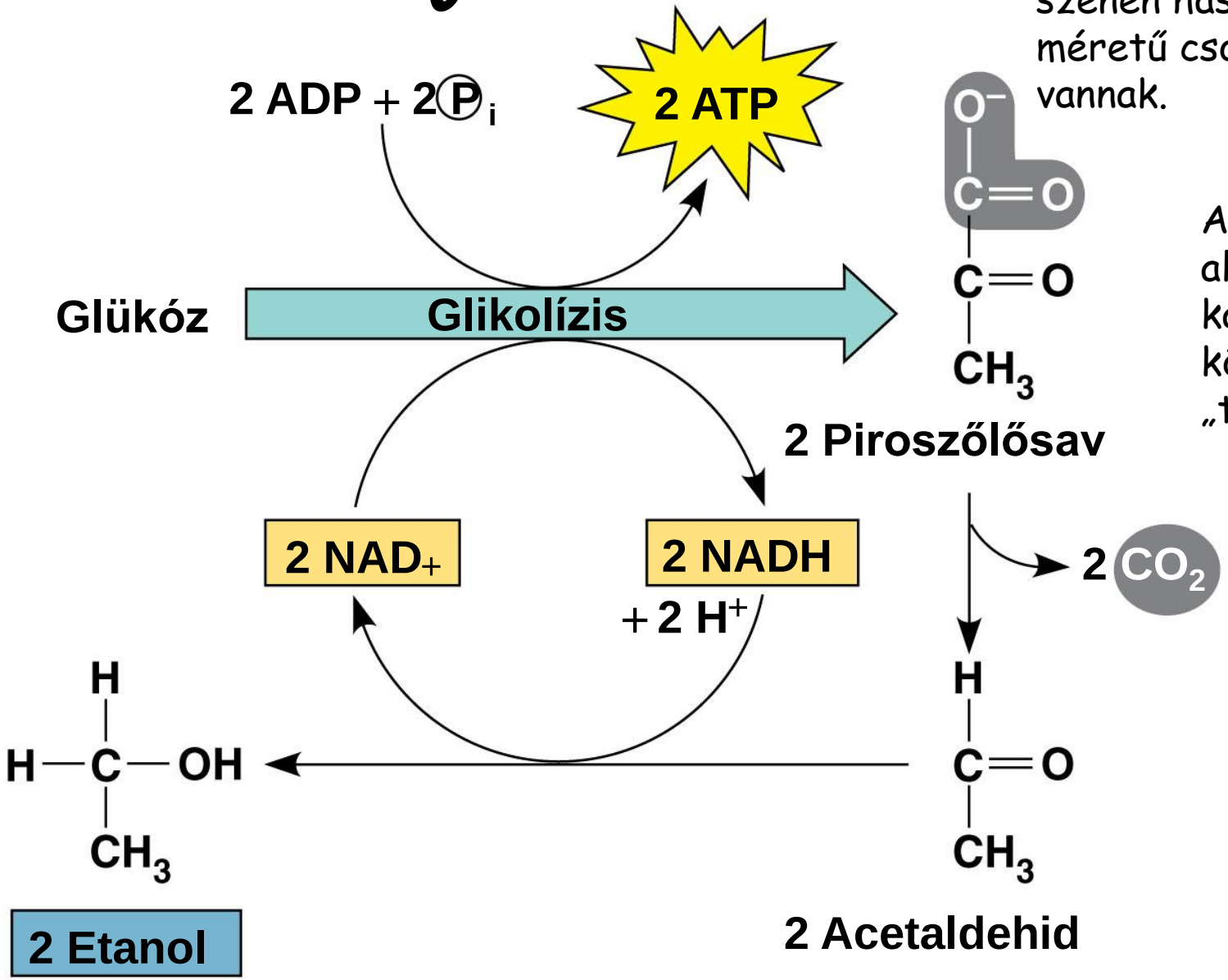
Tejsavas erjedés



Ha a szerves elektronfelvevő anyag a piroszőlősav.

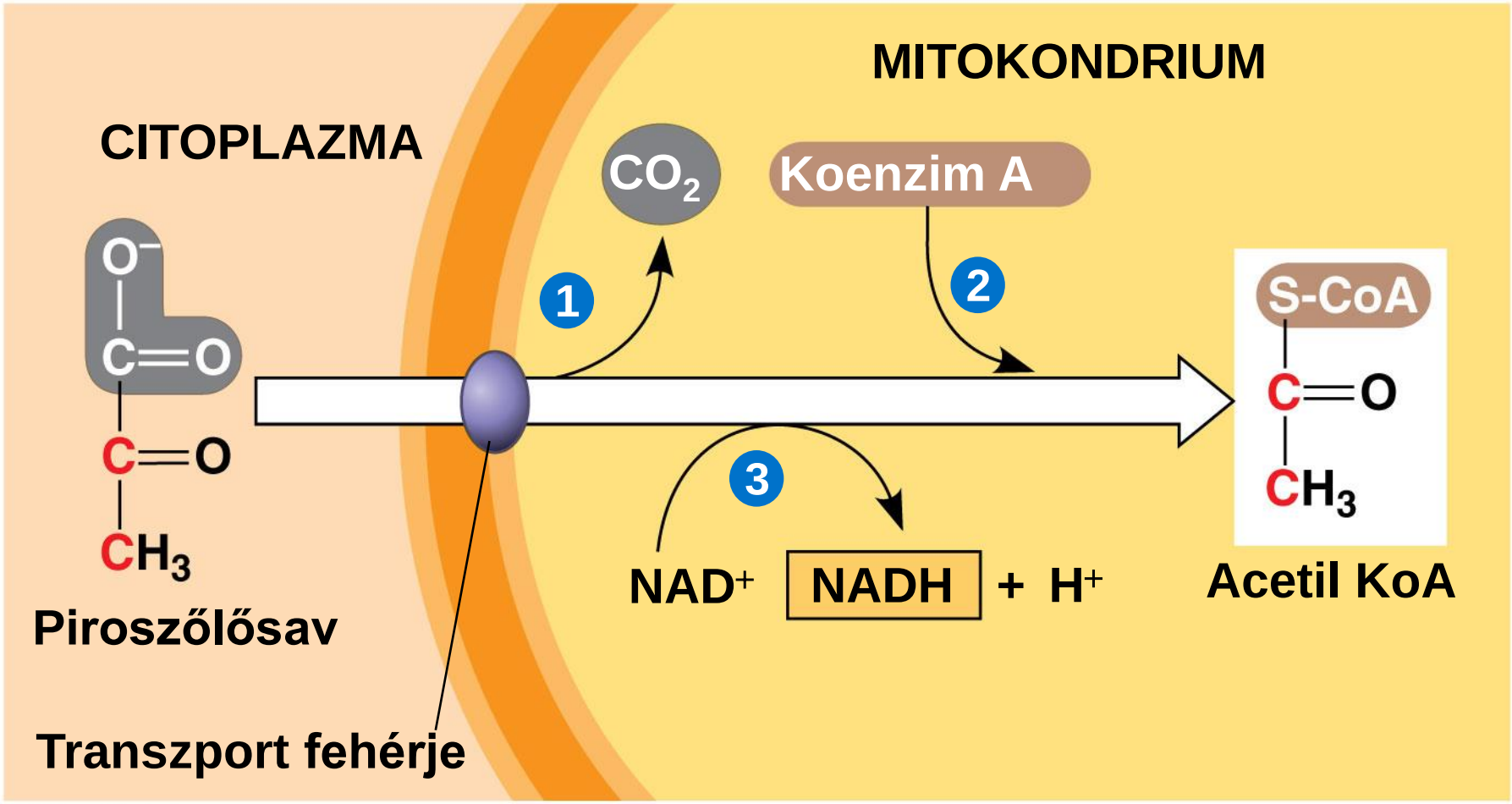
Alkoholos erjedés

Egymás melletti két szénen hasonló nagy méretű csoportok vannak.



Az ilyen alfa-keto-karbonsavak könnyen „törnek”.

A piroszőlősav oxidációja

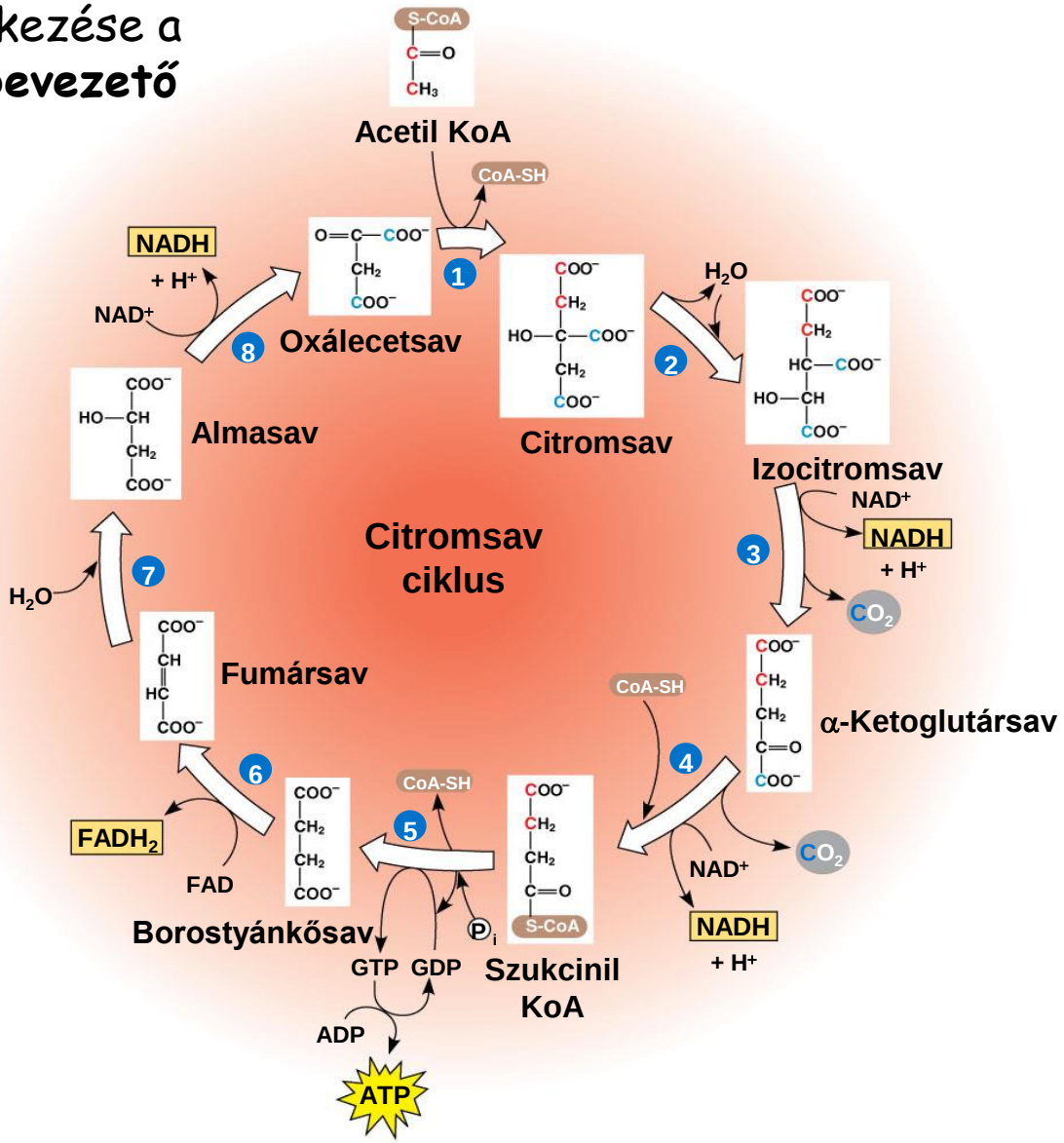


© 2011 Pearson Education, Inc.

A folyamatot a **piruvát dehidrogenáz** enzim komplex végzi. A komplex három enzimből áll, ezek prosztetikus csoportjai ismert vitaminok. **(tiamin, riboflavin)**

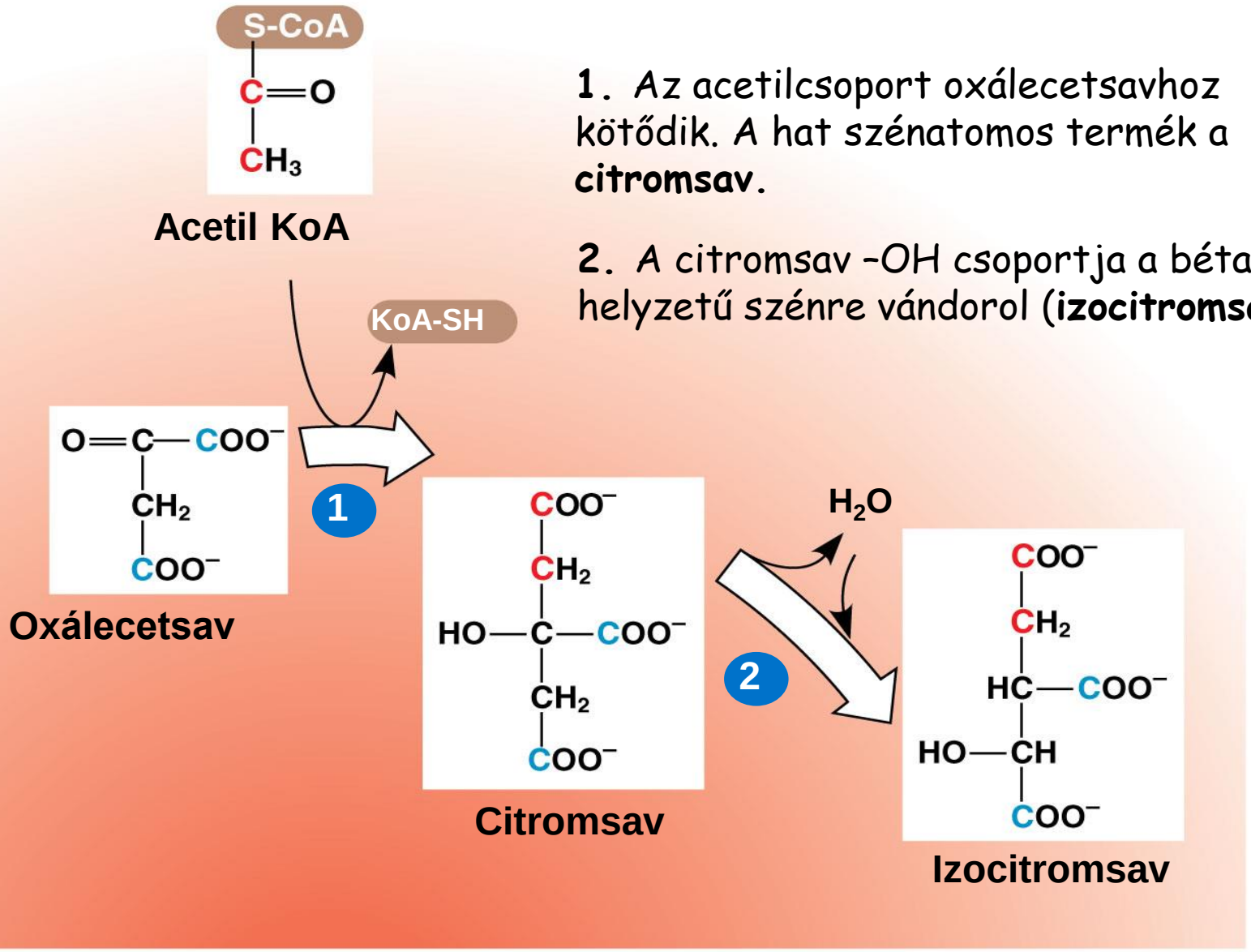
A citromsav ciklus áttekintése

Acetil-KoA keletkezése a **citromsavciklus bevezető lépése.**



© 2011 Pearson Education, Inc.

Citromsav ciklus 1.



1. Az acetilcsoport oxálecetsavhoz kötődik. A hat szénatomos termék a **citromsav**.

2. A citromsav –OH csoportja a béta helyzetű szénre vándorol (**izocitromsav**).

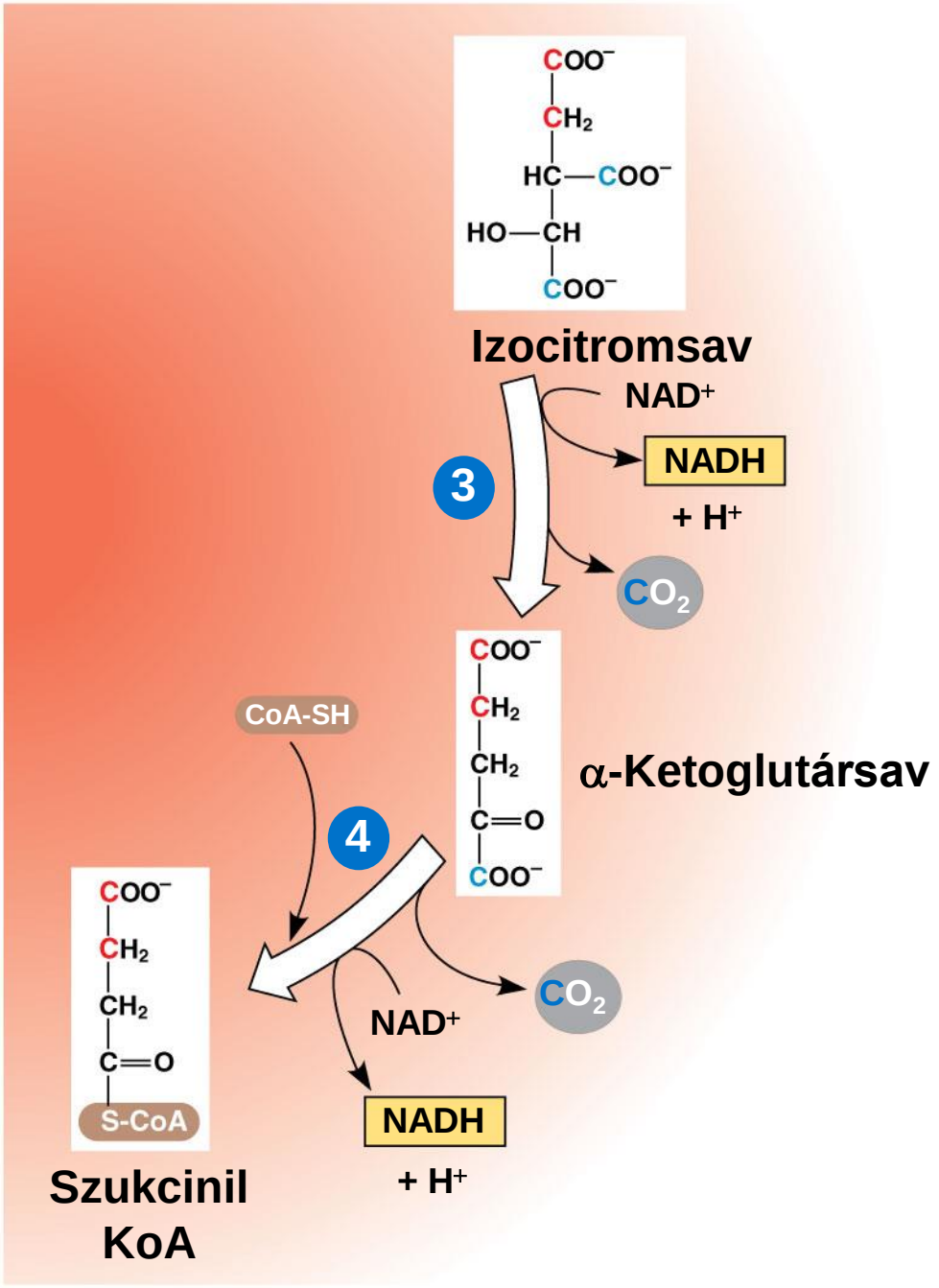
© 2011 Pearson Education, Inc.

Citromsav ciklus 2.

3. Az -OH csoport =O csoporttá **oxidálódik** (NADH képződik megint!). Oxálborotyánkősav keletkezik, amiről azonnal leszakad a CO_2. A végtermék **alfa-ketoglutársav**.

(A piroszőlősavhoz hasonló szerkezet és reakció).

4. Dekarboxiláció és oxidáció (Újabb NADH képződik!) Az oxidáció során felszabaduló energia CoA-kötésben konzerválódik.

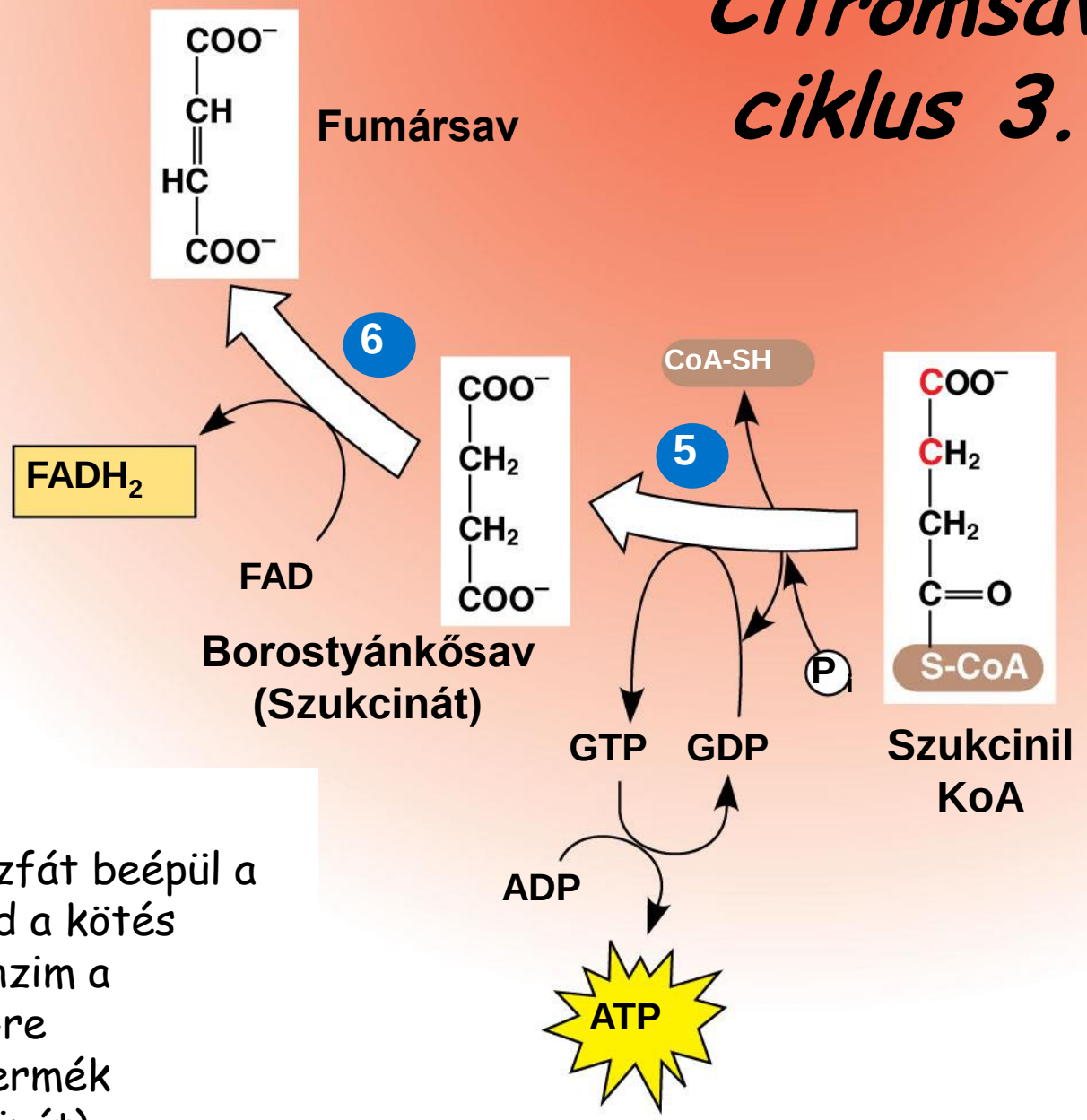


© 2011 Pearson Education, Inc.

Citromsav ciklus 3.

6. A borotyánkősav **fumársavvá** oxidálódik, $FADH_2$ képződik.

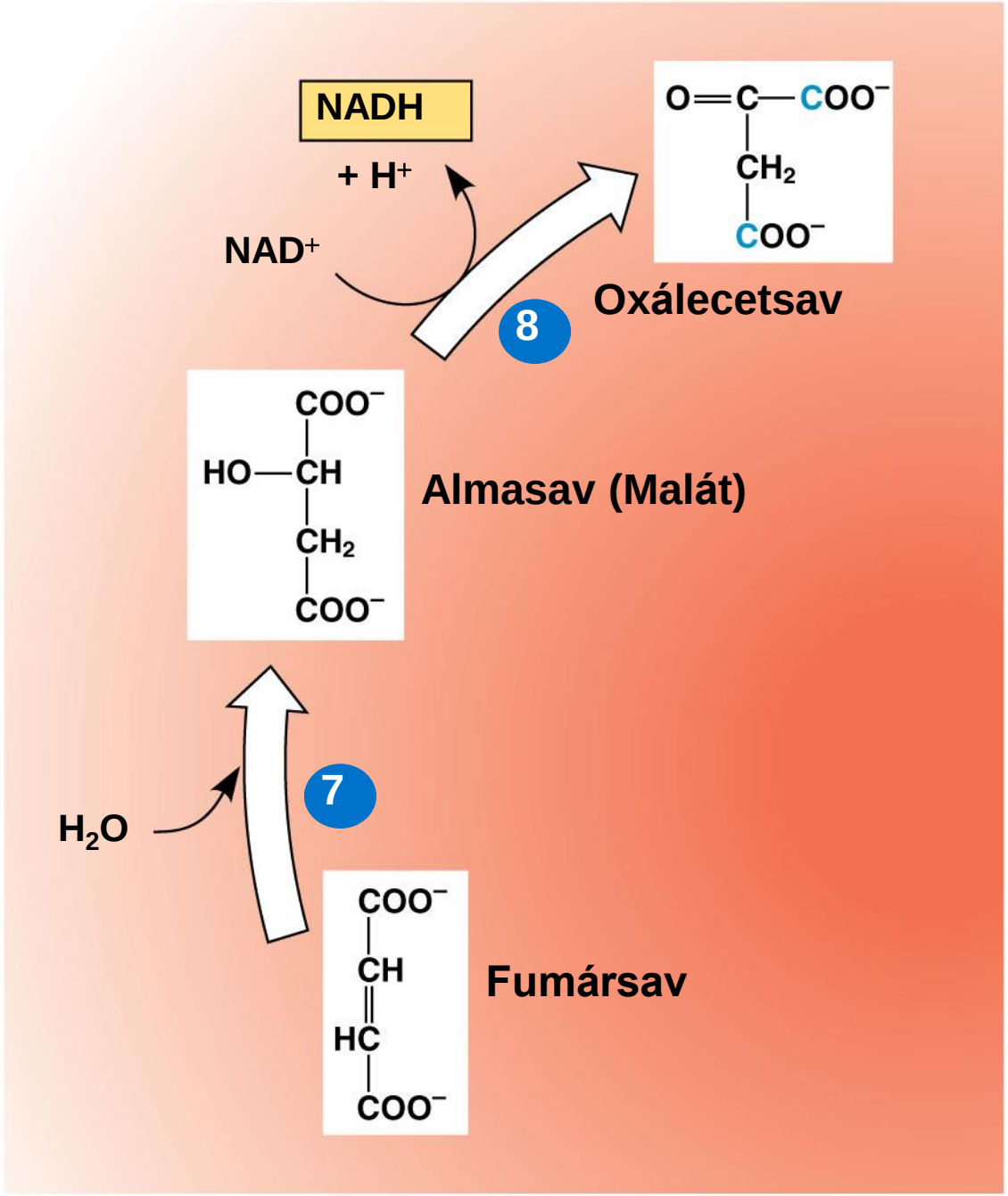
Az enzim membránkötött (szokatlan módon), tulajdonképpen az elektrontranszport-lánc része is egyben.



5. ***GTP*** szintézis.

Először szervetlen foszfát beépül a KoA helyére (megmarad a kötés energiája), majd egy enzim a foszfátcsoportot GDP-re transzportálja. A végtermék **borostyánkősav** (szukcinát).

Citromsav ciklus 4.



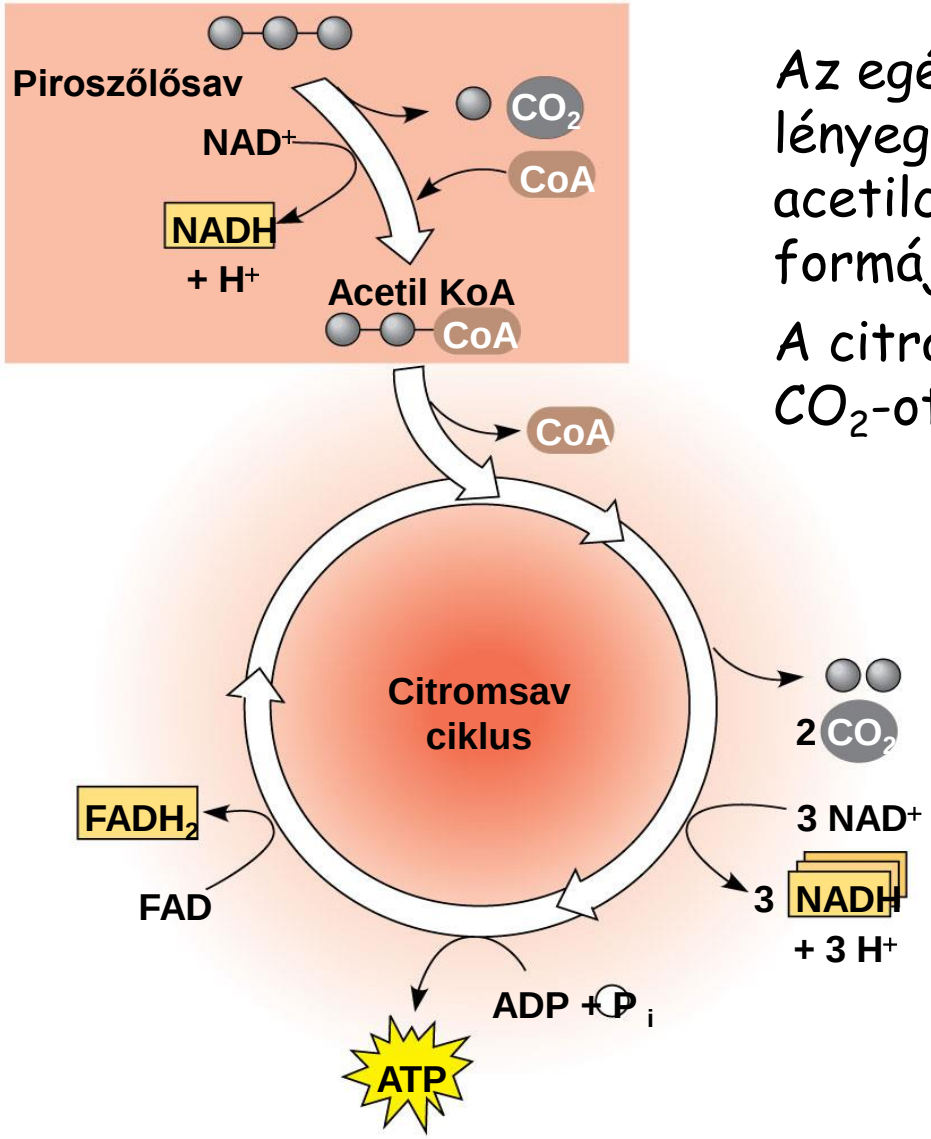
© 2011 Pearson Education, Inc.

7. A fumársav **almasav**vá hidratálódik.

8. Az almasav oxidációjával visszakapjuk az **oxálecetsav**at.

(Megint egy NADH!)

A citromsav ciklusból kilépő molekulák



© 2011 Pearson Education, Inc.

Az egész citrát ciklusnak az a lényege, hogy a belépő acetilcsoport két szene CO_2 formájában távozni fog.

A citrát ciklus hozza létre azt a CO_2-ot, amit ki fogunk lélegezni.

Szentgyörgyi Albert
Nobel díj 1937

Légzés

A glukóz szenét immár maximális fokig eloxidáltuk. Viszont ezáltal még több H halmozódott fel NADH ($FADH_2$) formájában.

Mi legyen vele?

Reagáltassuk szervetlen redukálószerrel!

= LÉGZÉS

- Az eukariótákra aerob légzés jellemző.
- Egyes baktériumok képesek anaerob légzésre.

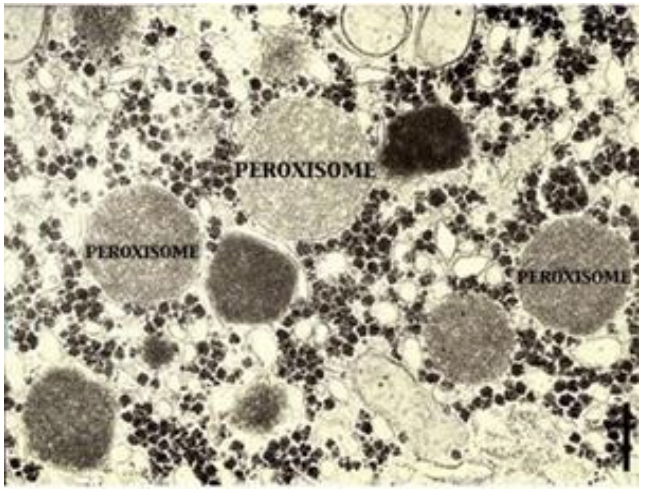
Egyes baktériumok képesek aerob és anaerob légzésre is. És vannak obligát anaerobok (aerob közegben elpusztulnak) is.

Denitrifikáció: $NO^{3-} \rightarrow N_2$

metanogén ősbaktériumok: $CO_2 \rightarrow CH_4$

Peroxiszómák

Legegyszerűbb, a H-t közvetlenül reagáltatjuk az oxigénnel.
A folyamat a **peroxiszómá**ban folyik.



Peroxiszómák főleg a **májban**.
Kb. 1000 db peroxiszóma /májsejt

Két, csak rá jellemző enzim az

oxidáz $\mathrm{RH_2 + O_2 \rightarrow R + H_2O_2}$

és a

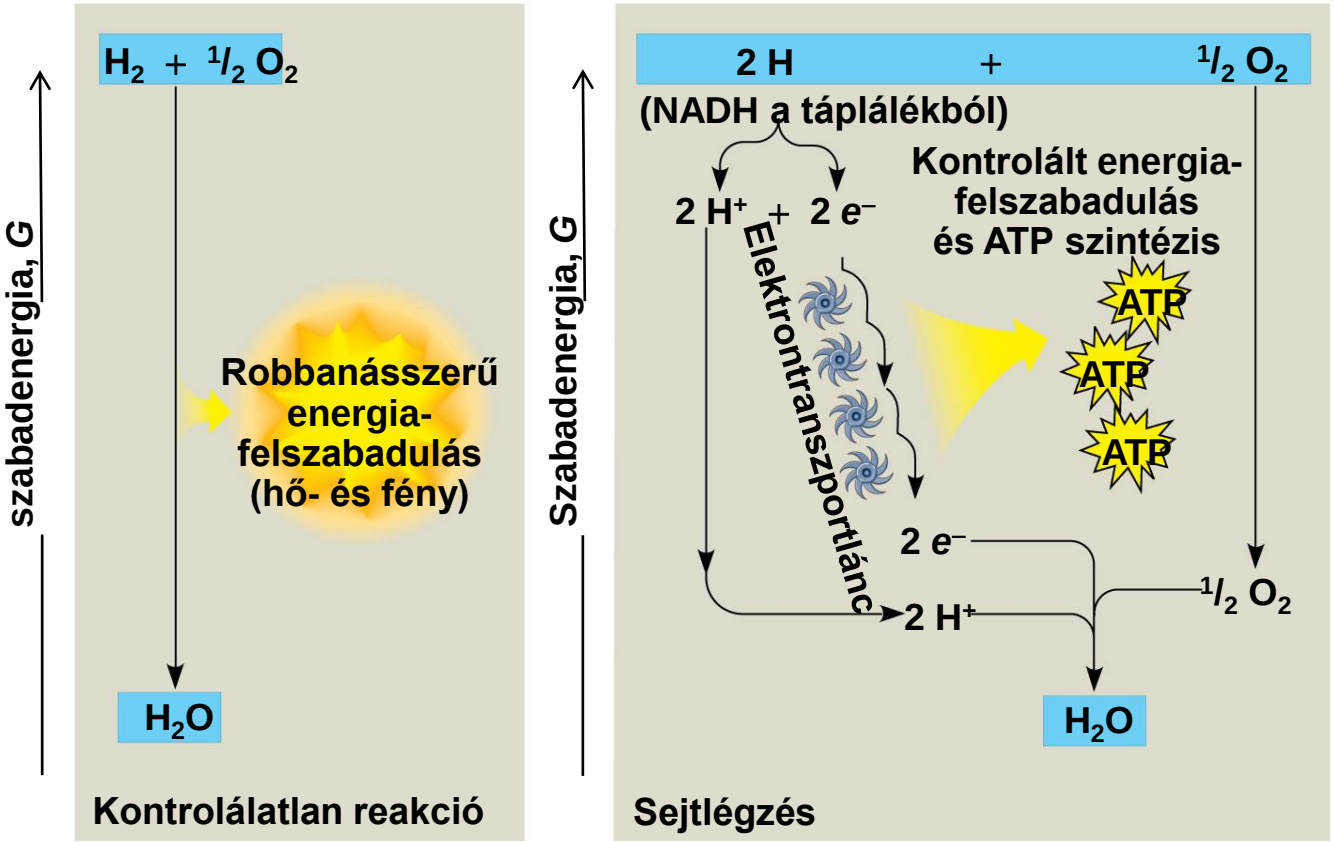
kataláz $\mathrm{2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2}$

A **hidrogén-peroxid** rendkívül reaktív, mérgező vegyület, gyorsan el kell bontani.

ATP nem keletkezik, a felszabaduló nagy mennyiségű energia **hő formájában elvész**.

Terminális oxidáció 1.

- Az evolúció során egy más megoldás jött létre a **mitokondrium**ban.
- A NADH és az oxigén nem közvetlenül reagál egymással, hanem egy elektronszállító rendszer (légzési lánc) tagjain keresztül.



- Ezáltal energia részletekben „szabadul fel".
- Ez nagy mennyiségű ATP szintézisét teszi lehetővé.

$2\ NADH + 2\ H^+ + O_2 = 2\ NAD^+ + 2\ H_2O$

Az oxidatív foszforiláció

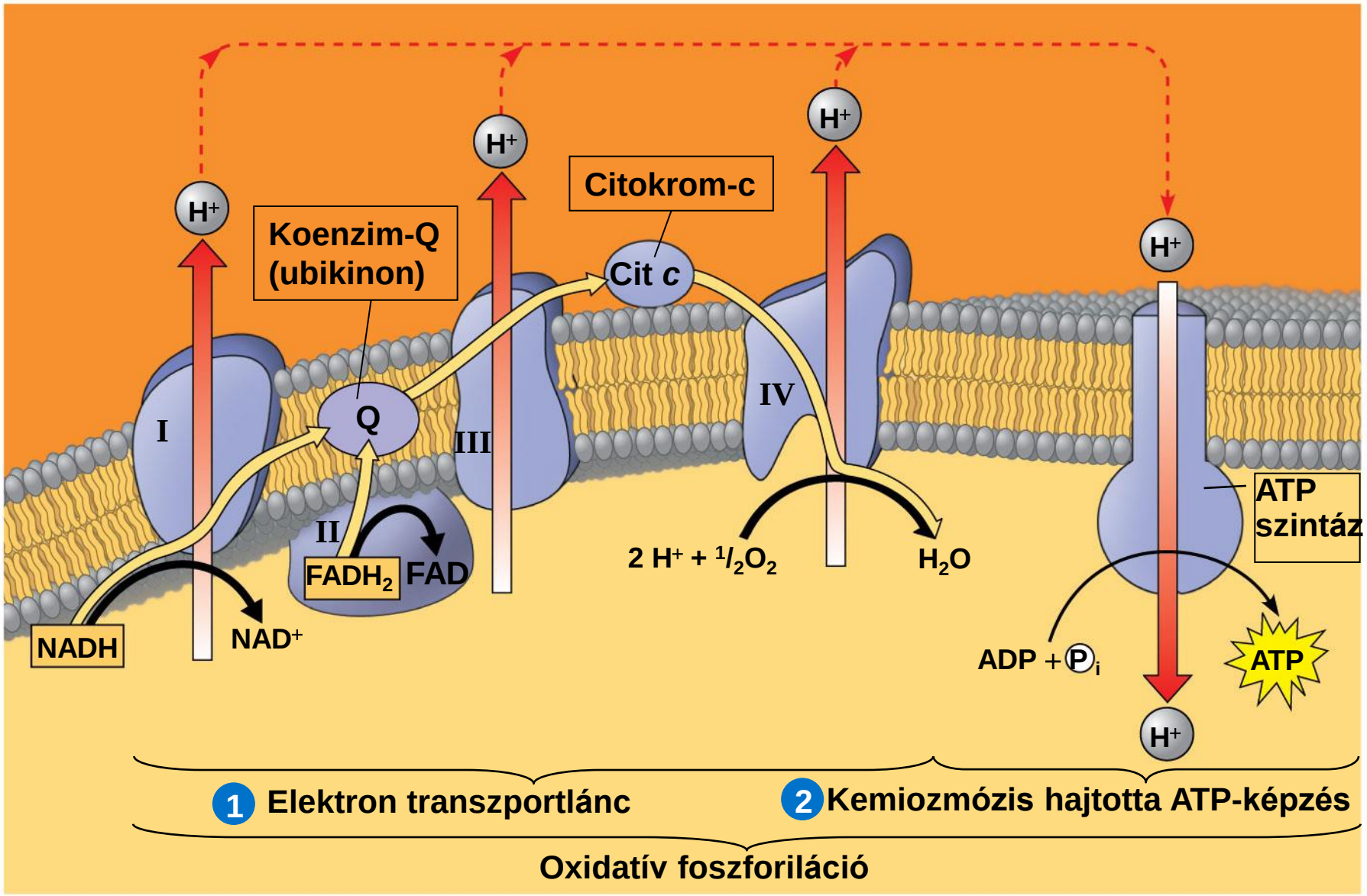
Az elektronszállító rendszer úgy működik, hogy **redukciós/oxidációs reakcióikkal csatoltan H^+-k pumpálódnak** a mátrix felől a mitokondrium külső és belső membránja közé.

Egy **pH- és feszültség-gradiens** alakul ki a belső membrán két oldala között.

Az ATP akkor képződik, amikor a H^+ ionok az **ATP-szintetáz enzimen keresztül visszaáramlana**k a mátrixba.

A **légzési lánc** által létrehozott elektrokémiai potenciál hajtja az enzimet. Az energia **elektrokémiai potenciál** formájában „raktározódik"

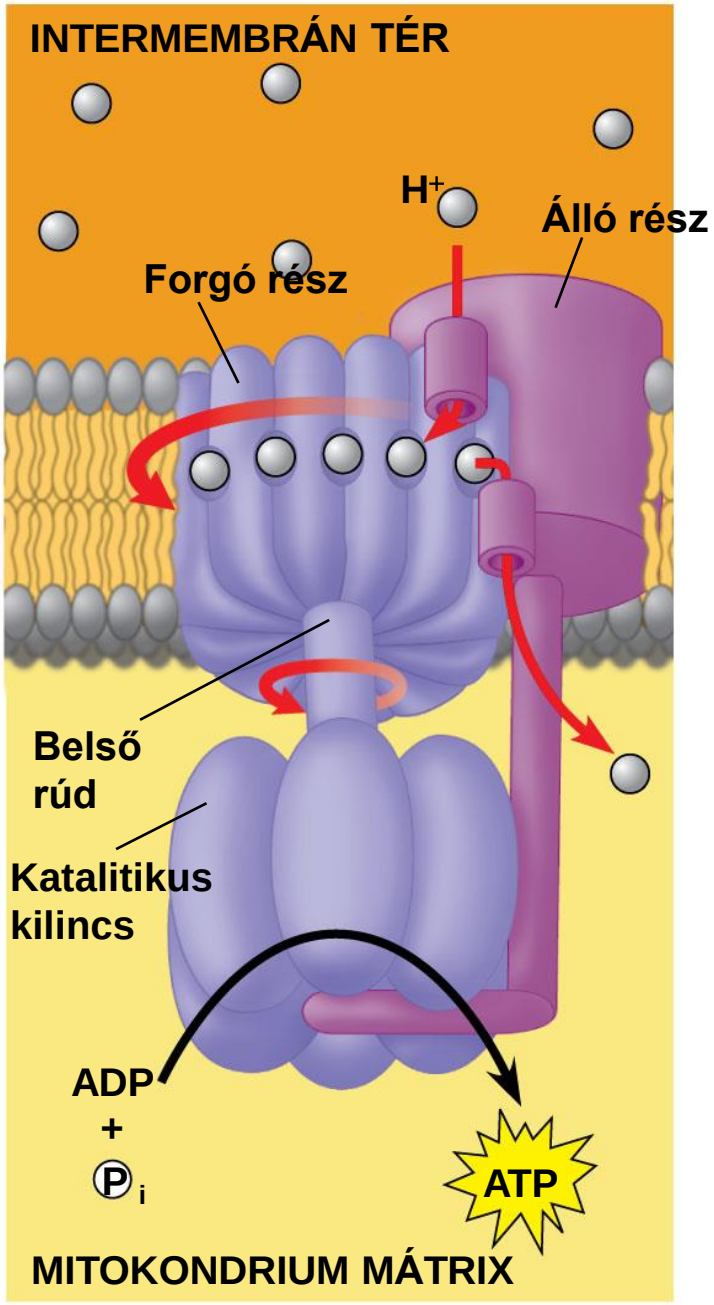
Oxidatív foszforiláció



Elektrontranszportlánc = légzési lánc

ATP szintáz

Amikor a protonok visszaáramlanak a mátrixba, energia szabadul fel.
Ez az energia ATP szintézisére hasznosul.



© 2011 Pearson Education, Inc.

Peter Mitchell

Nobel díj, 1978

A glükóz bontásának energiamérlege

Bemenet | **Kimenet**

Glükóz → **Glycolysis** → **2 Piroszőlősav + 2 ATP + 2 NADH**

© 2011 Pearson Education, Inc.

Bemenet | **Kimenet**

2 Piroszőlősav → 2 Acetil KoA

2 Oxálacetát

Citromsav ciklus

2 ATP, **8 NADH**, **6 CO_2**, **2 $FADH_2$**

© 2011 Pearson Education, Inc.

$4ATP + 10NADH + 2FADH_2$ = **38ATP**

(1NADH=3ATP, 1$FADH_2$=2ATP)

A terminális oxidáció energiamérlege

$NADH + H^+ + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow NAD^+ + H_2O$ $\Delta G^0 = -220$ kJ

$ADP + P_i \rightarrow ATP$ $\Delta G^0 = +30{,}8$ kJ

Az oxidatív foszforilációban 3 ATP keletkezik:

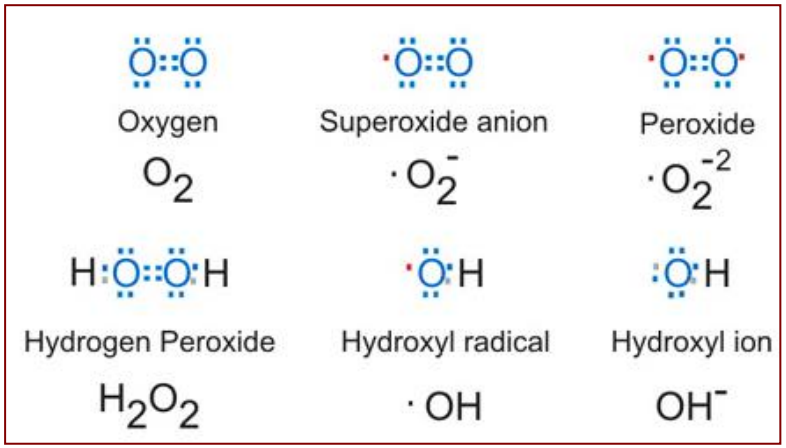
+ 92,4 kJ

Az energia 41%-a konzerválódik ATP-be, a többi hővé alakul.

A mitokondrium sokkal ügyesebben használja fel a hidrogént, kevesebb hő képződik.

Reaktív oxigéngyökök

Előfordul, hogy az oxigén nem 4 db elektront vesz fel, hanem kevesebbet.



Ezek a reaktív oxigéngyökök rendkívül veszélyesek

(pl. tönkreteszik a mitokondriális DNS-t)

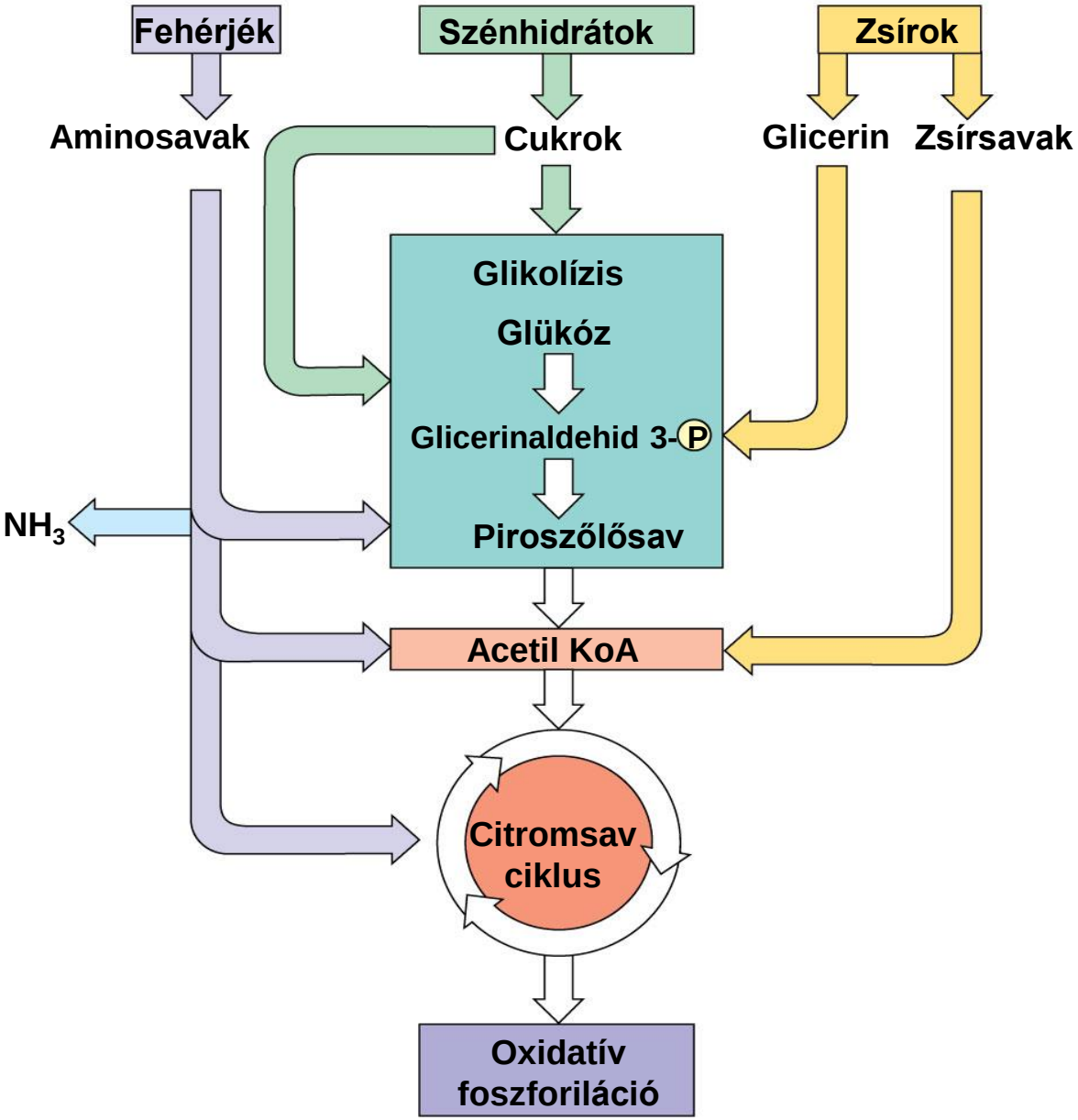
A reaktív oxigéngyökök elleni védekezés:

Szuperoxid-diszmutáz (SOD) a mitokondriumokban.

Gyökfogó vegyületek – **antioxidánsok**.

A biológiai oxidáció tehát nagy mennyiségű ATP-vel lát el minket, de „megfizetjük az árát”.

A tápanyagok katabolizmusa



© 2011 Pearson Education, Inc.

A zsírok bontása - lipázok

A trigliceridek nem **jutnak át a sejtmembránon**, túl nagyok, ezért az észterkötéseket fel kell bontani - **hidrolízis**.

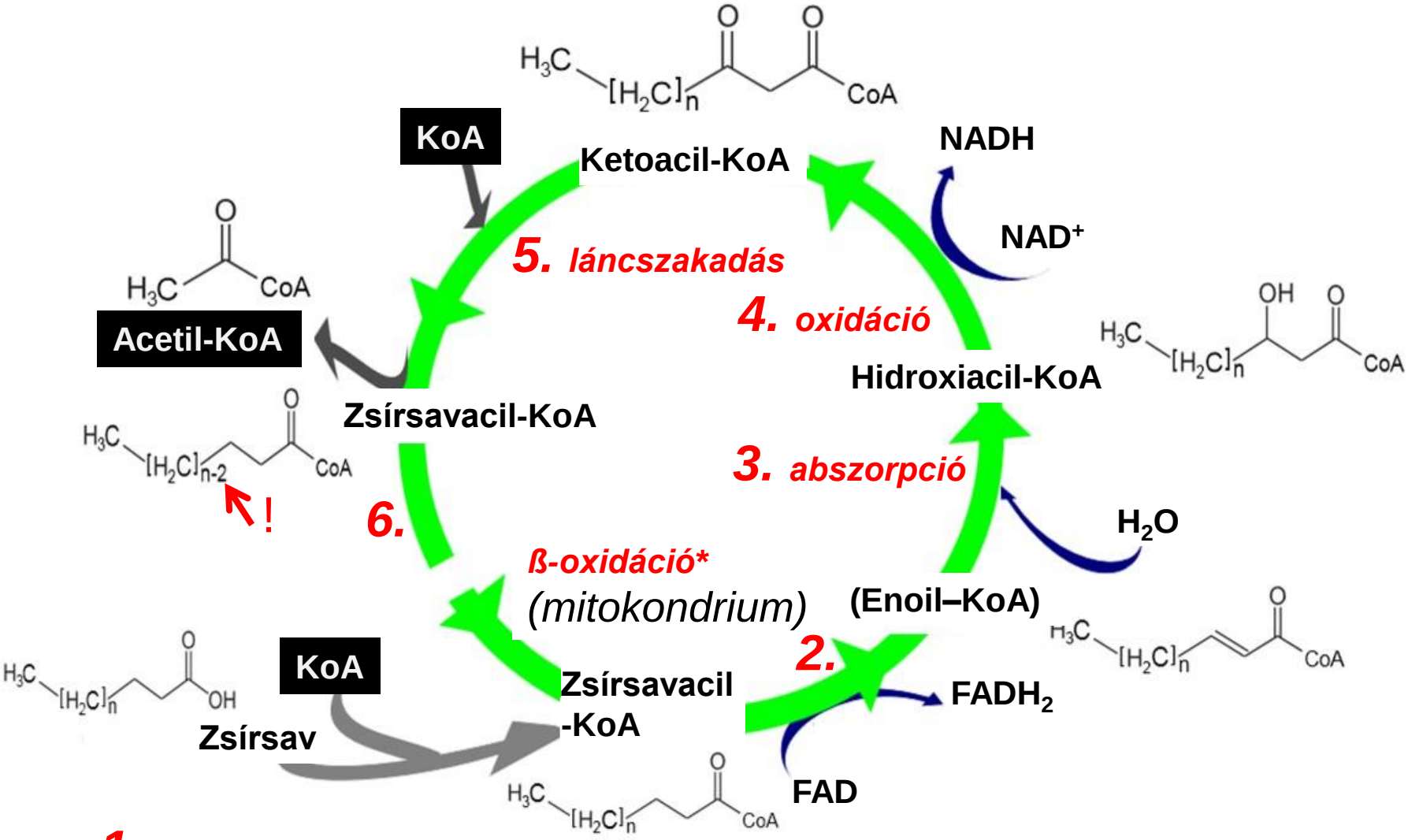
Lipázok.

- Pankreász lipáz: az emésztés és felszívás során.
- Lipoprotein lipázok: a vérből a zsírokat felhasználni képes szövetekbe (zsírszövet, szív- és vázizom) való bejutás során
- Hormon-szenzitív lipáz: a zsírszövetben raktározott zsírok mobilizálásakor.

A keletkező **glicerin** glicerin-3 foszfáttá alakul, ami a glikolízis köztes terméke…

És a zsírsavlánc?

A zsírok bontása - ß-oxidáció



1. *Aktiváció* ATP igényes!
(citoplazma)

* A név onnan ered, hogy a **β** helyzetben levő szénatom oxidálódik.

A zsírsavak bontása - energiamérleg

Miért a mitokondriumban? Mert oxidatív közeg kell.

Mitokondriális transzport karnitin segítségével.

A fogyasztó anyagok is karnitint tartalmaznak, mert elősegíti a zsírok lebontását.

A β-oxidáció során nagy mennyiségű NADH keletkezik. (Az acetil-CoA további bontásával még több NADH és ATP.)

Aktiváció:

Sztearinsav+ATP+CoA=SztearinsavCoA+AMP+PPi ($\Rightarrow$ -2ATP)

B-oxidáció:

1SztearinsavCoA+8CoA+8FAD+8NAD+8H_2O=9AcCoA+8$FADH_2$+8NADH$^+$+8H^+

(Egy AcCoA-ból 12ATP lesz)

Azaz 1 sztearinsavból 9*12+8*2+8*3 - 2=**146ATP**

A zsírok a legfőbb ATP forrás!

Az aminosav-anyagcsere

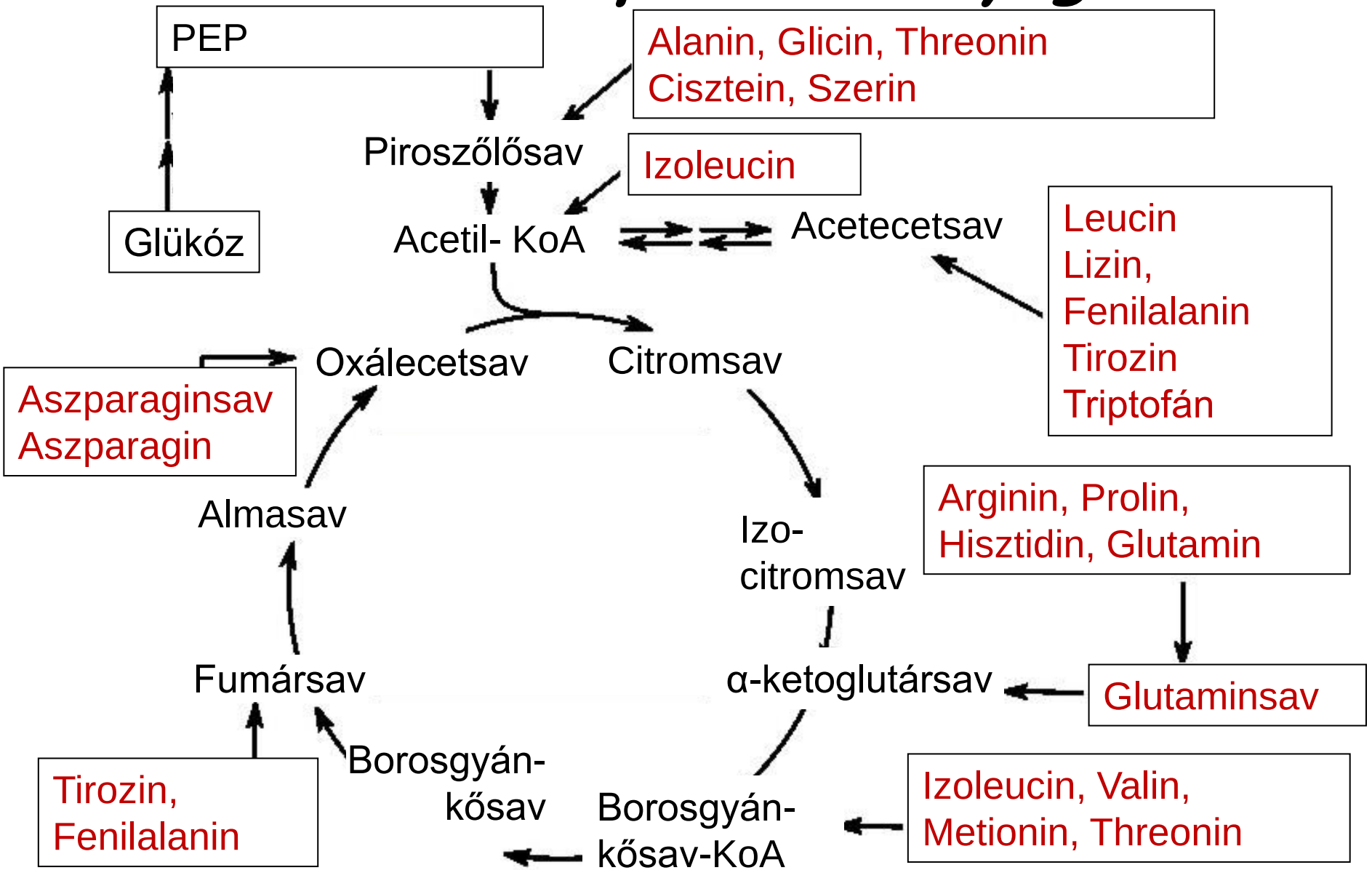
A táplálékkal felvett aminosavak sorsa:

1. **fehérjeszintézis** (alapvetően ez a cél)
2. **lebontás és raktározás cukor és zsír formájában** (pozitív energiamérleg esetén)
3. **lebontás, elégetés, energiatermelés** (csak éhezés esetén)

A lebontás lépései:

1. **Az aminocsoport leválasztása**
   transzaminálás (másik as.-nak átadja)
   A reakcióban szereplő enzim koenzimje a **Piridoxin**=B6 vitamin
   oxidatív dezaminálás (ketonsav képződik)
2. **A szénlánc átalakítása a cukor ill. zsírbontás vmilyen köztes termékévé.**

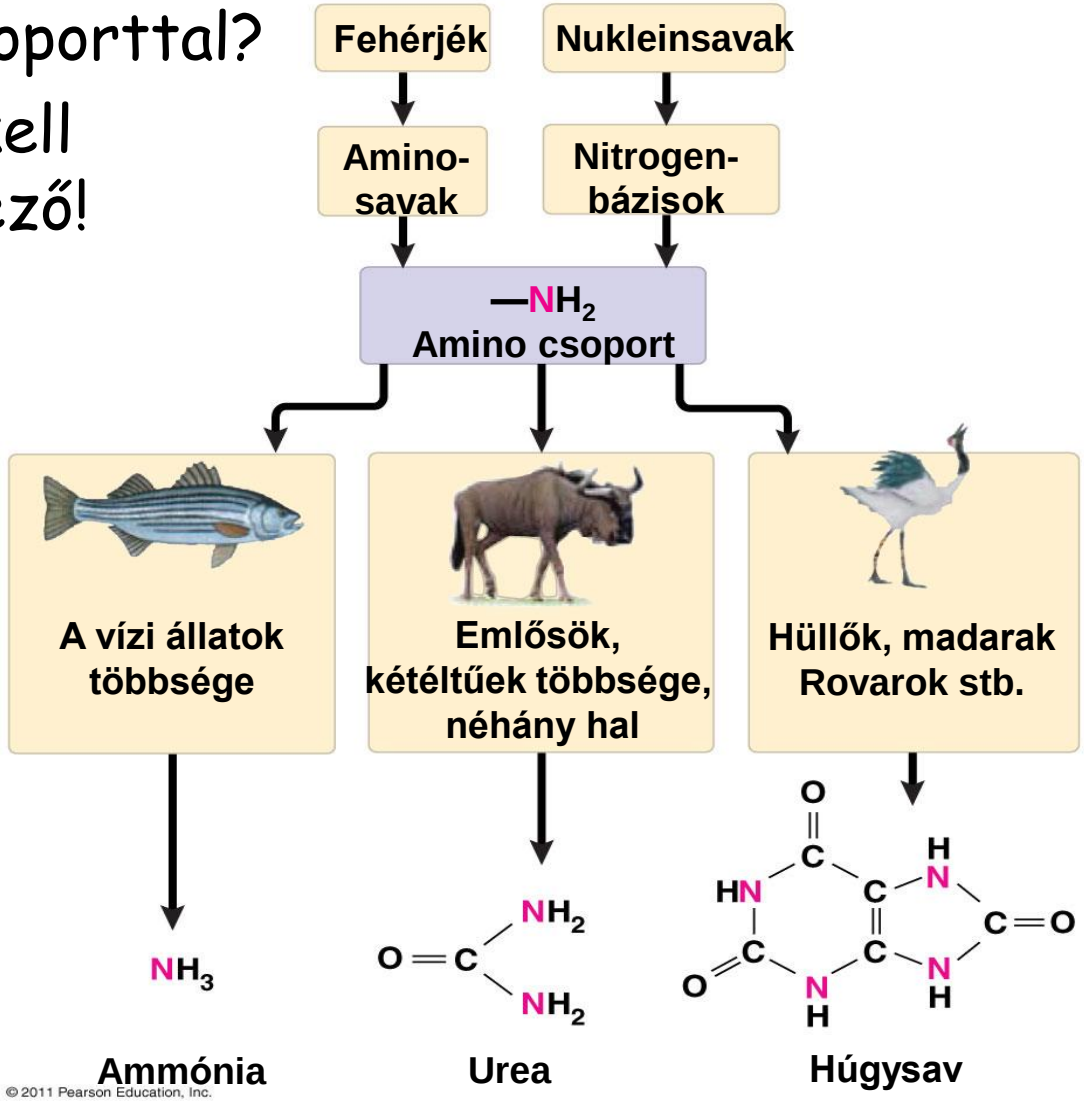
Aminosavak belépése az anyagcserébe



Nitrogén-ürítés

Mi legyen az amino-csoporttal?

Re-szintézis, vagy el kell távolítani, mert mérgező!



© 2011 Pearson Education, Inc.

Karbamid, ammónia, húgysav

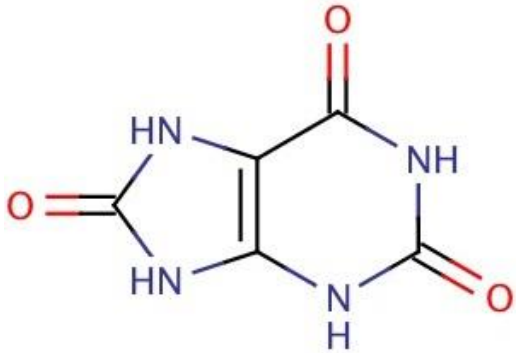
1. Ammónia
   - diffúzióval, így a higításhoz és gradienshez nagy mennyiségű víz kell (halak, vízi gerinctelenek)

2. Karbamid (urea)
   - Kevésbé mérgező, szintéziséhez ATP kell

3. Húgysav
   - Kevesebb víz kell a kiválasztásához. Vízhiányos körülmények mellett (madár guano: húgysav és guanin)

A nukelotidok lebontása

1. A pirimidinbázisok bontása során glükogén és ketogén aminosavak keletkeznek.
2. A purinbázisok bontásának végterméke **húgysav**.



A nukleotidok lebontása alapvetően nem cél…

Ha a purinbázisok lebontása nincs egyensúlyban a kiválasztással/újrahasznosítással), akkor a rosszul oldódó húgysav kikristályosodhat (izületi folyadékban, vesében).

Az ízületi folyadékban kiváló húgysav gyulladást okoz. Ez a **köszvény**.

Bioszintézis

Egyszerűből → bonyolult.

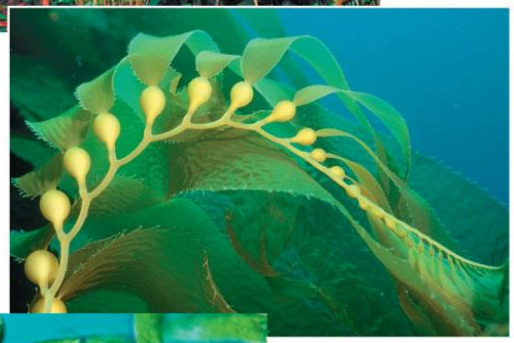
Mi kell hozzá?

1. **Szénforrás**
   - szervetlen vegyületek - autotrófok.
   - szerves vegyületek - heterotrófok
2. **Energia**
   - fényenergia – fototrófok (fotoszintetizálók)
   - kémiai energia – kemotrófok
     - kemolitotróf
     - kemoorganotróf

3. **Redukálószer (elektron és hidrogénforrás)**
   - szerves vegyületek - heterotrófok
   - víz – oxogenikus fotoszintetizálók
   - más – anoxogenikus (foto)szintetizálók

A fotoszintézis evolúciója

(a) Növények



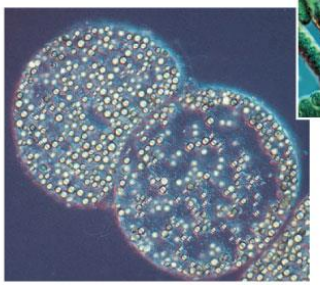
(b)Többsejtű algák

(c) Egyszerű Eukarióták (protiszták)

10 μm

(d) Kékalgák (prokarióták)

40 μm



(e)Bíbor kénbaktériumok

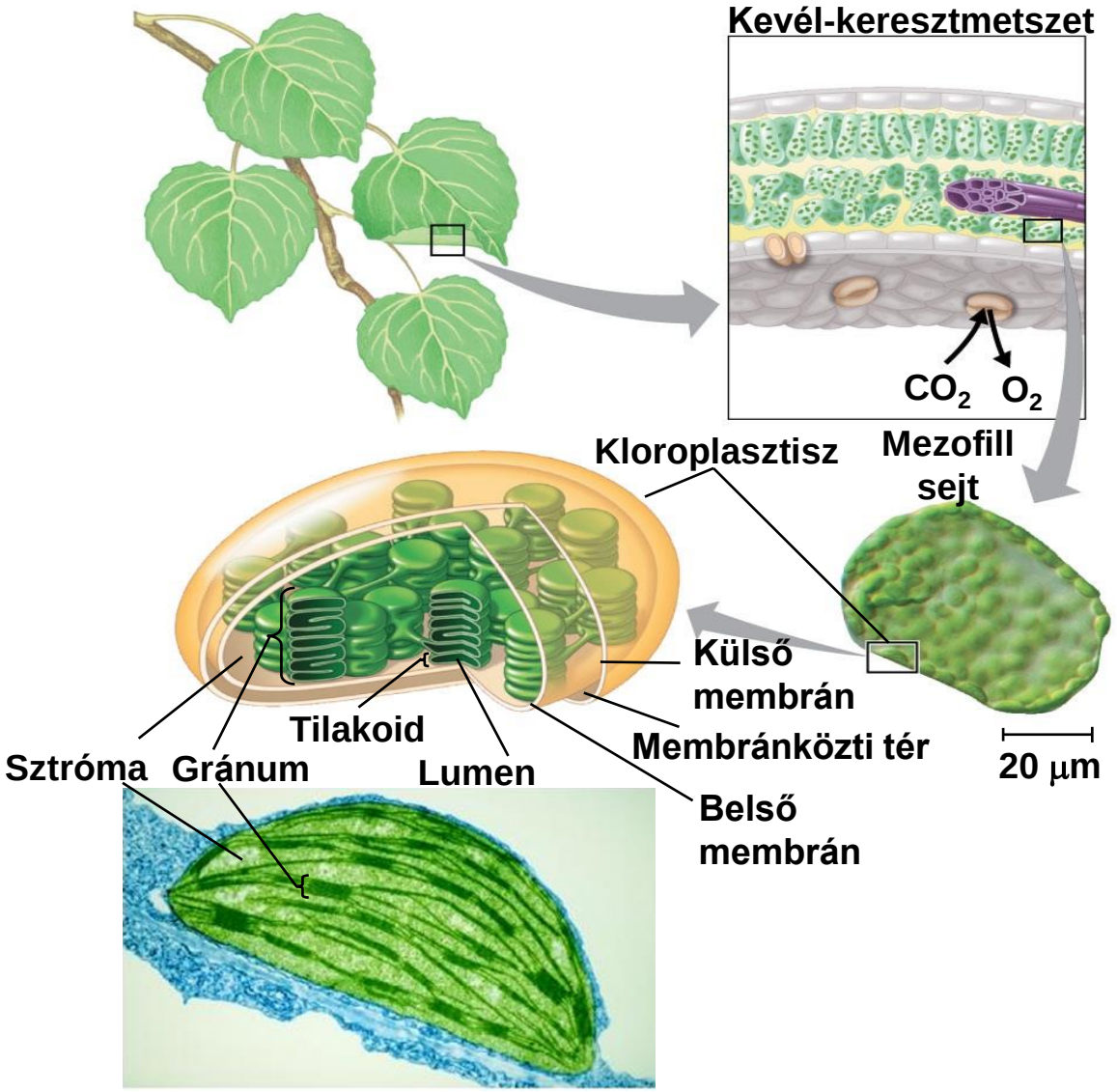
1 μm

© 2011 Pearson Education, Inc.

A fotoszintézis jelentősége

- Az **előállított szerves anyag** az alapja az autotróf és a rájuk utalt heterotróf szervezetek közötti anyagcserének.
- A **fotoszintézis során „melléktermékként" keletkezett oxigén** lehetővé tette az oxidatív légkör kialakulását, az ózonréteg létrejöttét.
- Ezáltal az élővilág új területeket népesíthetett be, élettere a **szárazföld**re is kiterjedt. Az ózon ugyanis védelmet biztosított az élőlényekre káros UV sugárzással szemben.
- A fosszilis energiaforrások (kőolaj, földgáz) sokmillió éve elhalt élőlények maradványaiból keletkeztek. Ilyen értelemben „napenergia-raktárak".

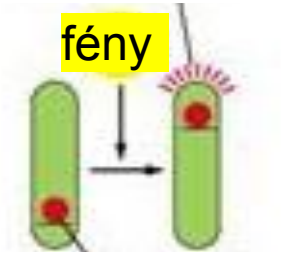
A fotoszintézis helye a növényekben



A fényenergia megkötése

gerjesztett fotopigment

fény



Az elektron a fény fotonjainak energiáját átvéve nagyobb energiájú pályára kerül.

A fotopigment lazán kötött elektronja

GERJESZTÉS

fény és hő

szomszédos klorofill molekula

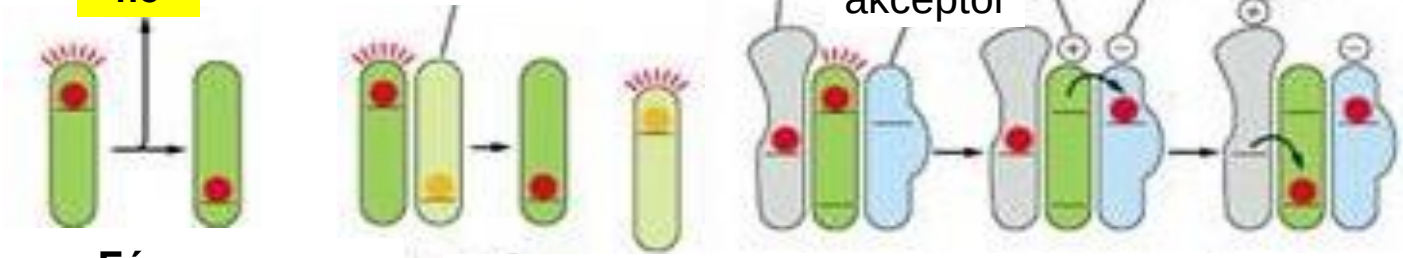
elektron donor

oxidált klorofill

elektron akceptor

redukált akceptor

oxidált donor



1. **Fény- és hő-leadás**

(fluoreszcencia vagy hőveszteség)

2. **Rezonancia energia-transzfer**

Szomszédos, alacsonyabb gerjesztési energiájú pigment molekulák, majd a reakciócentrum felé.

3. **Fotokémiai reakció Elektron-transzfer**

Töltésszétválás. Az elektronok elektronszállító rendszernek adódnak át.

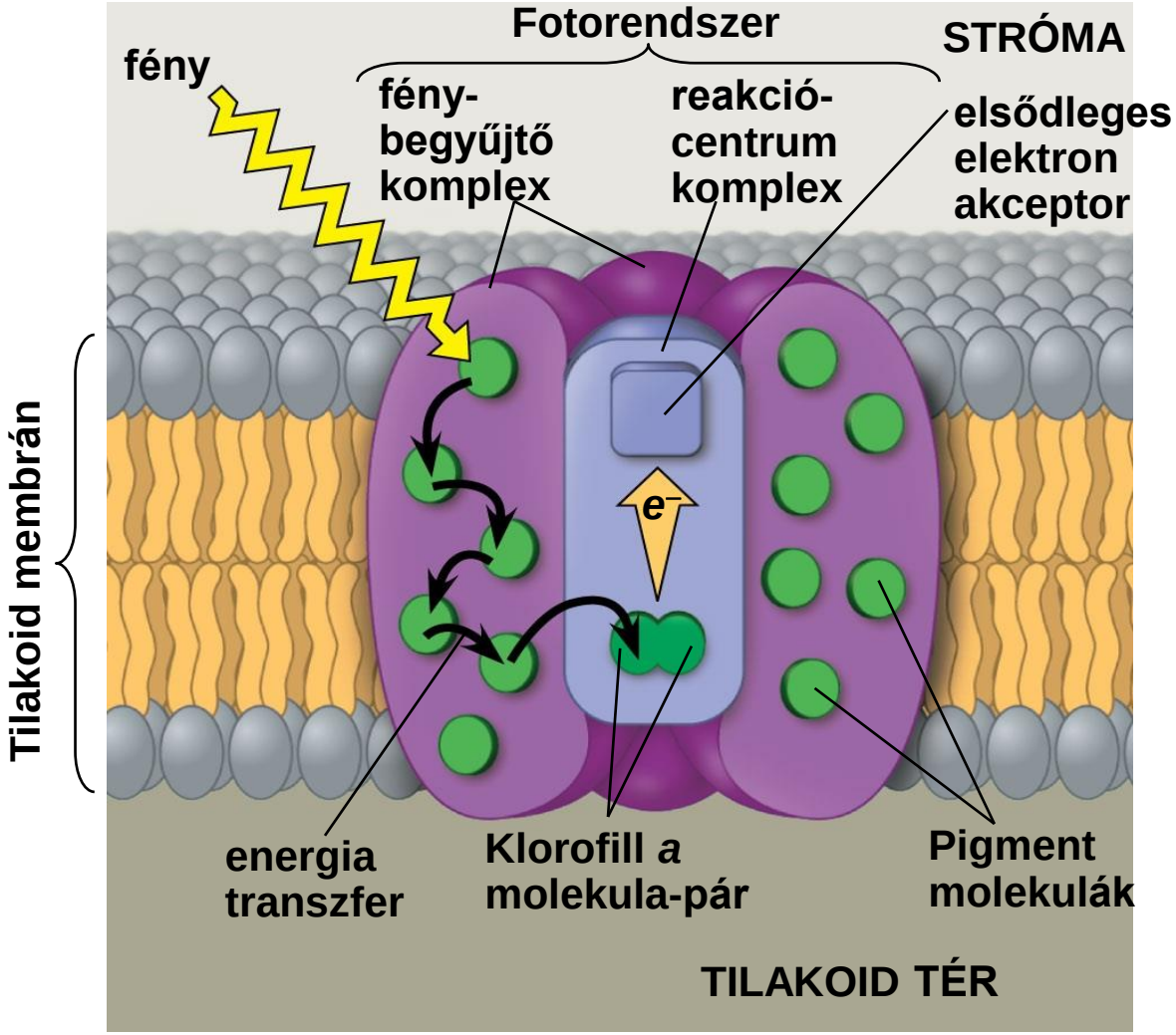
A fotokémiai rendszerek

A fotopigmentek fotokémiai rendszerekben helyezkednek el.

Két funkcionálisan eltérő rész:

1. Antenna komplex
   - A reconancia elektrontranszfere a molekulák közti távolságtól és pozíciójuktól is függ. A fehérjékben a pigmentek optimálisan pozícionáltak.
   - javítják a fényabszorpció hatásfokát (a reakciócentrum önmagában kevesebb fény megkötésére lenne képes).
2. Reakciócentrum
   - A reakciócentrum egy irreverzibilis elektron csapda, ami a gerjesztett elektront gyorsan átadja egy olyan molekulának, ahol az sokkal stabilabb környezetben lesz.

A fotokémiai rendszerek szerkezete



A fotopigmentek

1. Klorofill a
   - Ősi és univerzális (prokarióta cianobaktériumokban csak ez van)
   - kék ill. vörös abszorbciós maximum 430 ill. 660 nm
   - a fénybegyűjtés mellett fotokémiai reakcióra is képes.
   - A PSI és a PSII reakciócentrumában

- A többiek a spektrumtartomány jobb lefedését szolgálják.
- Egyéb klorofillek
  - Az eukariótákban klorofill-b
  - Barna- és kovamoszatokban klorofill-c
  - Vörös moszatokban klorofill-d

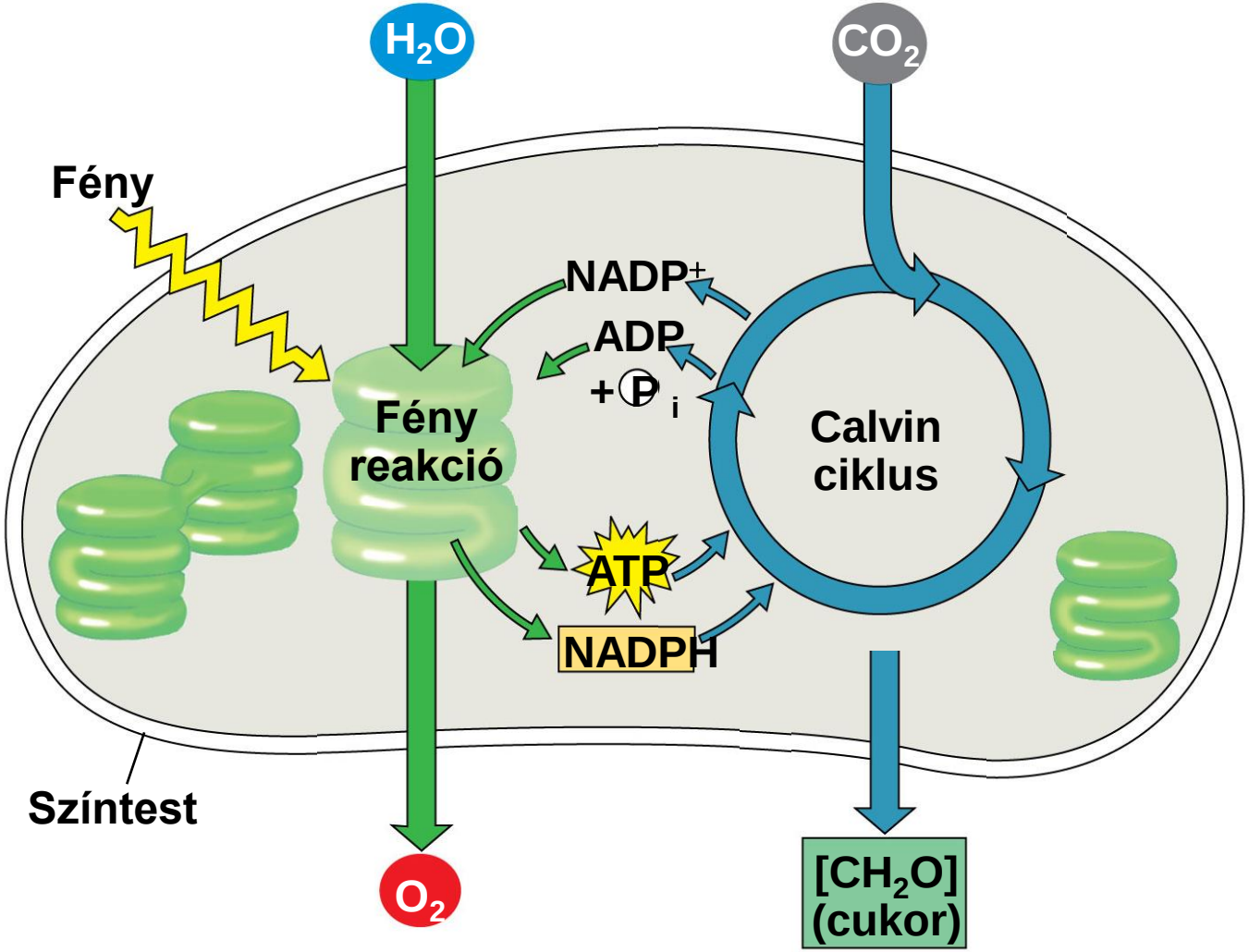
A fotopigmentek

3. Karotinoidok
   - a kék tartományban (400-500 nm körül) nyelnek el.

4. Fikobilnek
   - vörösalgák és cianobaktériumok segédpigmentjei.

5. Bakterioklorofillek
   - a nem oxigéntermelő baktériumokban
   - abszorpciója az infravörös tartományban (900-1000 nm)
   - víz alatti fényviszonyokhoz való alkalmazkodás

Fotoszintézis két fő szakasza



© 2011 Pearson Education, Inc.

A fényszakaszban lejátszódó folyamatok

Fényelnyelés (abszorpció)

Vízbontás (fotolízis)

Elektrontranszport

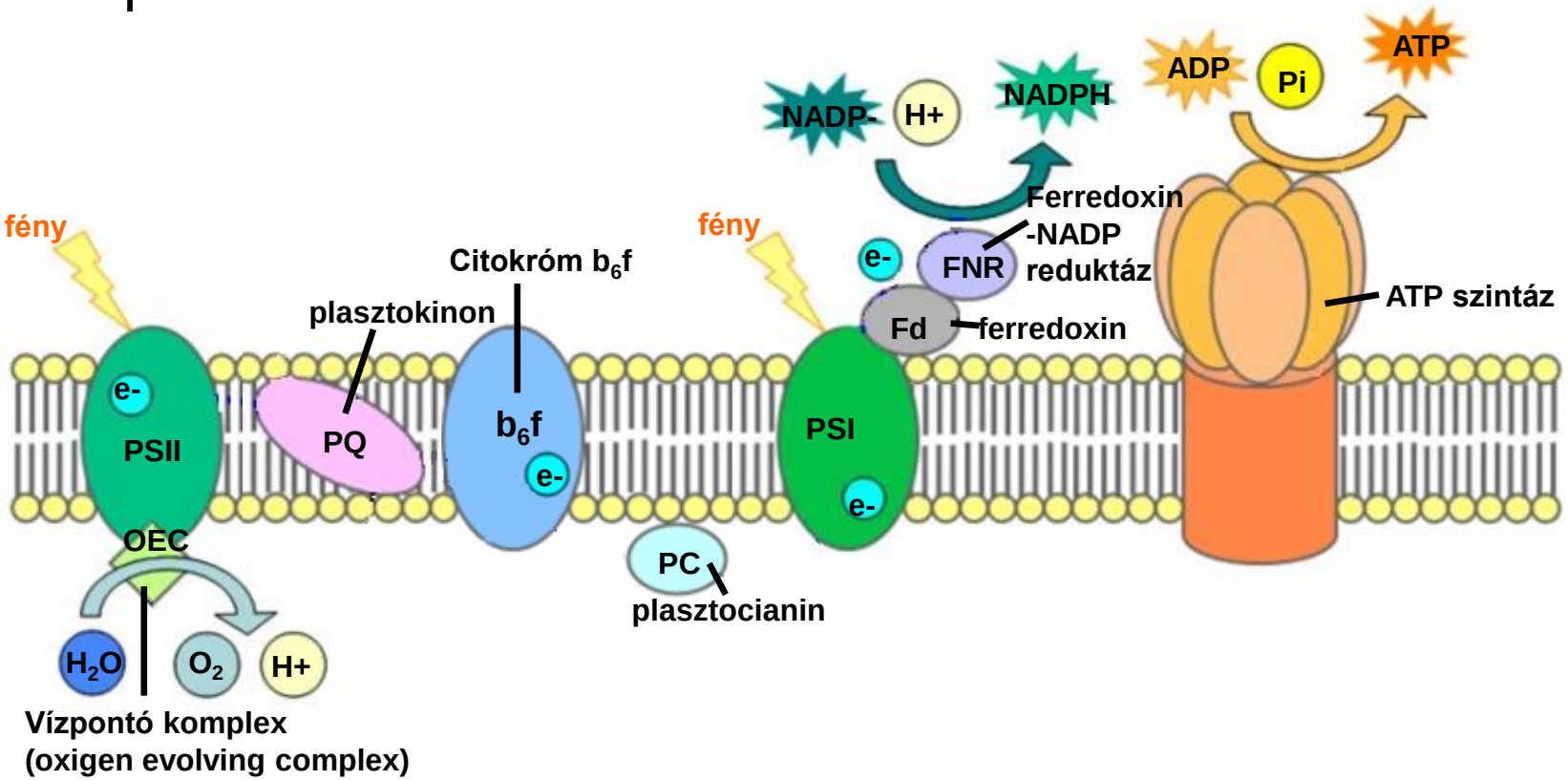
- végső elektronakceptor a $NADP^+$

ATP szintézis

$$2NADP + 2H_2O = 2NADPH + 2H^+ + \mathbf{O_2}$$

A fotoszinetikus apparátus

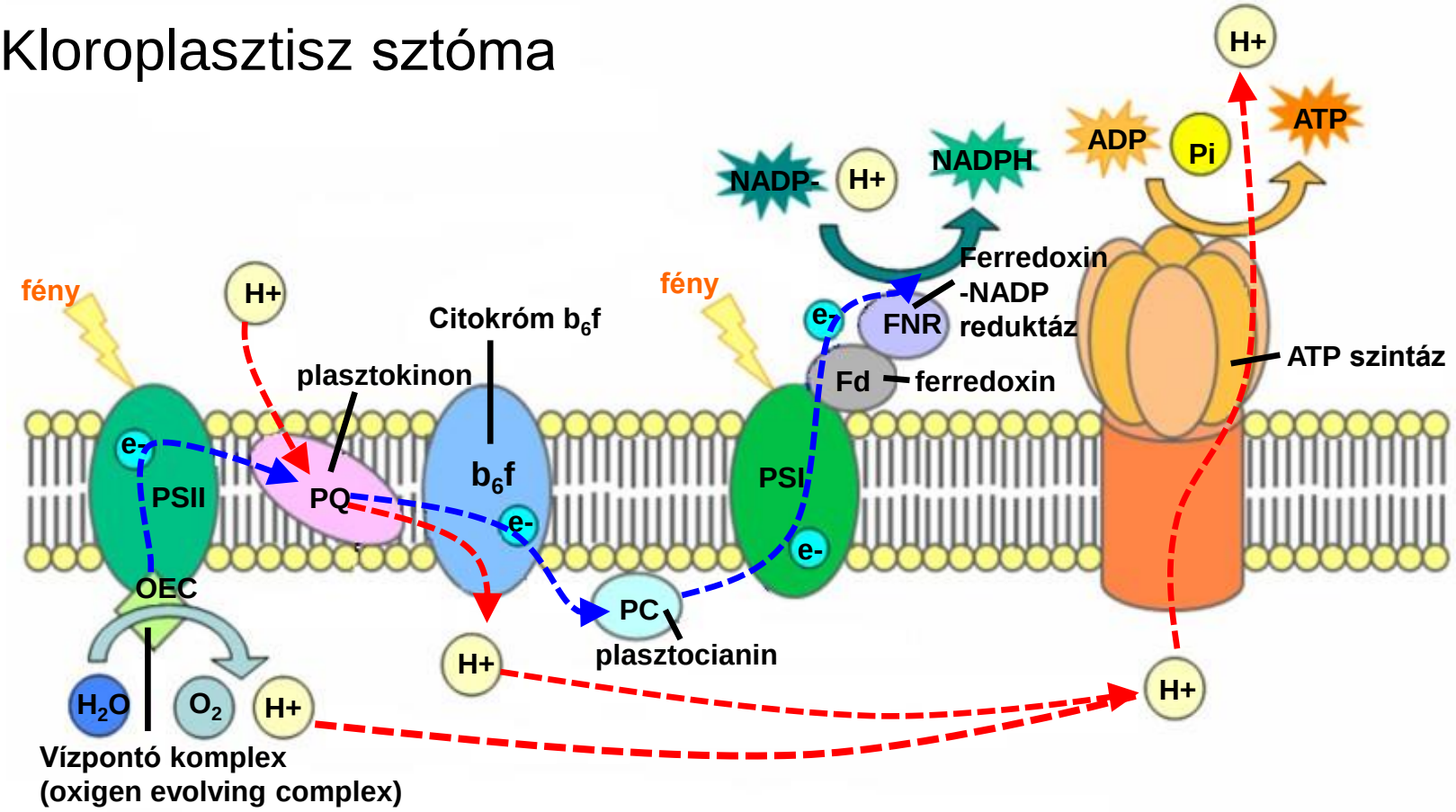
Kloroplasztisz sztóma



Tilakoid lumen

A fotoszinetikus apparátus

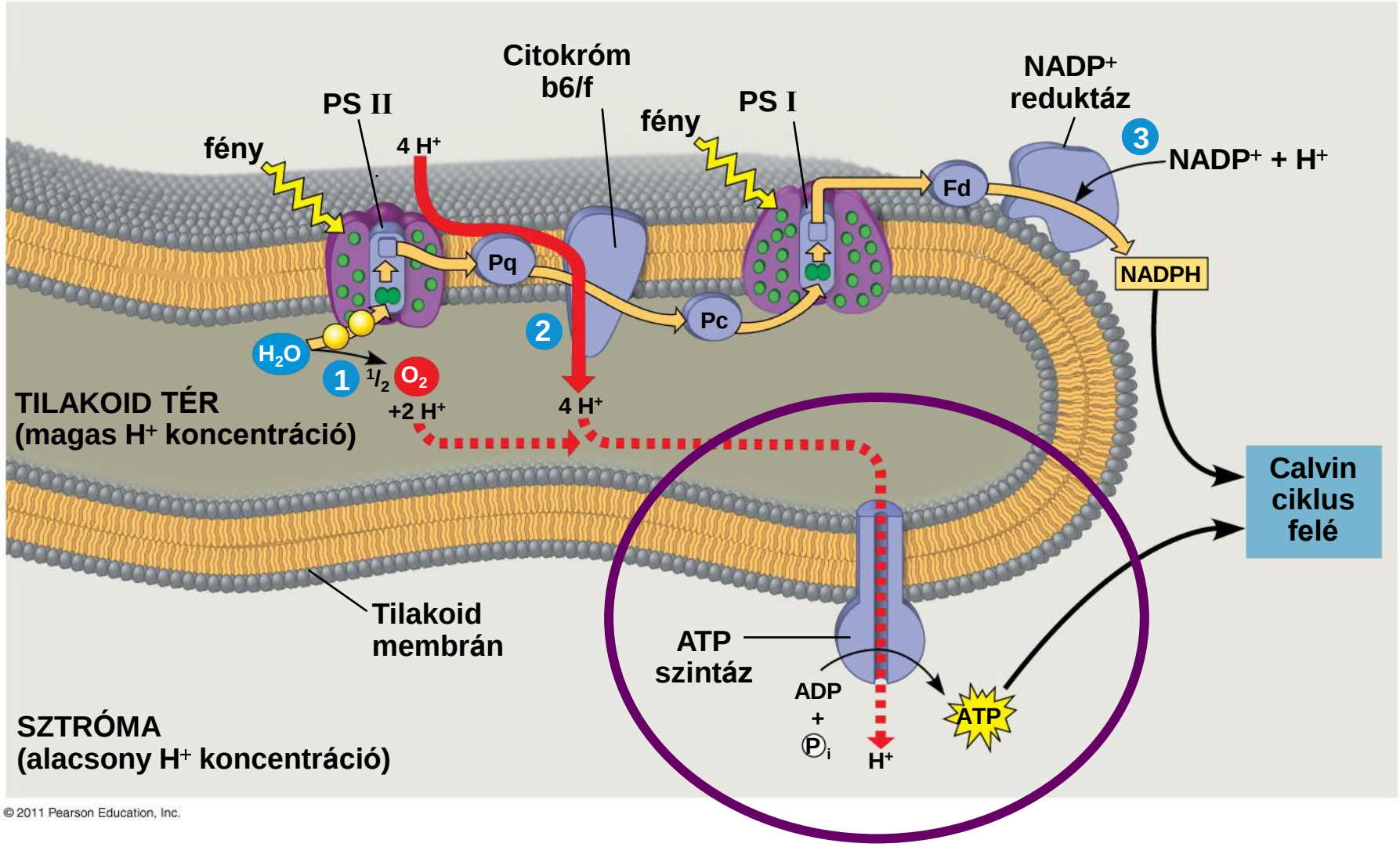
Kloroplasztisz sztóma



Tilakoid lumen

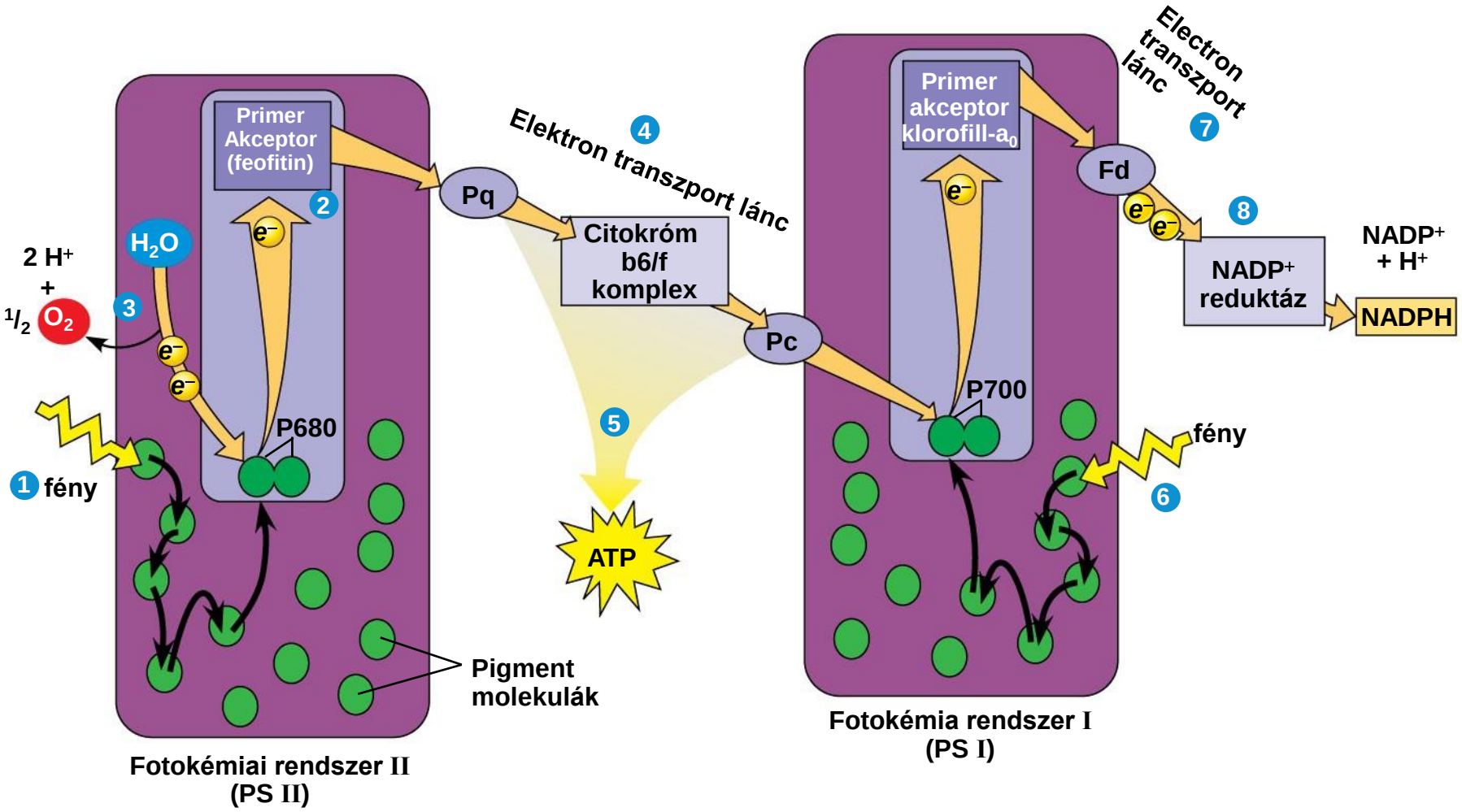
(A citokróm b6/f redukciója során a H ionok a sztómából érkeznek, oxidációjakor a lumen felé távoznak.)

A fotoszinetikus foszforiláció



© 2011 Pearson Education, Inc.

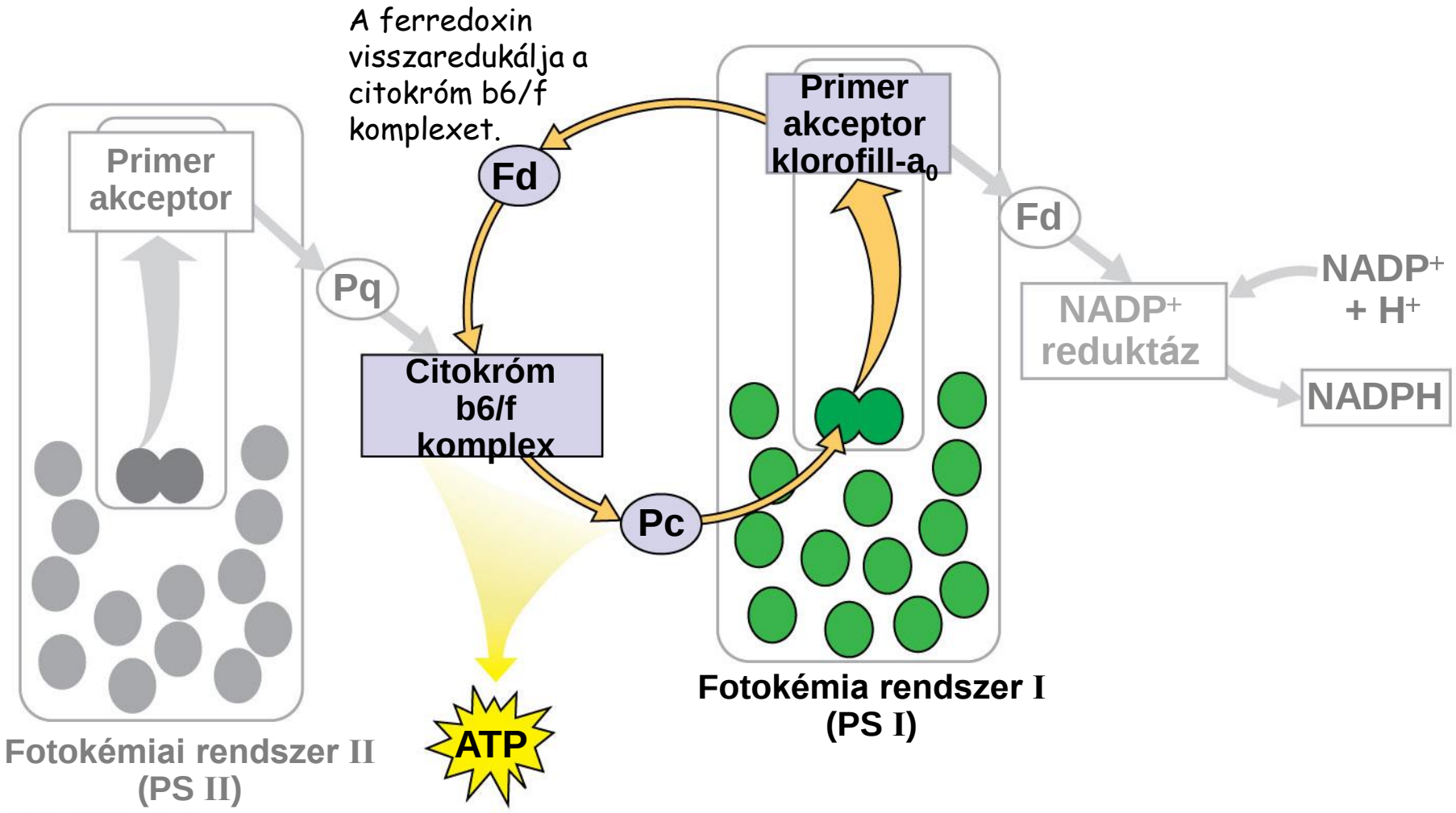
A fényszakasz részletes vizsgálata



© 2011 Pearson Education, Inc.

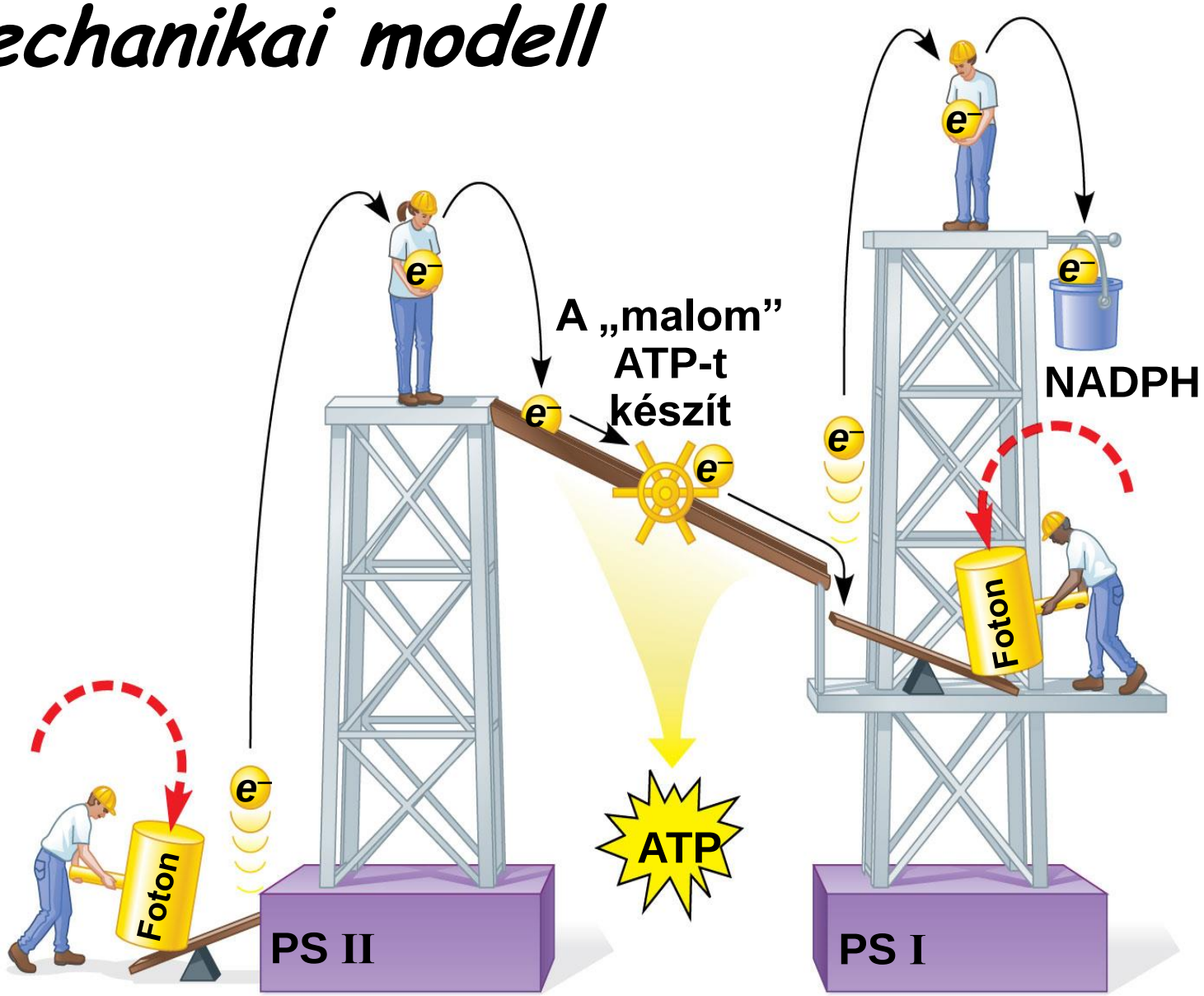
A PSI ciklikus működése

Célja tisztán az ATP szintézis. (A fénysokktól is véd.)



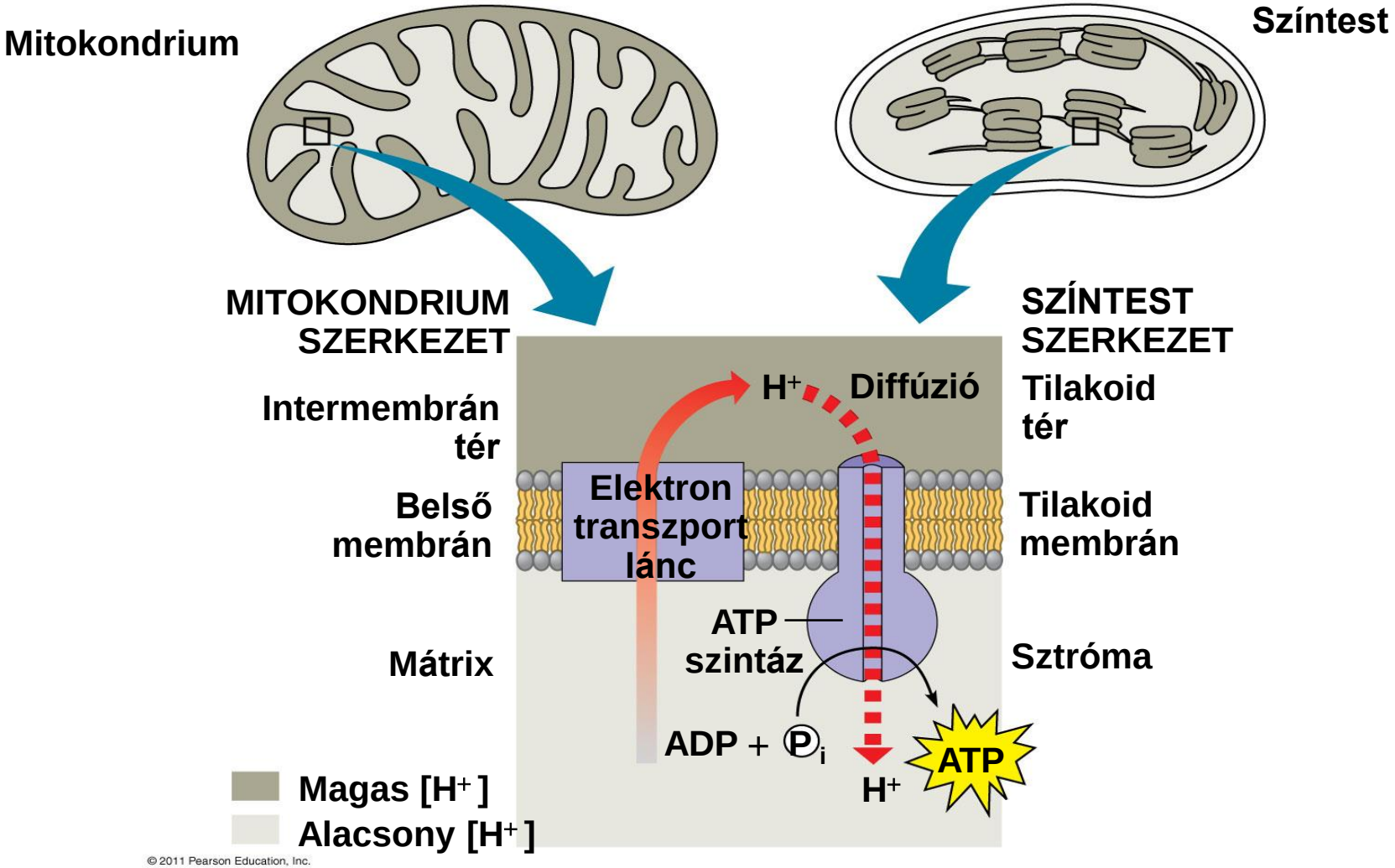
© 2011 Pearson Education, Inc.

Mechanikai modell



© 2011 Pearson Education, Inc.

A mitokondriális és fotoszintetikus kemiozmózis összevetése



© 2011 Pearson Education, Inc.

A mitokondriális és fotoszintetikus kemiozmózis összevetése

1. Fotoszintézisnél a hajtóerő a fény energiája

   Oxidatív foszforilációnál az oxidálódó szénatomokról származó nagy energiájú elektronok hajtják.

2. A színtestekben a belső térből (sztróma) a tilakoidok belesejébe pumpálódnak a H^+-ok.

   A mitokondriumban a H^+-ok a belső térből (mátrix) a külső és belső memrán közé pumpálódnak.

3. Az ATP mindkét esetben a belső térben szintetizálódik.

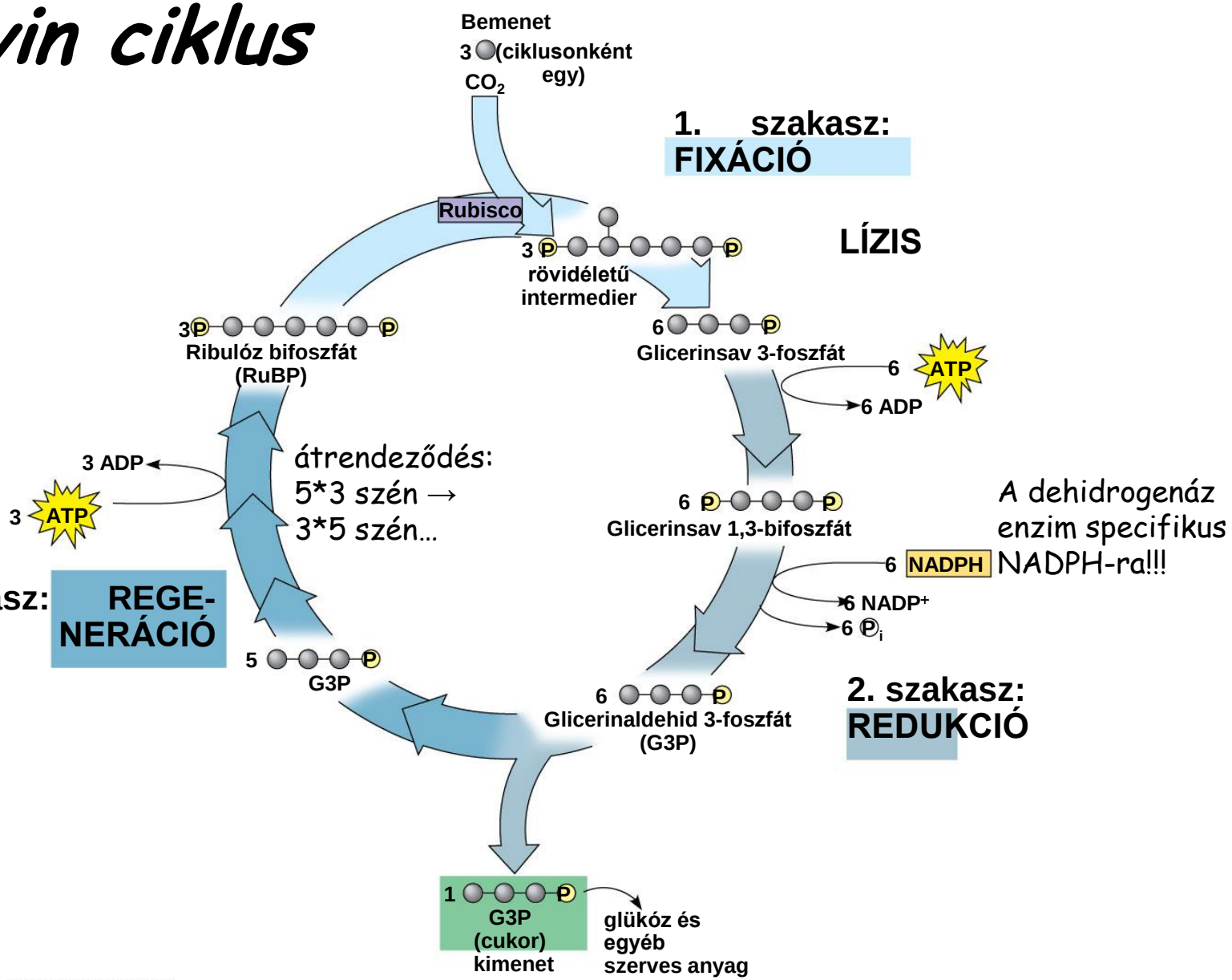
A Calvin ciklus

A fotoszintézis sötét-szakasza

A reakció helye: a kloroplasztisz sztrómája felé néző tilakoid membrán felszíne.

1. **FIXÁCIÓ: a széndioxid megkötése**
2. **REDUKCIÓ: széndioxid redukciója szénhidráttá** a fényszakaszból származó ATP és NADPH segítségével
3. **REGENERÁCIÓ**: A széndioxidot megkötő molekula „visszanyerése" Ezek a reakciók már nem függenek közvetlenül a fénytől

Calvin ciklus



© 2011 Pearson Education, Inc.

A fixáció egyenlete

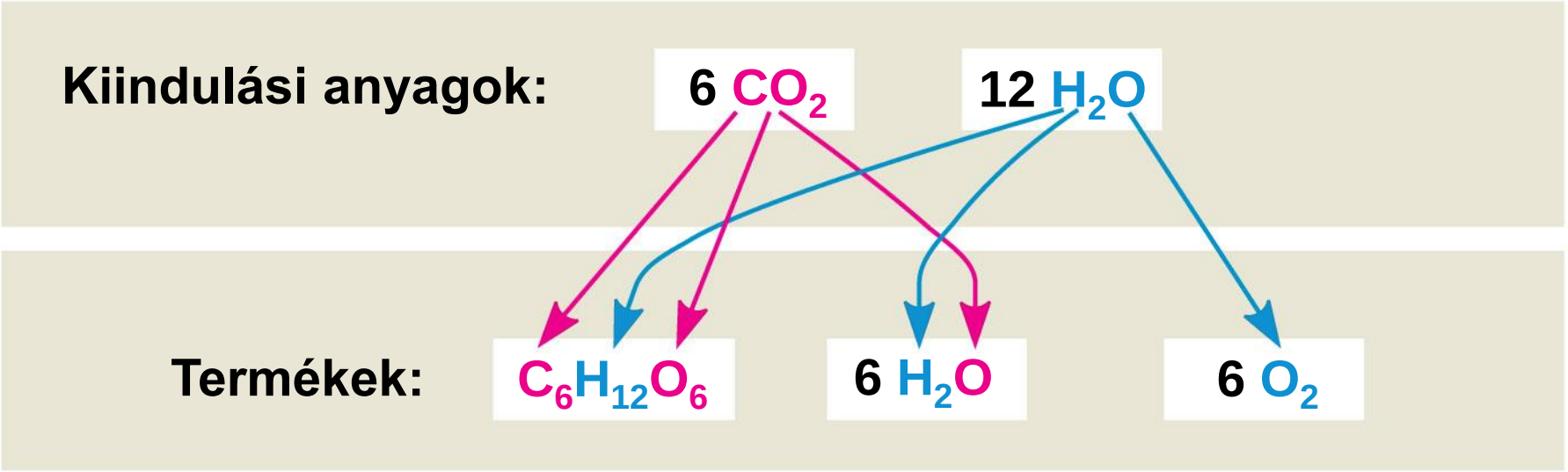
redukálódik

$$\text{Energy} + 6\,CO_2 + 6\,H_2O \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2$$

oxidálódik

© 2011 Pearson Education, Inc.

$$6CO_2 + 18ATP + 12NADPH + 12H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 18ADP + 18P_i + 12NADP^+ + 6H^+$$



© 2011 Pearson Education, Inc.

Fotorespiráció

A RuBisCo nem nagy affinitással köti a CO_2 –t és nem is szelektív.

Adott esetben O_2 –t is képes „fixálni”.

Normál körülmények között a széndioxid kötés sebessége kb. 4-szer akkora mint az oxigéné.

Ez az arány azonban az oxigénkötés javára tolódik el, ha

- a CO_2/O_2 arány romlik
- a hőmérséklet emelkedésével

A keletkező glikolsav-2-foszfát több lépésen keresztül – peroxiszómákba és mitokondriumokba kerülve - glicinné alakul, CO_2 kibocsátás közben.

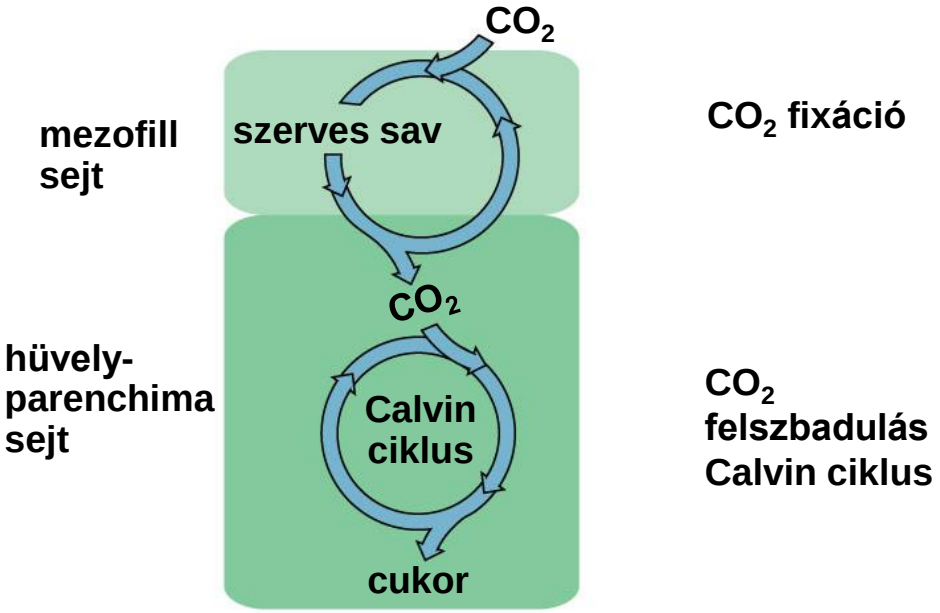
O_2 fogy, CO_2 keletkezik → légzés

A fénylégzés veszteséges folyamat, mert nem jár ATP szintézissel, és akár 50% -ra is csökkenhet miatta a fixáció mértéke.

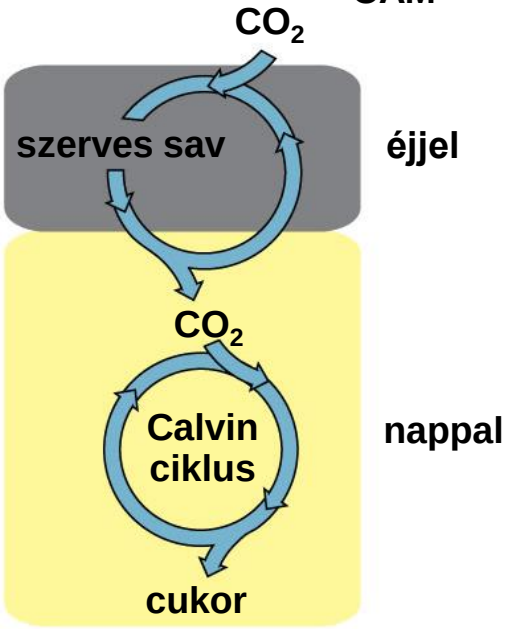
A C_4 és a CAM fotoszintézis

cukornád
C_4

ananász
CAM



(a) A lépések térbeli szétválasztása



(b) A lépések időbeli szétválasztása

Pentóz-foszfát ciklus

Az állatokban is **NADPH** szükséges a felépítő folyamatokhoz.

- A szintetizáló enzimek szelektívek!
- ez teszi lehetővé, hogy a NADH-ból mindenképpen ATP keletkezzen (a terminális oxidáció során).
- A felépítő és lebontó folyamatok különválasztása.

Hol keletkezik NADPH? (A citromsavciklusban nem!)

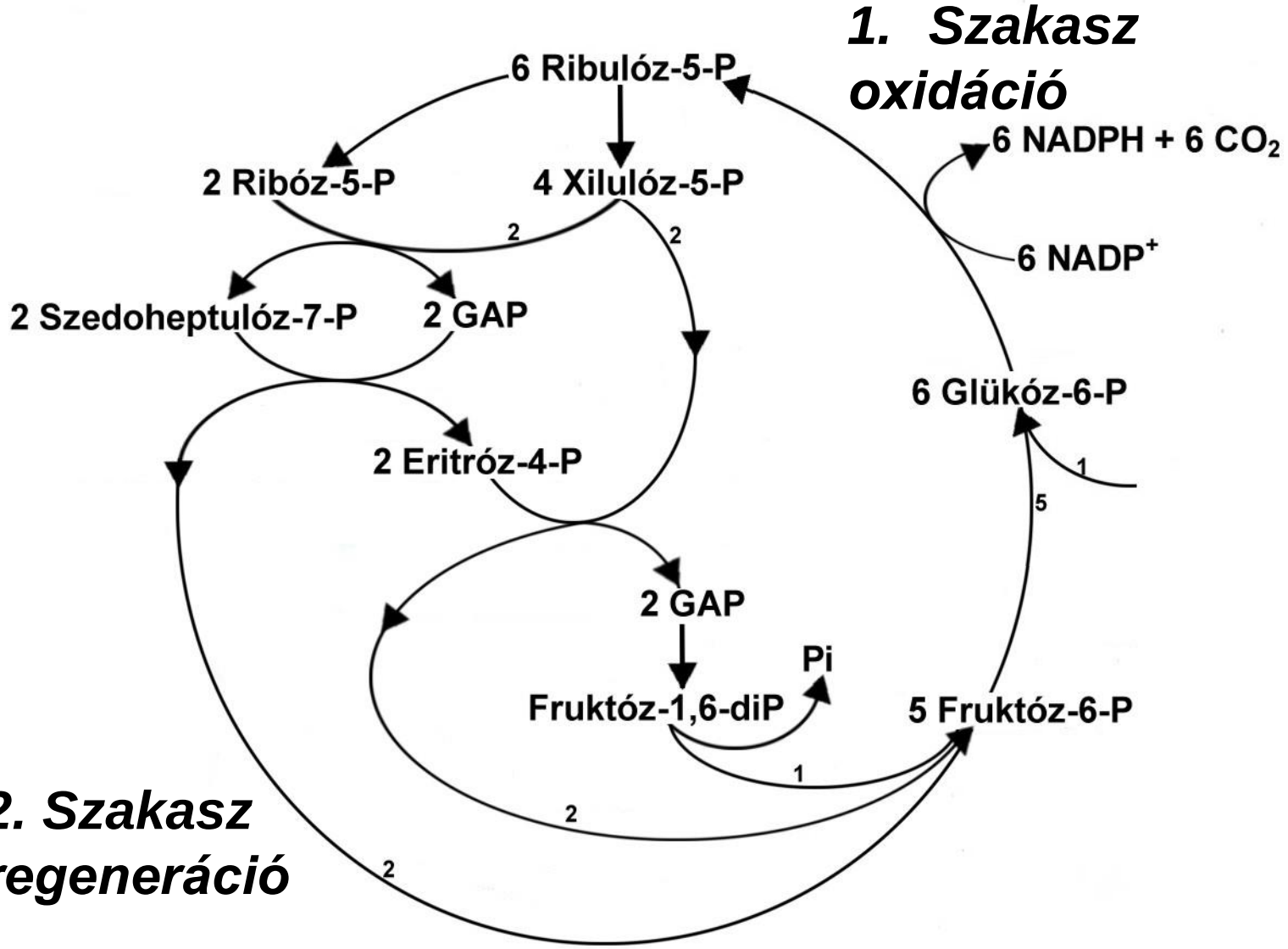
A válasz a **pentóz-foszfát ciklus**.

A citoplazmában zajlik.

A ciklus két szakaszra bontható:

- Oxidatív fázis
- Regenerációs fázis

Pentóz-foszfát ciklus



Pentóz-foszfát ciklus

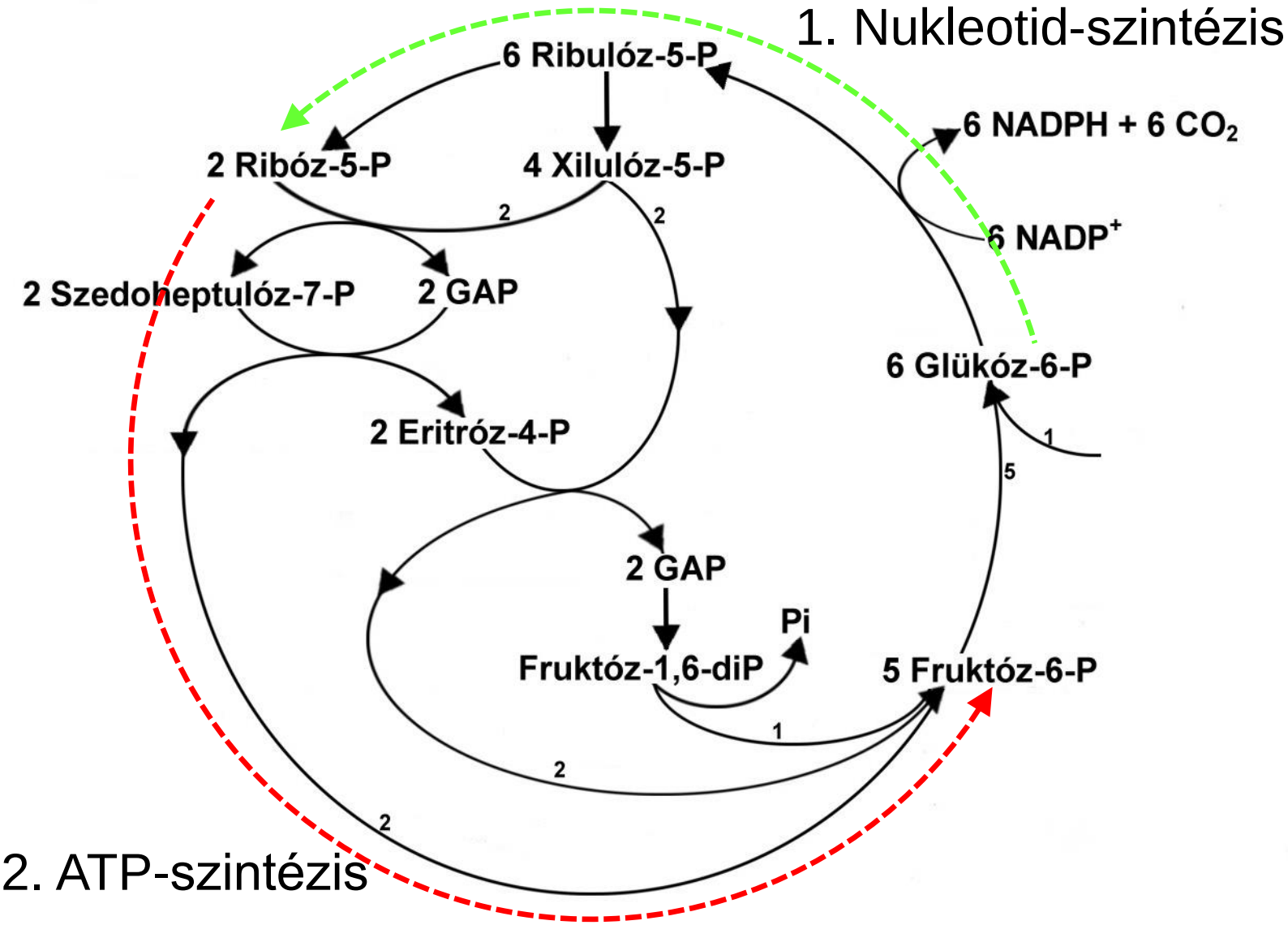
A visszatápláló lépések során visszakapjuk a glükóz-6-foszfát **egy részét.**

- 1db glükóz-6-P-ból 1db ribulóz-5-P és 1db CO_2 képződik.
  tehát 6 ciklus alatt
- 6db glükóz-6-P-ból 6db ribulóz-5-P és 6db CO_2 képződik.
  a regenerációs lépéseket figyelembe véve
- 6db glükóz-6-P-ból 5db glükóz-6-P és 6db CO_2 képződik.
- Olyan, mintha 1db glükóz-6-P teljesen eloxidálódott volna...

„a **glükóz direkt oxidációja**"

(„direkt", azaz egyetlen lépésben).

A „félciklusok” szerepe



Calvin- vs. Pentóz-foszfát ciklus

1. Calvin ciklus a kloroplasztiszok sztómájában, Pentóz-foszfát ciklus a citoplazmában zajlik.
2. Felületesen szemlélve egymás megfordításának tűnnek. (De nem az!)
   - Calvin ciklusban CO_2 és NADPH felhasználódik, a pentóz-foszfát ciklusban keletkezik.
3. Mindkét ciklus záró lépése regeneráció.
4. A folyamat célja:
   - Calvin ciklusban szénhidrát szintézis
   - Pentóz foszfát ciklusban más felépítő folyamatokhoz szükséges NADPH szintézis

Glükoneogenezis

- A glükóz szintézise nemszénhidrát előanyagokból: fehérjék aminosavjaiból, zsírok glicerinjéből, ill. az izmok által termelt tejsavból és piroszőlősavból.

- Miért van erre szükség?
- Mert vannak sejtek, ami csak glukózt igényelnek (obligát cukorfogyasztók).

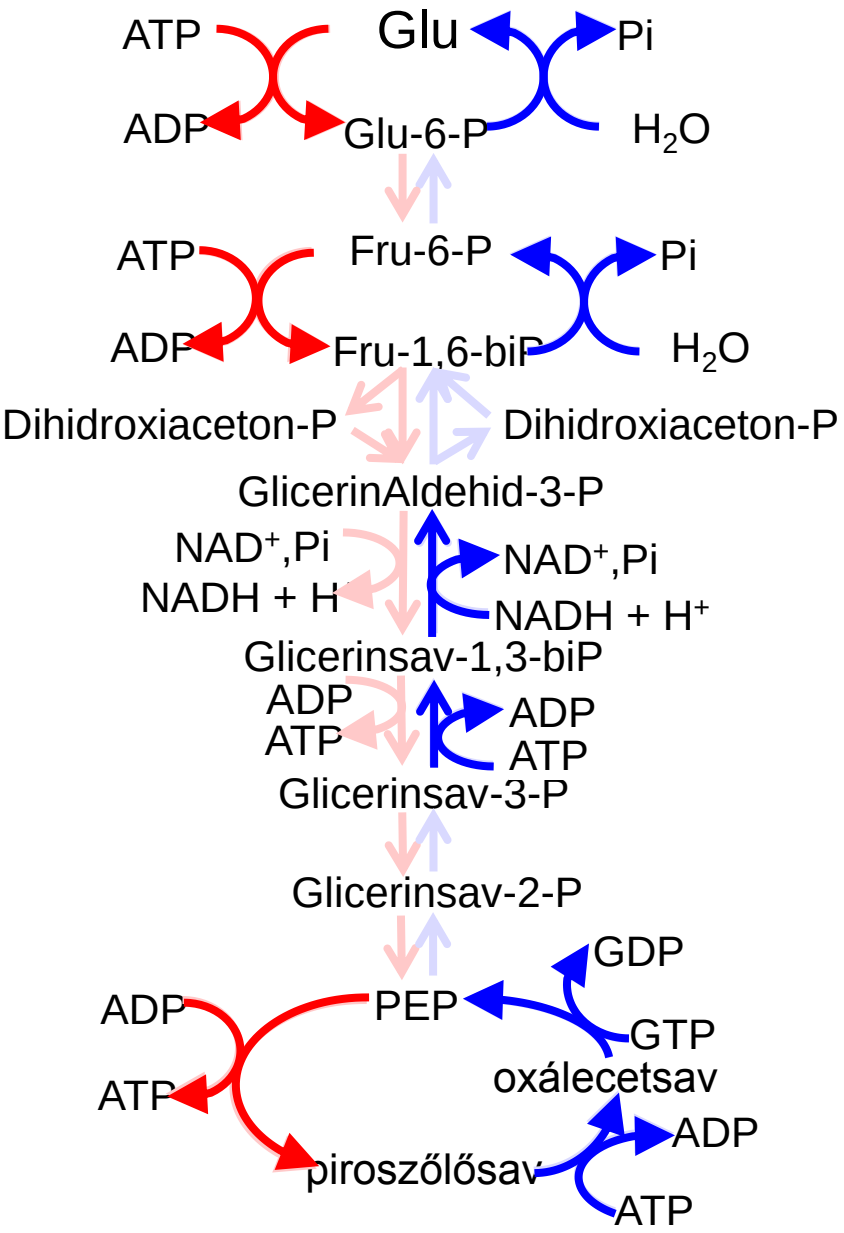
Nagyjából a glikolízis lépései zajlanak visszafelé, DE!

- Egyes lépések azonban nem megfordíthatóak
- Ezeket fordított irányban más enzimek katalizálják.
  - Az eltérő enzimek egymástól független módon is szabályozhatóak.

A glükoneogenezis folyamata

1. Nem megfordítható folyamatok (eltérő enzimek)

2. A Calvin ciklushoz hasonló lépések
(de ez NADH-specifikus!)



A glükoneogenezis kiindulási anyagai

- Minden olyan anyagból, ami a **glikolízis köztes termékévé** alakítható lehet glükózt előállítani.
  1. glicerin → glicerinaldehid-foszfát (GAP) (lipidek)
  2. pentózok → GAP, fruktóz-6-foszfát (nukleotidok)
  3. aminosavak → piroszőlősav (fehérjék)
- Sőt a **citromsavciklus tagjaiból** is lehet glukózt előállítani, mert azok oxálecetsavvá alakulhatnak, ami a glükoneogenezis köztes terméke.
  4. aminosavak → citromsavcikus tagjai

Aminosav-szintézis

Az a táplálék, aminek az aminosav összetétele megfelel a mienknek, a **teljes értékű táplálék**. Ez ritkán teljesül.

Az aminosavak egy része előállítható ketosavakból **transzaminálás**sal.

1. A szervezet nem képes a szintézisre:
   leucin, isoleucin, valin, triptofán, thereonin, lizin, hisztidin, metionin
2. A szervezet esszenciális aminosavakból állítja elő:
   cisztein, tirozin
   Ezek csak akkor esszenciálisak, ha a kiindulási (esszenciális) aminosav mennyisége korlátozott.
3. A szervezet képes szintetizálni, de a *de novo* szintézis nem tud lépést tartani a szükséglettel:
   arginin (A karbamidszintézishez használódik el.)

Zsírsavszintézis

Zsírszintézisre minden sejt képes, de leginkább a **máj és a zsírszövet** sejtjeiben zajlik.

Nem a lebontófolyamat megfordítása!

1. A szintézishez **NADPH kell**, míg a lebontásnál NADH képződött.
2. Lokalizáció: a lebontás a mitokondriumban, a **szintézis a citolpazmában, az ER felületén**.
3. Mások az enzimek: a lebontásban több enzim vesz részt, a szintézist egyetlen hatalmas polipeptidlánc végzi: a **zsírsav-szintáz**.

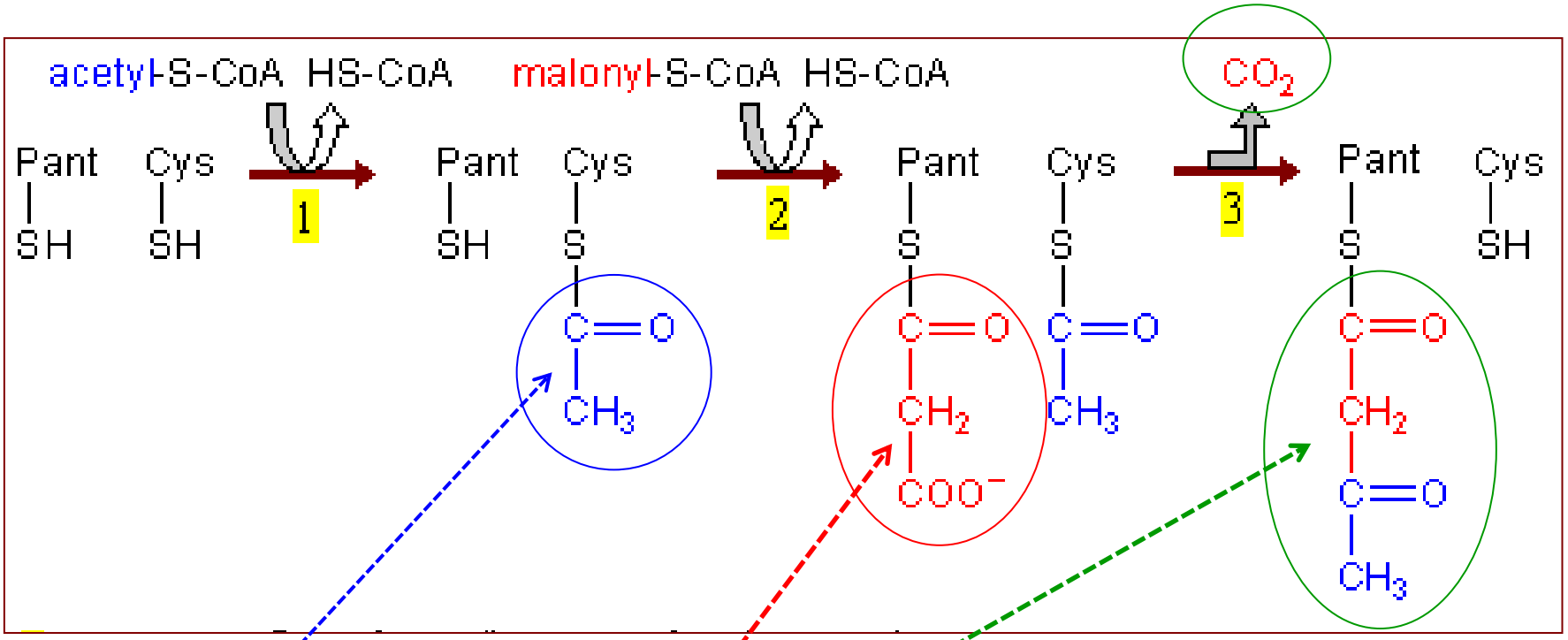
Zsírsavszintézis főbb pontjai

A zsírsavlánc **két szénatomos egységekből** épül fel, az egységek **acetil-KoA** molekulákból származnak.

1. **Aktiváció**:
   - A **CO_2 átmeneti beépülése**, ehhez **ATP**-ben tárolt energiát használ. Malonil-KoA keletkezik.
   - Az enzim kofaktora a **biotin**.

2. **Lánchosszabbítás**
   - Az újabb egység hozzáadása során a **malonil-KoA dekarboxilálódik**.

A láncnövekedés lépései 1.

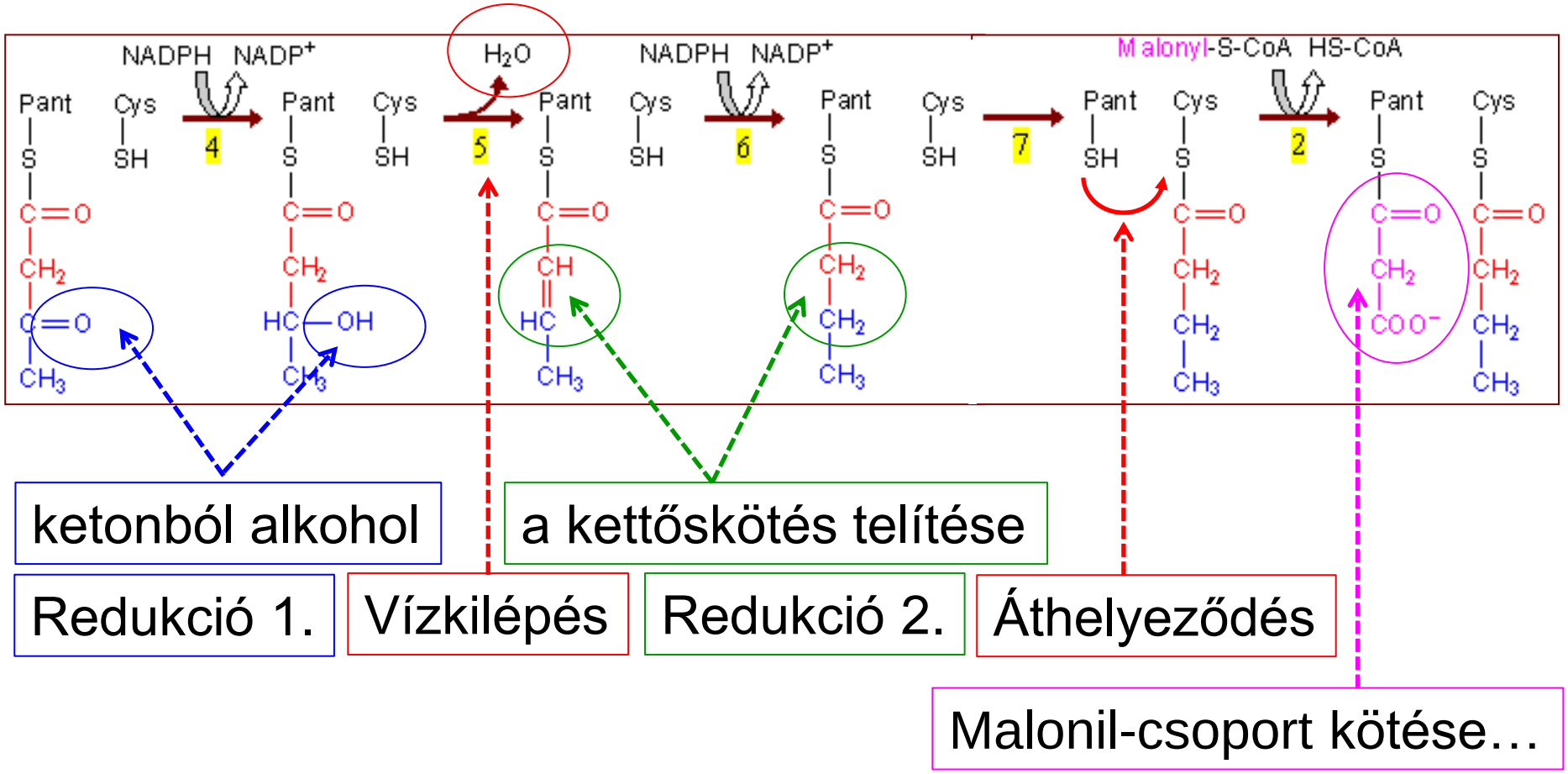


Acetil-csoport kötése

Kondenzáció

Malonil-csoport kötése

A láncnövekedés lépései 2.



Zsírsavszintézis főbb pontjai 2.

A lánc 16 egységnyi hosszúságig növekszik. Ez a **palmitinsav**.

3. **Utólagos módosítások** (ha szükséges)
   - **Lánchosszabítás**
   - **Kettős kötés** (egy!) létrehozása oxidációval
   - **cukorlánc hozzákötése (glikolipidek) stb.**

Többszörösen kettős kötést tartalmazó molekulákat nem az emberi szervezet nem tud szintetizálni.

Ezek az esszenciális zsírsavak.

Pl linolsav, linolénsav

Nukleotidok bioszintézise

1. A ribózt a **pentóz-foszfát ciklus** termeli glukózból.
2. A dezoxiribonukleotidok utólag képződnek, redukcióval (**B_{12} vitamin** szükséges).

- A bázisok beépülése történhet:
  1. A lebontás során keletkező **szabad bázisok újrahasznosításá**val.
  2. De novo szintézissel. A ***de novo* szintézis** során a bázisok nitrogéntartalma aminosavakból származik.

(Hevessy György kémiai Nobel-díj 1943)