

# Zdroje energie pro buňku

**Biologie 1. ročník**

Akademický rok: 2023-2024

doc. RNDr. Milan Bartoš, Ph.D.

# Obsah dnešní přednášky

1. Chemické procesy v živých systémech
2. Funkce enzymů
3. Energeticky výhodné reakce, volná energie
4. Regulace enzymové aktivity
5. Aktivované přenašečové molekuly: ATP, NADH, NADPH
6. Princip získávání energie z potravy
7. Buněčná respirace
8. Fotosyntéza

# 1. Chemické procesy v živých systémech

# *V buňce probíhají tisíce chemických reakcí*

V živém organismu (v každé buňce) dochází k chemickým reakcím, které jsou důležité pro udržení vlastní existence.

V každé buňce tisíce chemických reakcí během jediné sekundy.

Naprostá většina probíhajících reakcí je řízena prostřednictvím **enzymů**.

**ENZYM** ----- *katalyzuje = urychluje reakci*

**SUBSTRÁT** ----- *látka, na kterou enzym působí*

**Enzymově katalyzované reakce se spojují za sebe** (produkt jedné reakce je substrátem pro reakci další) **a vytvářejí reakční – metabolické dráhy.**

# *Dva typy metabolických drah*

## ❖ **KATABOLICKÉ DRÁHY**

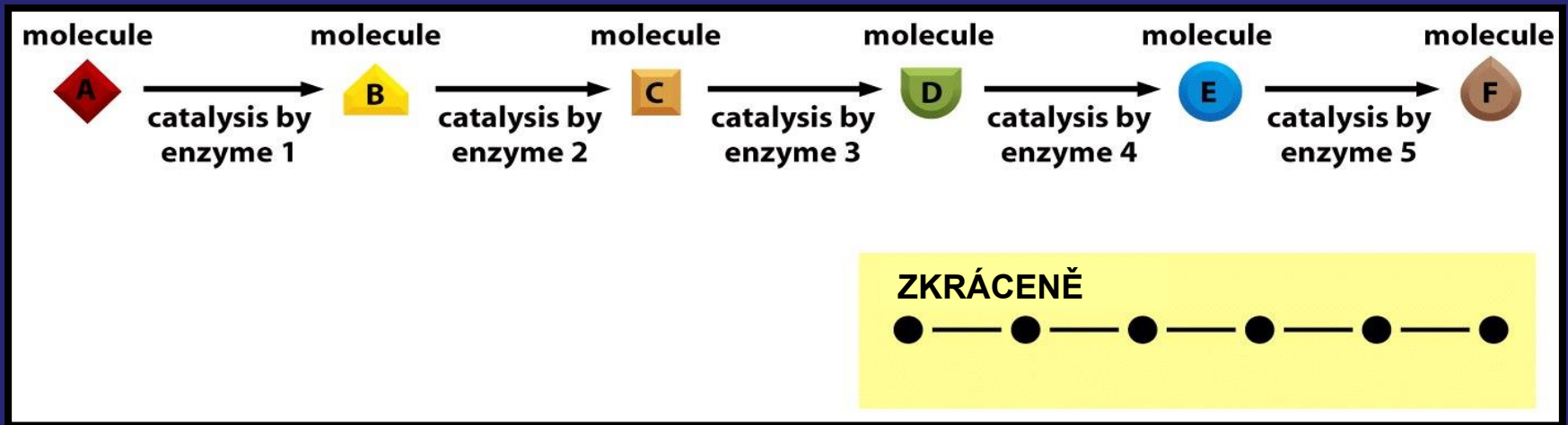
Odbourávají živiny na menší molekuly, využitelné jako stavební kameny. Při těchto dějích vzniká **pro buňku využitelná energie**.

## ❖ **ANABOLICKÉ = BIOSYNTETICKÉ DRÁHY**

Dochází k syntéze molekul tvořících buňku. Při těchto dějích je energie spotřebována - **využívána je energie z katabolických dějů**.

Oba soubory reakcí se společně označují jako  
**METABOLISMUS BUŇKY**

# Metabolická dráha je sekvence reakcí

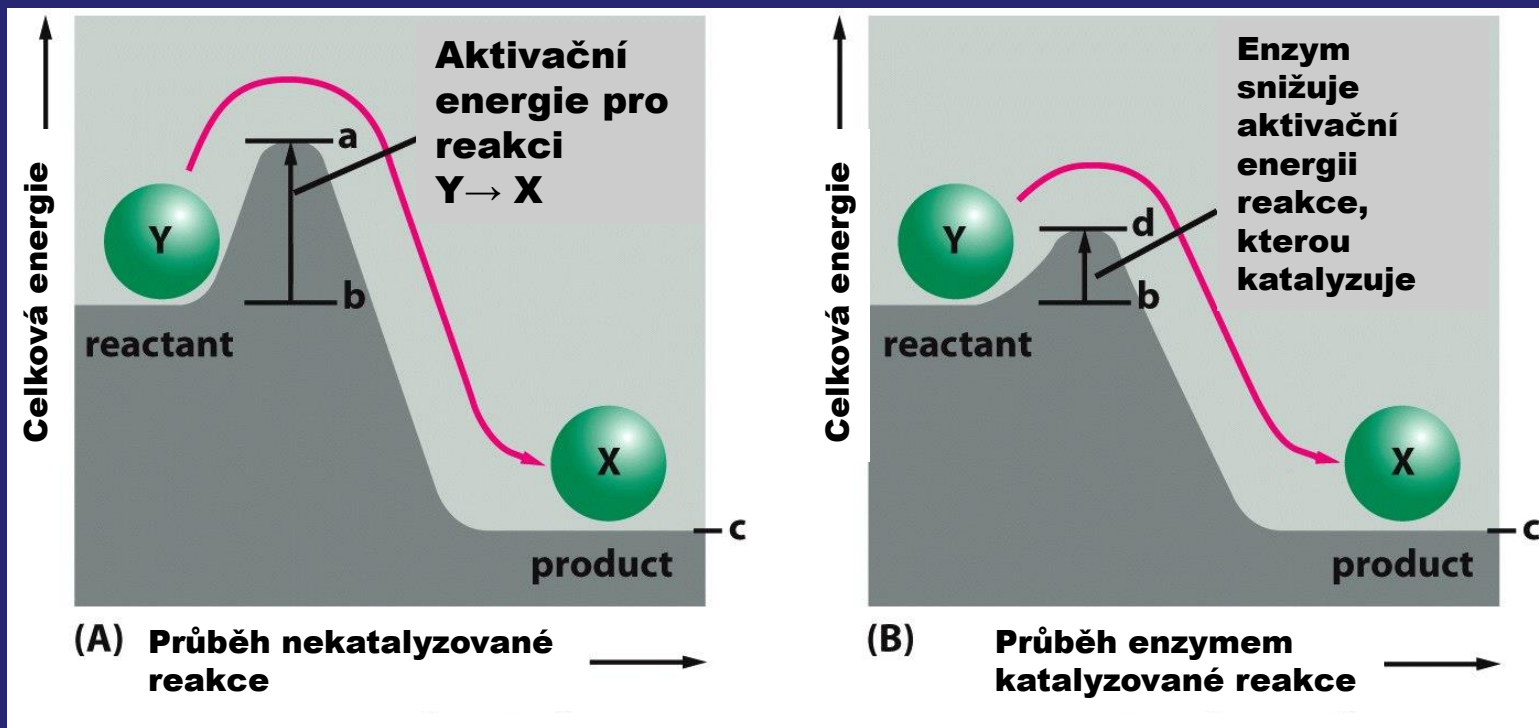


Každý enzym katalyzuje jednu určitou reakci a sám ji opouští nezměněn

## 2. Funkce enzymů

# Aktivační energie

Sloučenina Y je ve stabilním stavu. K její přeměně na sloučeninu X je potřeba dodat energii- tzv. **AKTIVAČNÍ ENERGII**



V živých buňkách pomáhají molekulám k překonání této energetické bariéry proteiny **ENZYMY = katalyzátory**.

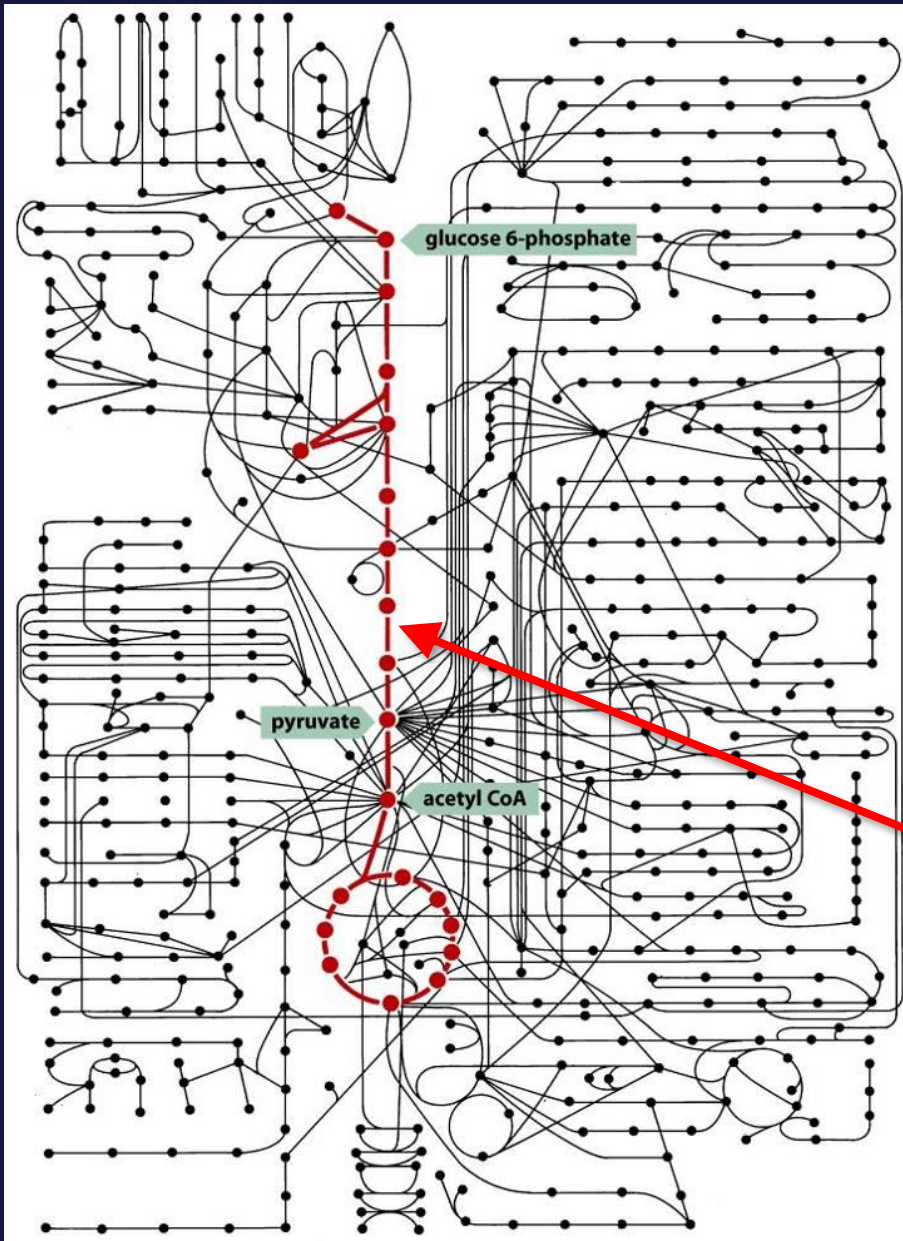


# Vlastnosti enzymů

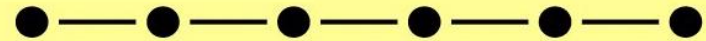
Buňka (resp. organismus) je schopna vytvářet mnoho typů enzymů s jedinečným aktivním místem jen pro určitý substrát → **enzymy jsou vysoce selektivní, katalyzují jen určitou reakci**

- ❖ Enzymy urychlují reakce až  $10^{14}$  krát
- ❖ Rychlá vazba substrátu na enzym (zlomek milisekundy)
- ❖ Umožňují, aby se reakce uskutečnila za normálních teplot

**Enzymy i substráty se nacházejí v buňce v nízkých koncentracích.** *Jedna molekula hojně se vyskytujícího substrátu (0,5mM) připadá na  $10^5$  molekul vody.*



## ZKRÁCENĚ

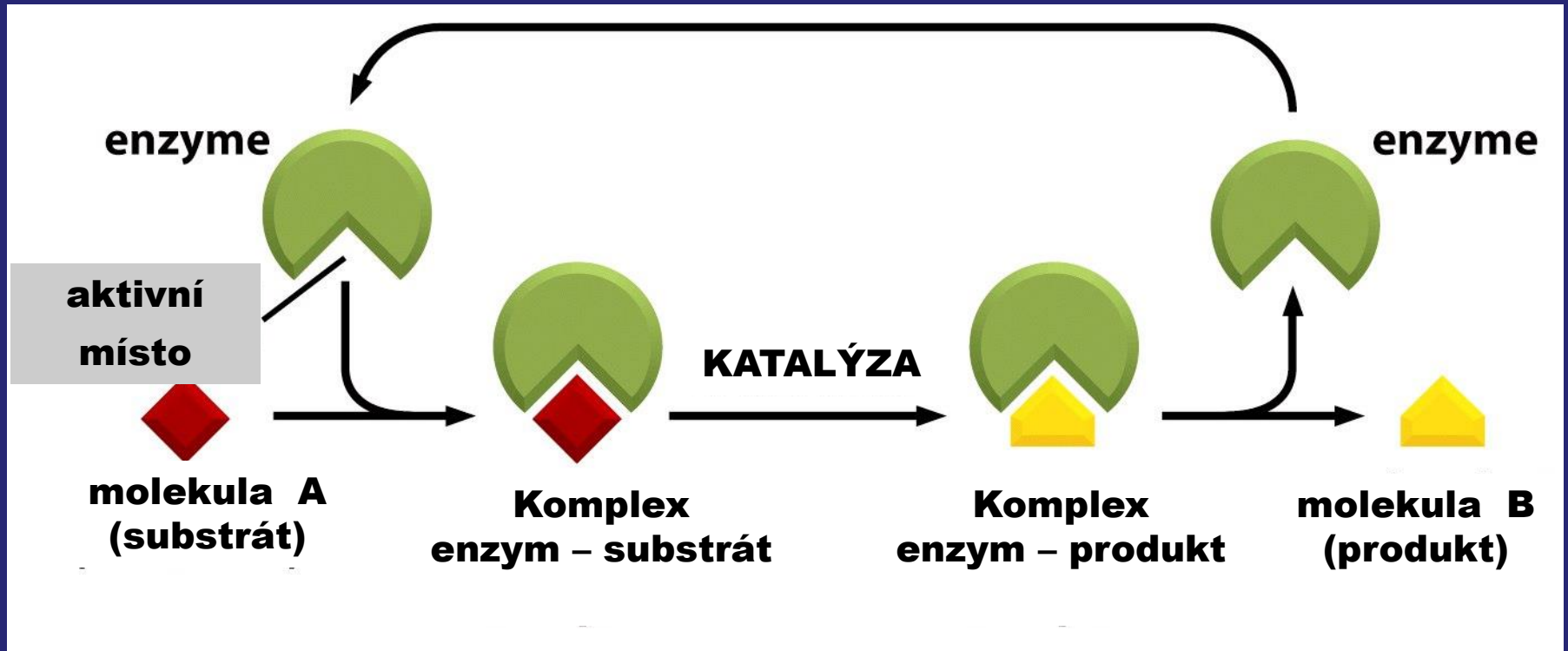


Metabolické dráhy a jejich vzájemná propojení v typické buňce.

Na schématu je cca 500 běžných metabolických reakcí. Černá tečka = jedna molekula

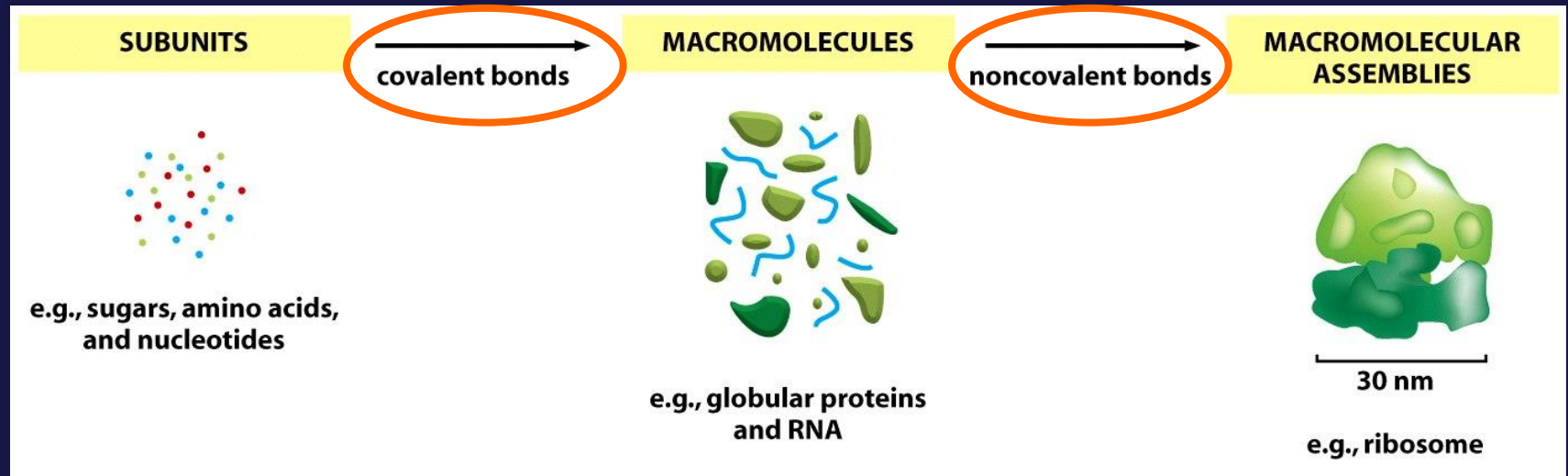
**Jedna konkrétní metabolická dráha**

# Jak enzymy pracují



- ❖ každý enzym má aktivní místo pro vazbu molekul(-y) substrátu
- ❖ vzniká komplex E-S , proběhne reakce a vznikne komplex E-P
- ❖ produkt se uvolní a enzym může vázat další molekuly substrátu

# Kovalentní a nekovalentní vazba



Kovalentní vazba je pevnější než vazba nekovalentní

# *Enzymy = urychlovače nikoli spouštěče*

Enzymy mohou sice reakci urychlit, ale nemohou spustit reakci, která je pro buňku energeticky nevýhodná (*např. tečení vody do kopce*)

Enzymy mohou pouze obstarávat spřažení energeticky výhodných reakcí s energeticky nevýhodnými.



**Co je to energeticky výhodná reakce ??**

### 3. Energeticky výhodné reakce, volná energie

# Samovolnost

**ENERGETICKY VÝHODNÁ REAKCE** je taková, která může probíhat samovolně → tj. vzrůstá při ní **neuspořádanost vesmíru** (systému).

Měřítka vzrůstu neuspořádanosti =  
= **VOLNÁ ENERGIE SYSTÉMU ( $\Delta G$ ).**

# *Dva typy reakcí*

**ENERGETICKY VÝHODNÁ REAKCE** je taková, při níž se snižuje volná energie soustavy = **mají negativní  $\Delta G$ .** (vzrůstá entropie)

**ENERGETICKY NEVÝHODNÁ REAKCE** je taková, při níž se zvyšuje volná energie soustavy = **mají kladnou  $\Delta G$ .** (klesá entropie)

Proto musí **BÝT SPŘAŽENÁ** s energeticky výhodnou reakcí ( $\Delta G$  se sčítají a výsledná hodnota musí být negativní).



# Spřažené reakce

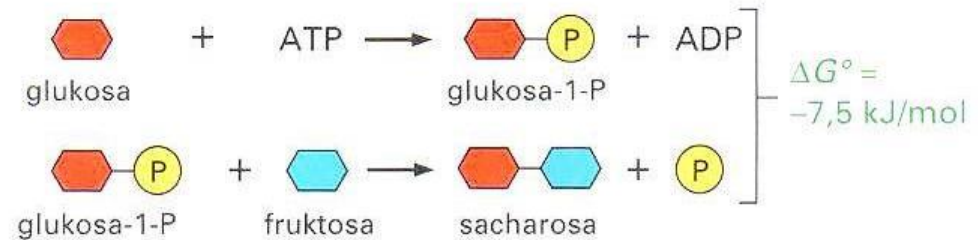
Lze spřáhnout dvě reakce, pokud sdílejí alespoň jeden společný intermediát („mezičlen“)

## JEDNODUCHÁ REAKCE



ČISTÝ VÝSLEDEK: reakce neproběhne

## SPŘAŽENÁ REAKCE

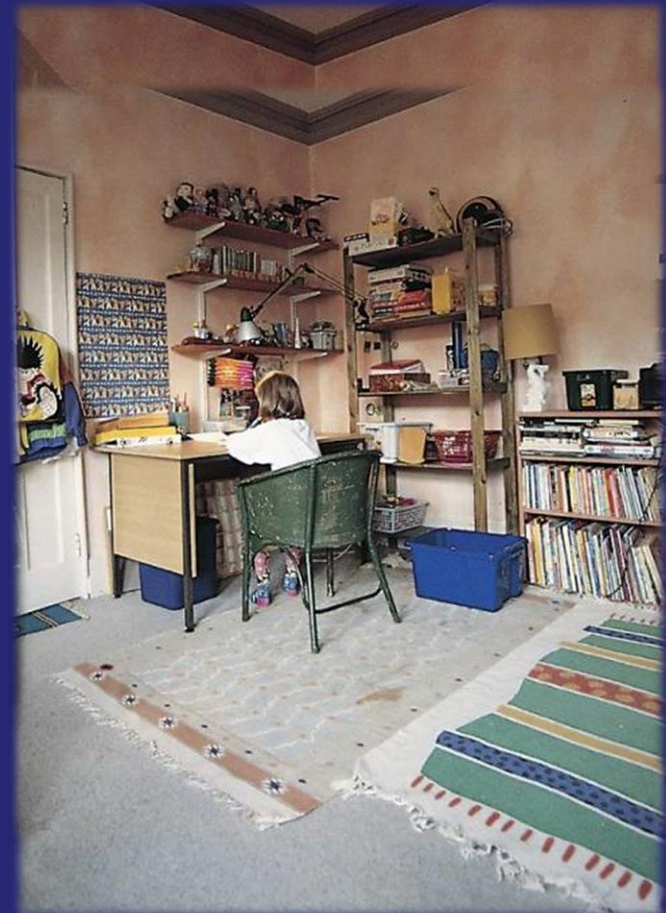


ČISTÝ VÝSLEDEK: sacharosa se vytvoří v reakci poháněné hydrolýzou ATP

# Zvítězí chaos?

Podle **DRUHÉ VĚTY TERMODYNAMICKÉ** je ve vesmíru i v jakékoliv izolované soustavě přirozené, že postupně dochází ke zvyšování neuspořádanosti = **ENTROPII**.

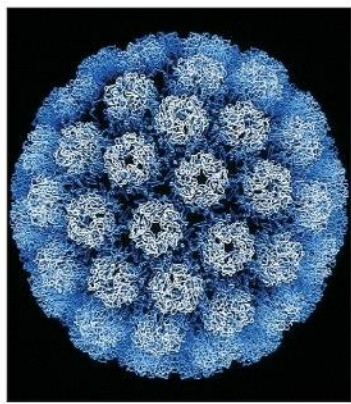
*Pohyb k větší neuspořádanosti je samovolný děj (energeticky výhodná reakce), zatímco obrácení tohoto děje vyžaduje opakované úsilí = dodání energie (energeticky nevýhodná reakce).*



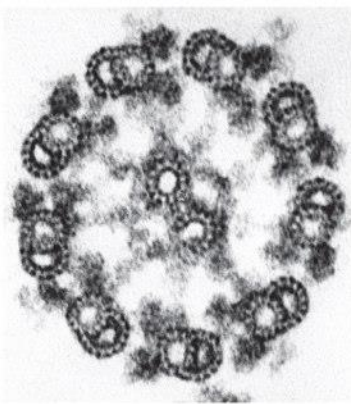
To, co není živé spěje do stavu chaosu, rozpadá se.

Biologické struktury jsou naopak vysoce uspořádané a to na všech svých úrovních.

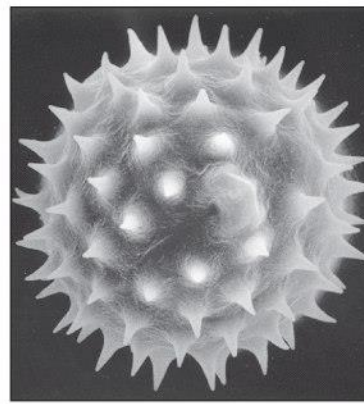
To je možné jedině díky tomu, že **buňka získává energii z okolí a převádí ji na formu, kterou je schopna využívat** k neustálému vytváření biologického pořádku (k uspořádanosti struktur).



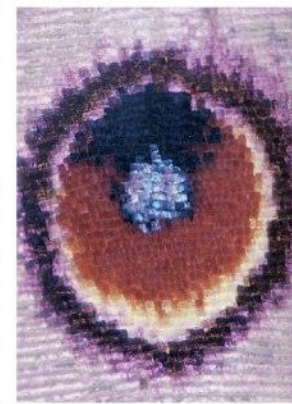
(A)



(B)



(C)



(D)

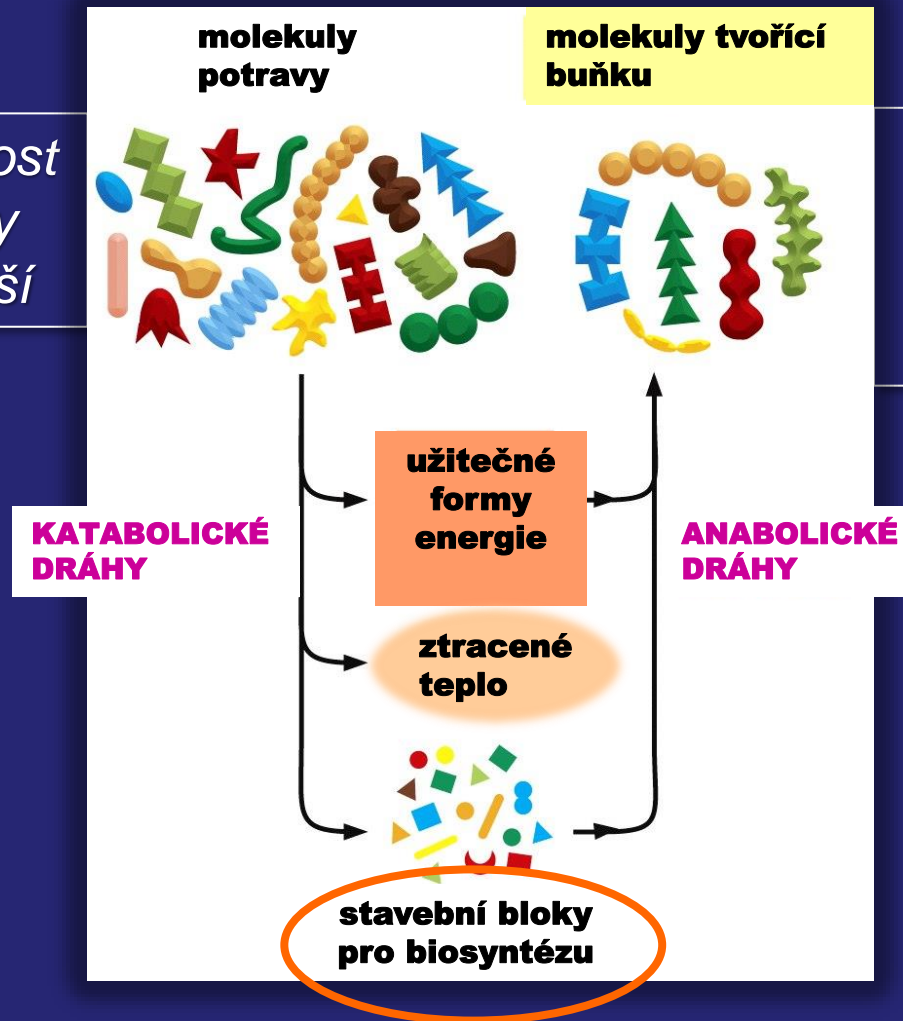


(E)

# Energie je uložena v chemických vazbách molekul potravy. Většina se rozptýlí jako teplo...

*...proto hmotnost molekul potravy je mnohem větší*

*...než hmotnost molekul vytvořených při anabolických dějích*



# PORUŠUJÍ tedy biologické struktury DRUHOU VĚTU TERMODYNAMIKY?

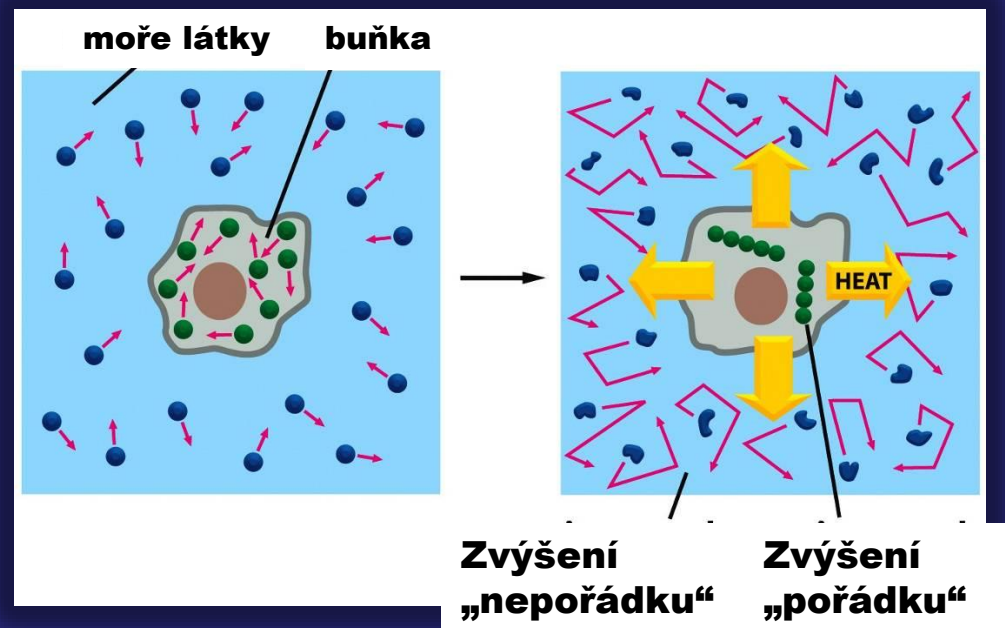
**NE !**

Celková entropie **BUŇKY + OKOLÍ** se nemění, i když v buňce  
**VZRŮSTÁ USPOŘÁDANOST**

**PROČ?**

V průběhu chemických reakcí vedoucích k vyšší uspořádanosti buňky, se část energie **mění v teplo**. Toto teplo uniká do okolí buňky a zvyšuje zde neuspořádanost (entropii).

*= vyšší tepelný pohyb molekul*



# Druhá věta termodynamická

Energie může přecházet z jedné formy do jiné, nelze ji vytvořit ani zničit

## Jaké jsou formy energie?

- ❖ Energie kinetická
- ❖ Energie chemických vazeb
- ❖ Elektromagnetická (světelná)
- ❖ Tepelná energie

*Výsledkem chemických reakcí uvnitř buňky je změna různých forem energie.*

Velmi často to je

**TEPELNÁ ENERGIE**



*Aby buňka měla užitek z tepla, které se při reakcích uvolňuje, **musí spřáhnout děje** při nichž dochází k produkci tepla **s dalšími ději**, které vedou k růstu „uspořádanosti“*

# Živočichové a rostliny

**Všichni živočichové** využívají **energii** uloženou v **chemických vazbách molekul**, které byly vytvořeny jinými organismy, jež požírají (uvolňuje se **oxidací**).

**Potřebné atomy** pro stavbu svého těla získávají z potravy (živočichové, rostliny) a

**Rostliny** (a fotosyntetizující bakterie) zachycují a využívají energii slunečního záření v procesu **fotosyntézy**.

**Potřebné atomy** pro stavbu těla získávají z anorganických zdrojů (atmosféra, půda)



**Nějak se nám  
vytrátily houby**

**Ale taky bakterie  
či viry**



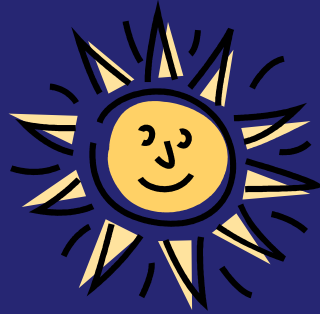


# Dva nejdůležitější a vzájemně se doplňující děje pro existenci života

## Fotosyntéza



Energie



Uskladněna do chemických vazeb přenašečových molekul (ATP, NADPH)

Uvolňuje se plynný  $O_2$

Energie v nich uložená pohání proces **fixace uhlíku**: z  $CO_2 + H_2O$  vznikají jednoduché cukry.

## Respirace (dýchání)



Energie se získává oxidací organického produktu.

Spotřebovává se plynný  $O_2$  a jednoduché cukry.

Vzniká **ENERGIE** +  $CO_2 + H_2O$

Energeticky nejstabilnější forma C a H

# Fotosyntéza X Respirace

## Fotosyntéza

## Respirace

ENERGIE

spotřebována

získána

$O_2$

uvolňován

spotřebován

$CO_2 + H_2O$

vstupuje do  
reakce

vystupuje z  
reakce

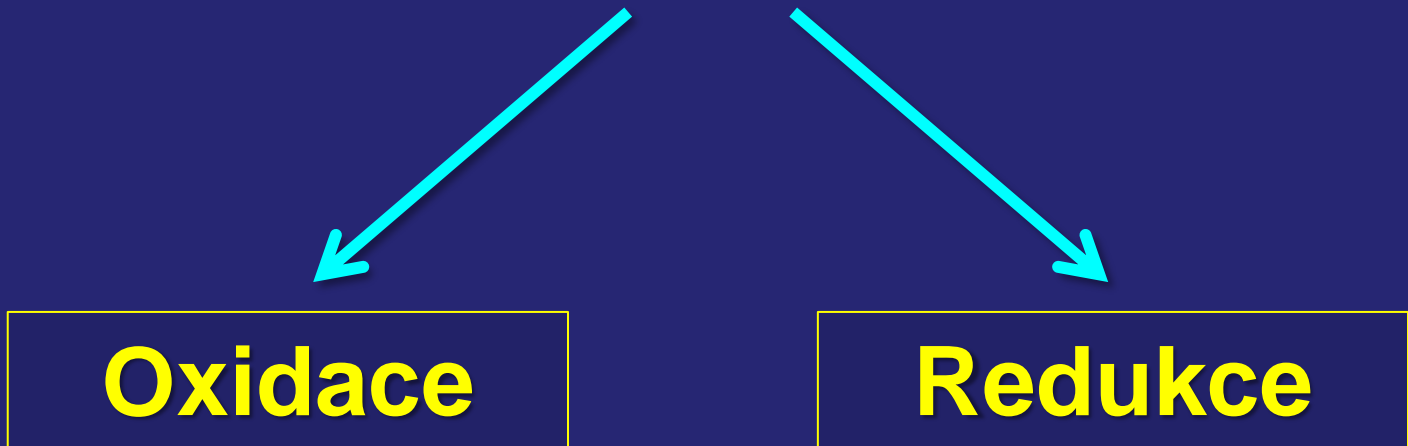
CUKRY

získány

spotřebovány

# *Oxidoredukční děje*

Během respiračních a fotosyntetických dějů dochází k oxidoredukčním dějům

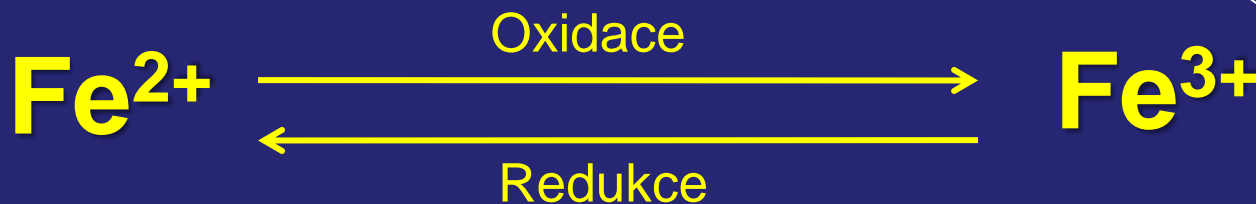


**...při nichž dochází k přenosu elektronů**

# Oxidace

Je tak označovaná každá reakce, kdy jsou **odstraňovány elektrony z atomu (zmenšuje se jejich počet!)**

*Nemusí se jednat pouze o adici atomů kyslíku*



# Redukce

Je tak označovaná každá reakce, kdy jsou **přidány elektrony do atomu (zvyšuje se jejich počet!)**

Elektrony mají záporný náboj !!

## 4. Regulace enzymové aktivity

# *Jak buňka reguluje aktivitu enzymů?*

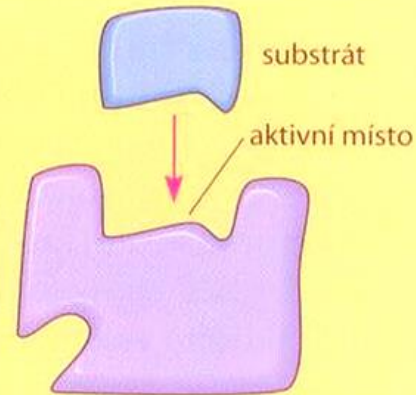
## Typy regulací

- ❖ Kompetitivní a nekompetitivní (allosterická) inhibice
- ❖ Zpětnovazebná inhibice
- ❖ Kooperace
- ❖ Lokalizace enzymů
- ❖ Regulace genové exprese – *bude probráno v molekulární biologii*

# Kompetitivní a nekompetitivní inhibice

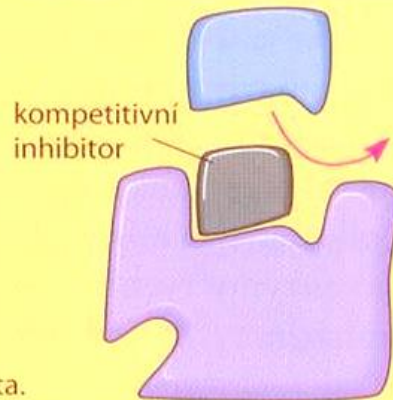
## Bez inhibice

(a) Substrát se může normálně navázat do aktivního místa enzymu.



## Vazba inhibitoru do aktivního místa substrátu

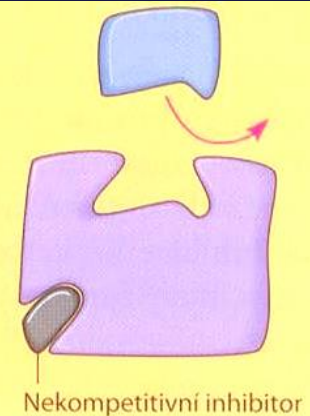
(b) Kompetitivní inhibitor napodobuje substrát a váže se do aktivního místa.



**KOMPETITIVNÍ INHIBICE**

## Vazba inhibitoru jinač – změna konformace enzymu

(c) Nekompetitivní inhibitor se naváže na enzym v jiném místě než aktivním, ale změní konformaci enzymu, takže aktivní místo již není plně funkční.



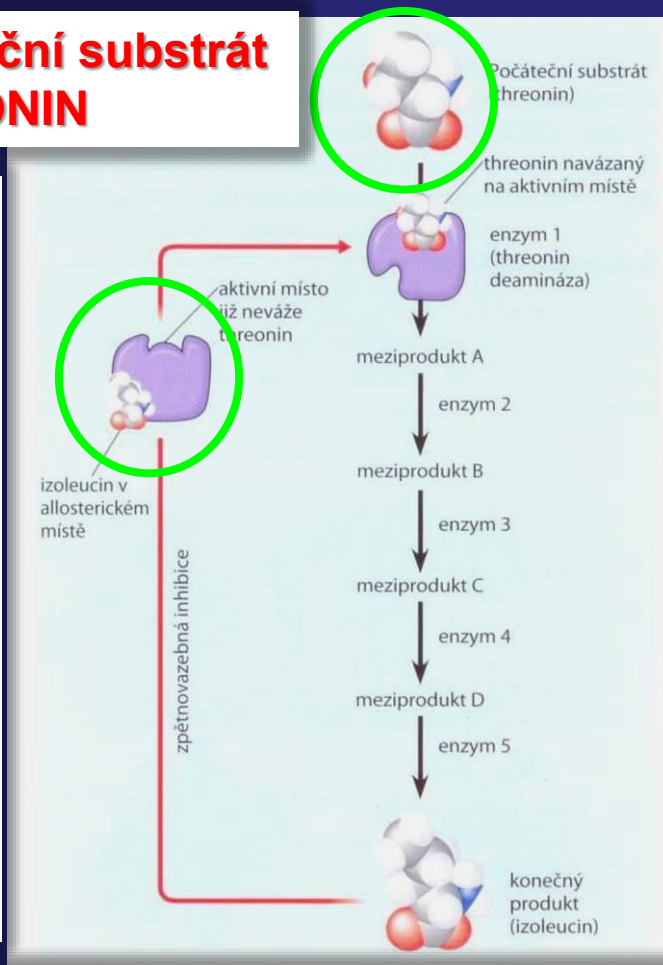
**NEKOMPETITIVNÍ (ALLOSTERICKÁ) INHIBICE**

# Zpětnovazebná inhibice

Zpětná vazba (negativní zpětná vazba, biofeedback)

Počáteční substrát  
**THREONIN**

**ZPĚTNOVAZEBNÁ INHIBICE**



**Konečný produkt - IZOLEUCIN**

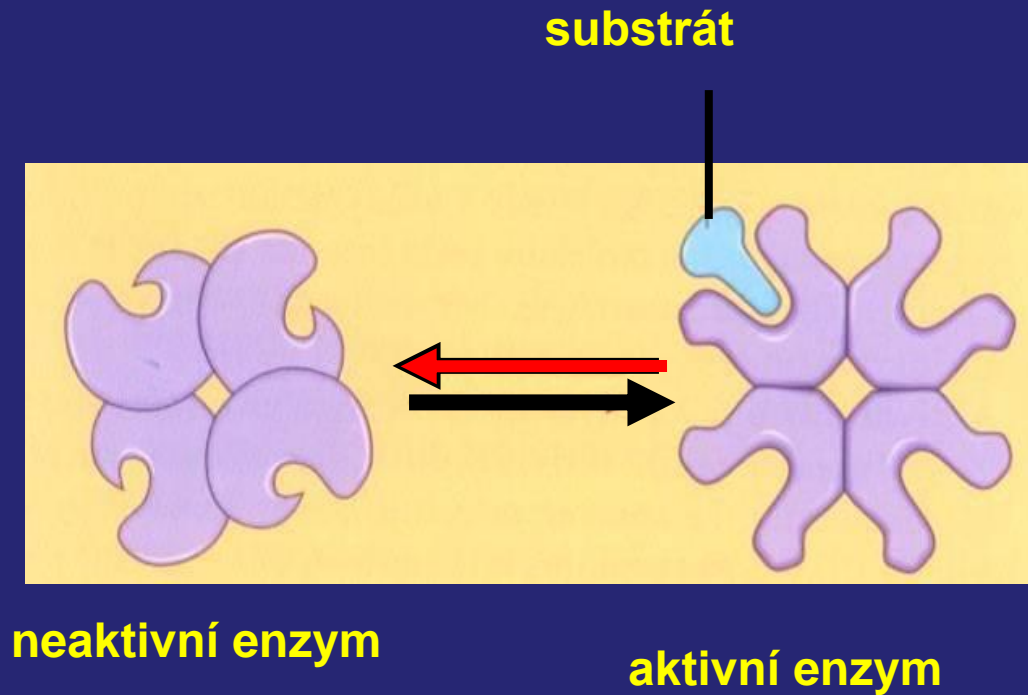
Metabolická dráha je inhibována svým vlastním produktem, který se naváže na enzym a tím zablokuje danou metabolickou dráhu.

Izoleucin se naváže do allosterického místa enzymu a tím zabrání vazbě počátečního substrátu navázat se do aktivního místa.



# Kooperace

Molekuly substrátu mohou stimulovat aktivitu enzymu



Vazba molekuly substrátu k aktivnímu místu jedné z podjednotek enzymu způsobí přechod ostatních podjednotek do aktivní konformace

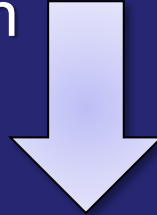
# LOKALIZACE ENZYMŮ uvnitř buňky usnadňuje regulaci metabolismu

- ❖ **Prostorová separace metabolických drah** díky buněčné kompartmentalizaci (buněčné organely a jiné membránové struktury).  
*Reakce soustředěna na konkrétní místo v buňce.  
Oddělena od jiných – i protichůdných reakcí.*
- ❖ Některé enzymy a multienzymové komplexy jsou **pevně zabudovány do membrán**, jiné jsou **uzavřeny uvnitř organel**...každá organela má vlastní chemické prostředí (lysozomy, mitochondrie,...)
- ❖ **Uspořádání enzymů do multienzymových komplexů** zajišťuje správný sled reakcí.

## 5. Aktivované přenašečové molekuly

# Základní koncept

Organismus hojně využívá spřažení reakcí energeticky výhodných a nevýhodných



Nezbytnost přechodně uskladnit energii

ve formě energie chemických vazeb

k tomu slouží **tzv. molekuly přenašečů**

- ❖ skladují energii v chemické vazbě fosfátové skupiny, ochotné k přenosu (**ATP**).
- ❖ skladují energii jako elektrony s vysokým obsahem energie (**NADH, NADPH**).

# *ATP (adenosin 5' - trifosfát)*

Nejvýznamnější aktivovaný přenašeč v buňce.

Je to pohodlná energetická „měna“. Používá se k „pohonu“ řady chemických reakcí.

**ATP vzniká z ADP přidáním fosfátové skupiny ve fosforylační reakci.**

Je to reakce energeticky nevýhodná, proto musí být spřažená s reakcí energeticky výhodnou (např. oxidace molekul potravy).

**Hydrolýza ATP na ADP je naopak energeticky výhodná**

a uvolňuje se při ní energie, která bývá využívána u reakcí energeticky nevýhodných (např. ke kondenzačním reakcím = spojení dvou molekul → vznik biopolymerů – DNA, polysacharidy, proteiny...)

# NADH/NADPH a FADH<sub>2</sub>

**NADH (NAD<sup>+</sup>)** – nikotinamid adenin dinukleotid  
**NADPH (NADP<sup>+</sup>)** – nikotinamid adenin dinukleotid fosfát

REDUKOVANÁ  
FORMA      OXIDOVANÁ  
FORMA

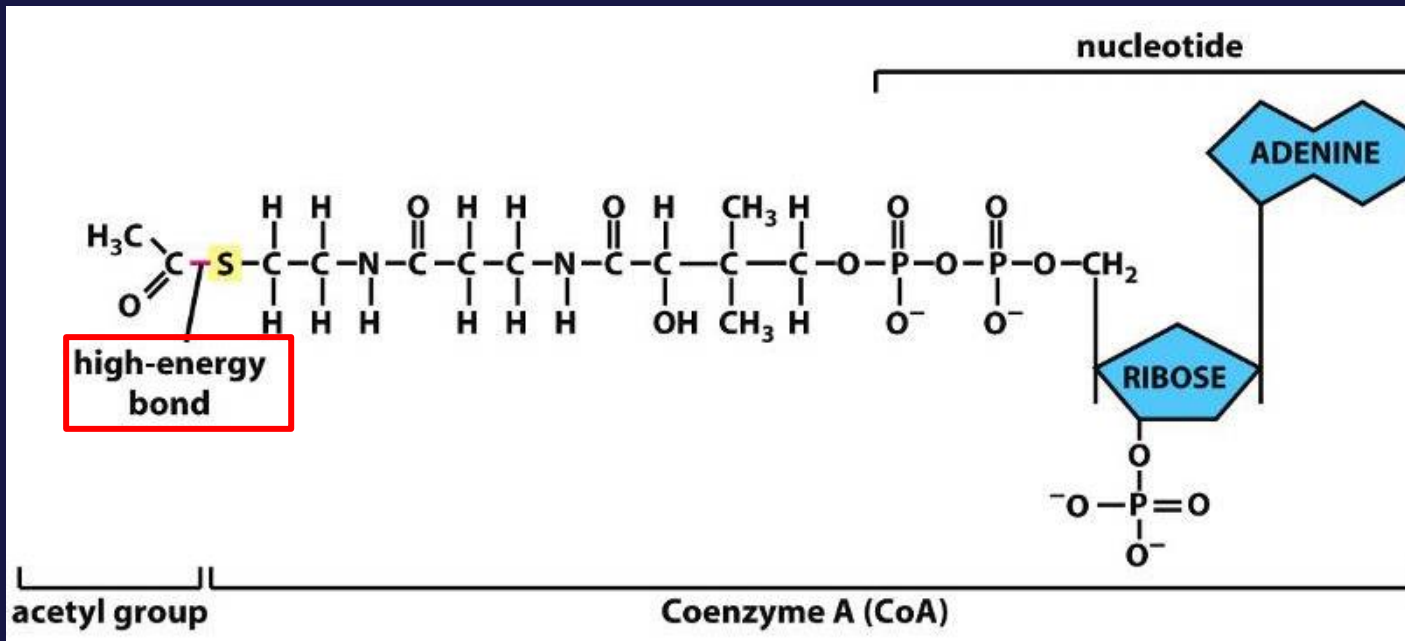
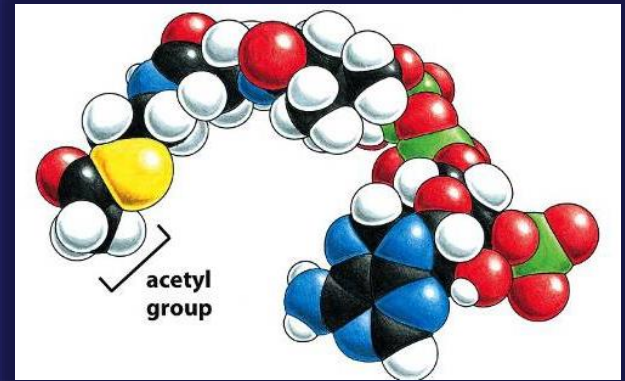
**FADH<sub>2</sub> (FAD)** – flavin adenin dinukleotid

Jedná se o přenašeče elektronů s vysokou energií a atomů vodíku.

V oxidačně-redukční reakci se **oxidovaná forma redukuje**, čímž molekula získává jeden vodíkový atom a jeden hydridový ion (proton a dva elektrony).

# Acetyl-CoA

Acetyl-CoA je molekula přenášející acetylovou skupinu s vysoce energetickou **THIOESTEROVOU VAZBOU**



**1. Princip získávání energie z potravy**

**2. Buněčná respirace**

**3. Fotosyntéza**



## 6. Princip získávání energie z potravy

# *Proč přísun energie?*

Živé organismy potřebují neustálý přísun energie, aby mohly udržovat **uspořádanost systému**  
(= děje energeticky náročné)

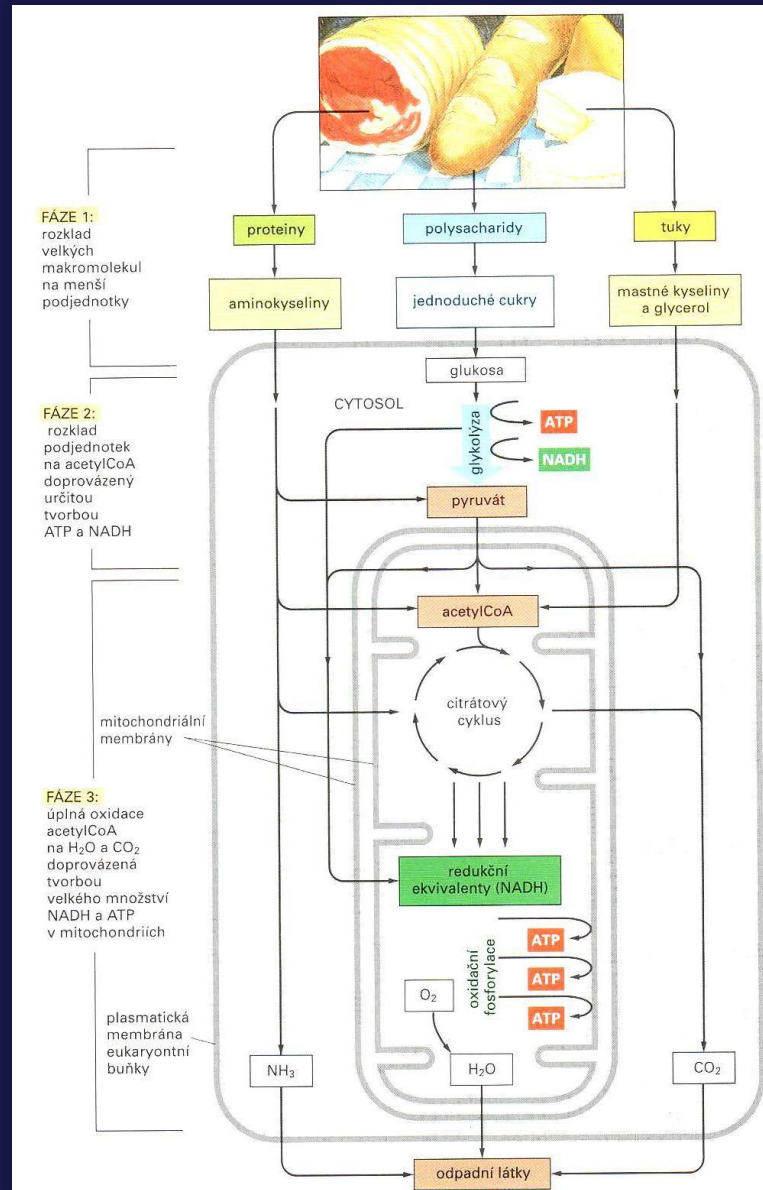
**Bez přísunu energie →**

→ **rozvrat organismu →**

→ **zvyšování entropie systému**

Energie je v chemických vazbách molekul potravy.  
Nejvýznamnější jsou cukry (škrob,...).  
Energie se uvolňuje **postupnou oxidací.**

# Fáze buněčného metabolismu



## Katabolické reakce

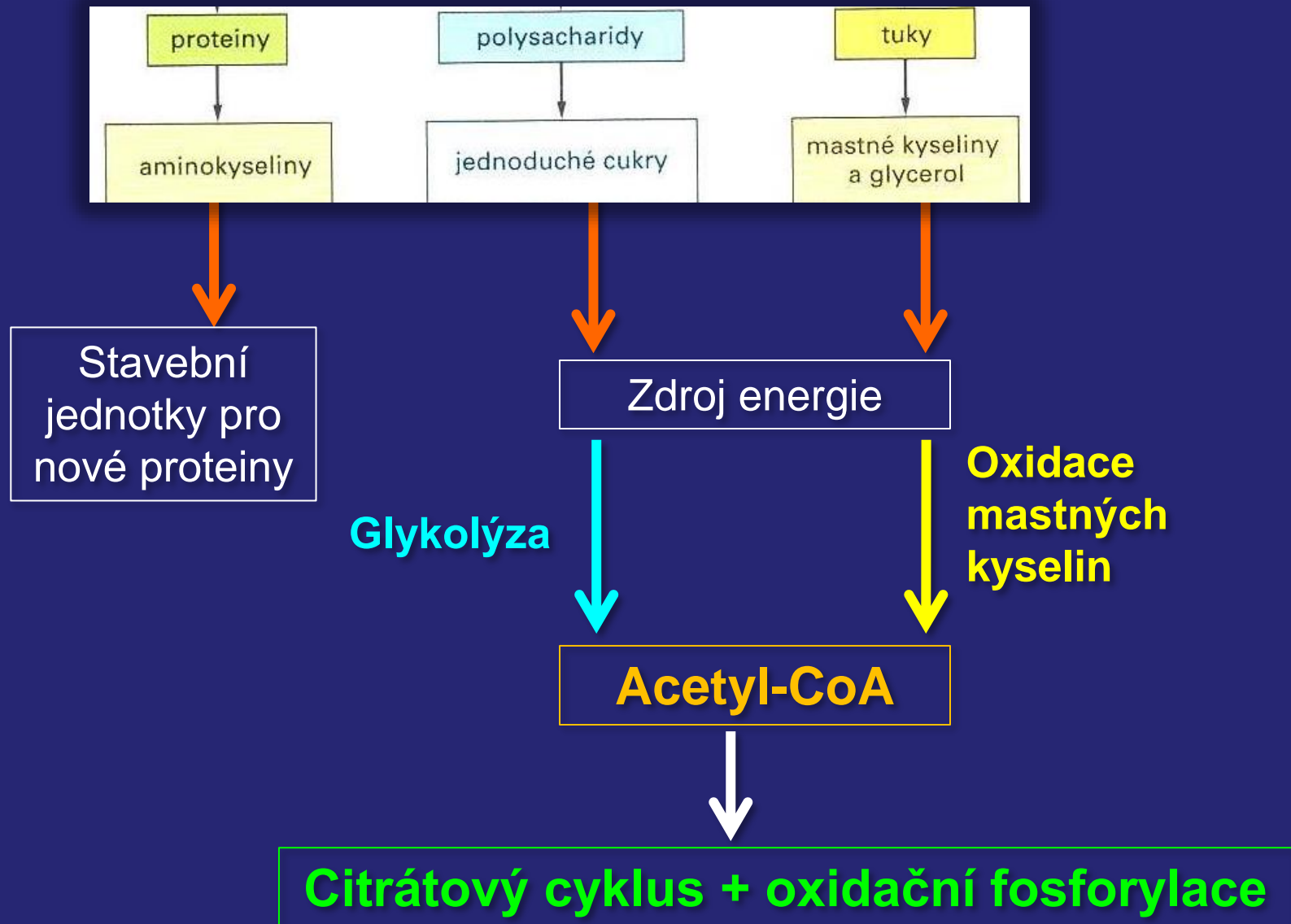
**Fáze 1** probíhá mimo buňku (v GITu)

**Fáze 2** probíhá v cytosolu buňky

**Fáze 3** probíhá v mitochondriích

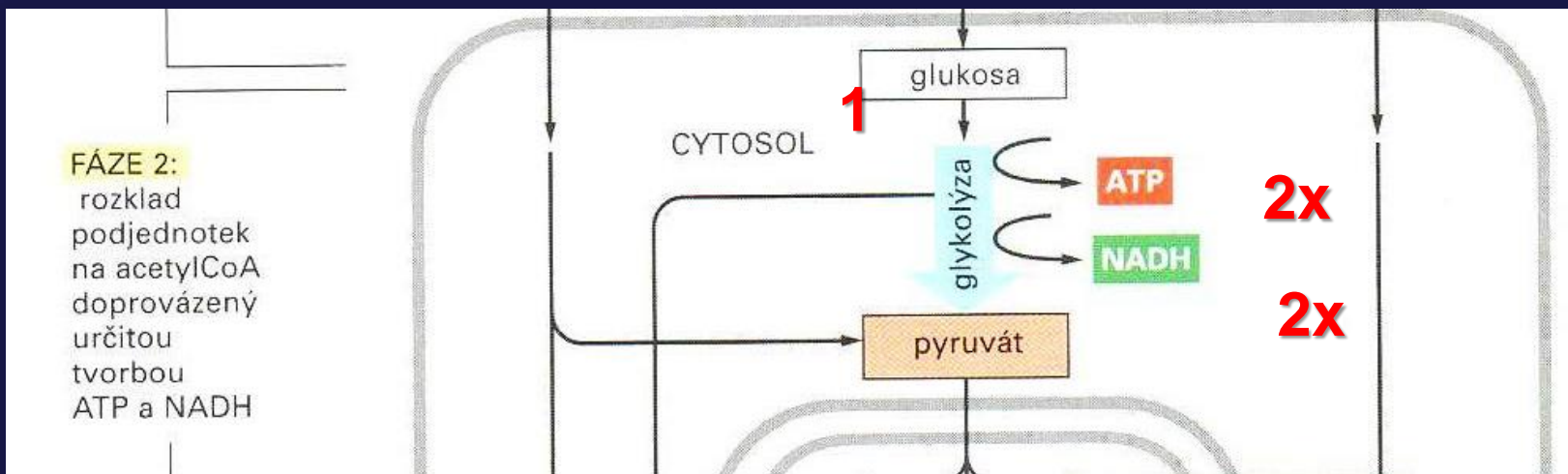
# Fáze 1- trávení (střevo, lysozomy)

Působením enzymů se velké polymerní molekuly odbourávají na menší podjednotky.



## Fáze 2 – glykolýza (cytosol všech buněk)

Probíhá bez účasti  $O_2$



**1** molekula glukózy se přeměňuje na **2** molekuly pyruvátu\*  
(2 x3 uhlíky).

**ČISTÝ ZISK GLYKOLÝZY**  
2 ATP a 2 NADH

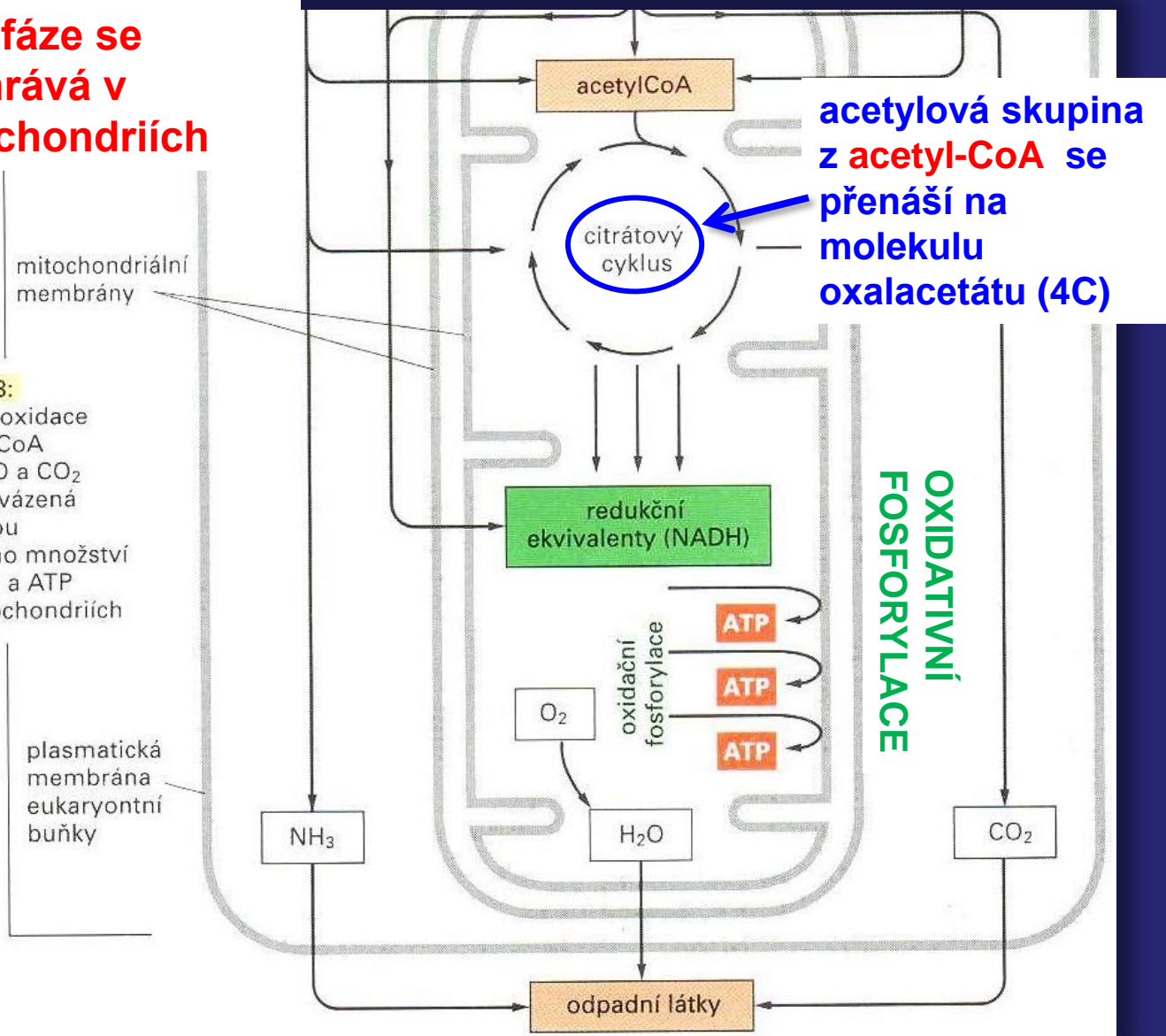
\*kyselina pyrohroznová

# Fáze 3 - citrátový cyklus + oxidativní fosforylace

**Tato fáze se odehrává v mitochondriích**

**FÁZE 3:**  
úplná oxidace acetylCoA na H<sub>2</sub>O a CO<sub>2</sub> doprovázená tvorbou velkého množství NADH a ATP v mitochondriích

plasmatická membrána eukaryontní buňky



# Glykolýza

Anaerobně **FERMENTACE**

**1** molekula glukózy  $\Rightarrow$  **2** molekuly pyruvátu

\* ethanolu a  $\text{CO}_2$

**Citrátový cyklus**  
**Cyklus kyseliny citrónové**  
**Krebsův cyklus**

\*laktátu

Z **2** molekul pyruvátu vznikají **2** molekuly acetyl-koA +  $\text{CO}_2$  za katalýzy pyruvát-dehydrogenázovým systémem

**Jednou otočkou cyklu** (z 1 molekuly acetyl-CoA) vzniká:

**3 x NADH**

**1 x  $\text{FADH}_2$**

**1 x GTP**

**2 x  $\text{CO}_2$**

# Citrátový cyklus

Cyklus kyseliny citrónové  
Krebsův cyklus

Jednou otočkou cyklu (z  
1 molekuly acetyl-CoA) vzniká :

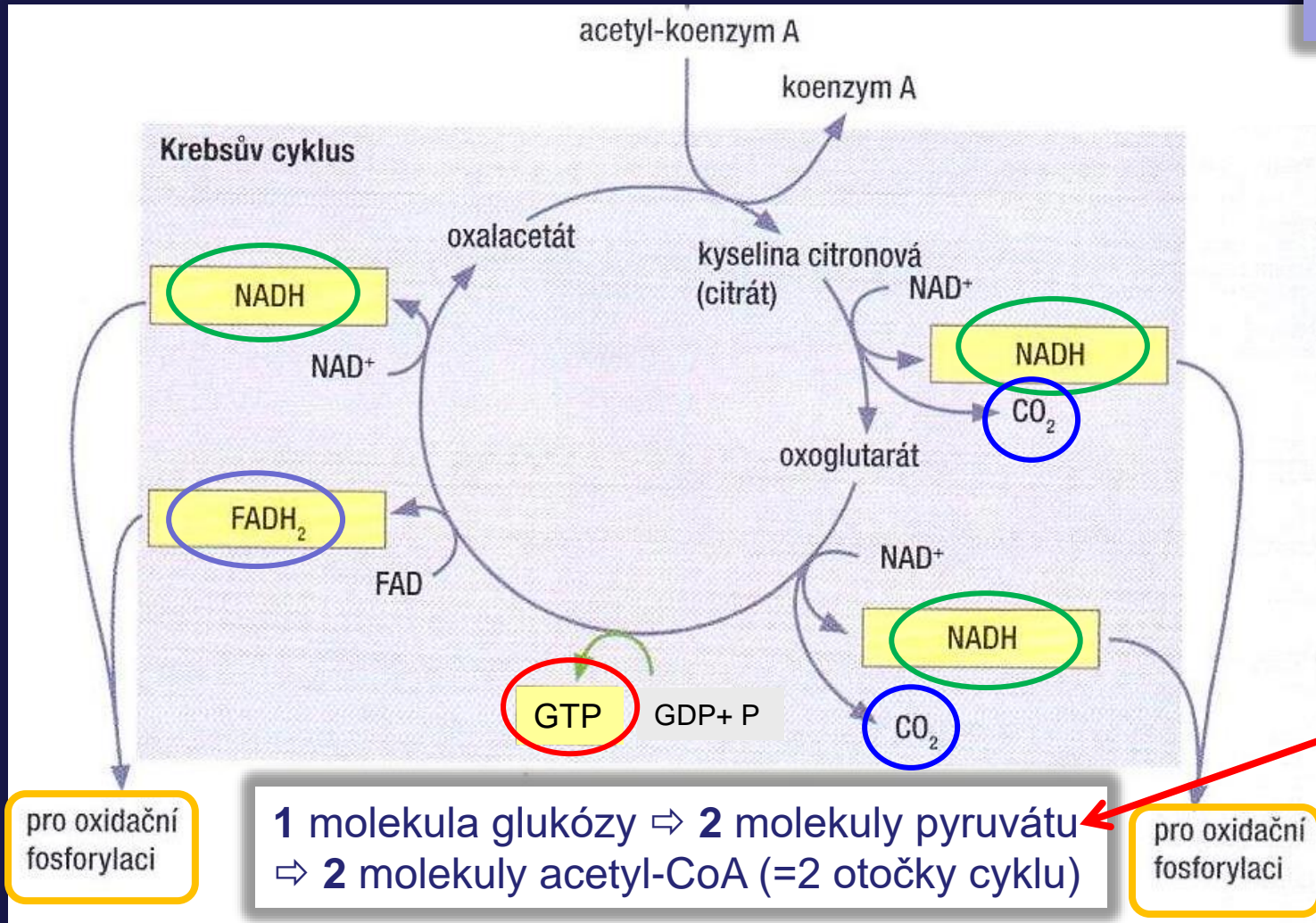
3 x NADH

1 x FADH<sub>2</sub>

1 x GTP

2 x CO<sub>2</sub>

Z pyruvátu vzniká acetyl-kOA +  
CO<sub>2</sub> za katalýzy pyruvát-  
dehydrogenázovým systémem





## ZA AEROBNÍCH PODMÍNEK

GLU → glykolýza → vznik pyruvátu (*cytosol*) →  
přeměna pyruvátu na acetyl-CoA + CO<sub>2</sub> za katalýzy  
komplexem tří enzymů = pyruvát-dehydrogenázový  
komplex (*mitochondriální matrix*) → cyklus kyseliny  
citrónové (*mitochondriální matrix*) → oxidativní  
fosforylace (*vnitřní mitochondriální membrána*)  
→ úplná oxidace na CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O

## ZA ANAEROBNÍCH PODMÍNEK

GLU → glykolýza → vznik pyruvátu (*cytosol*) →  
fermentace

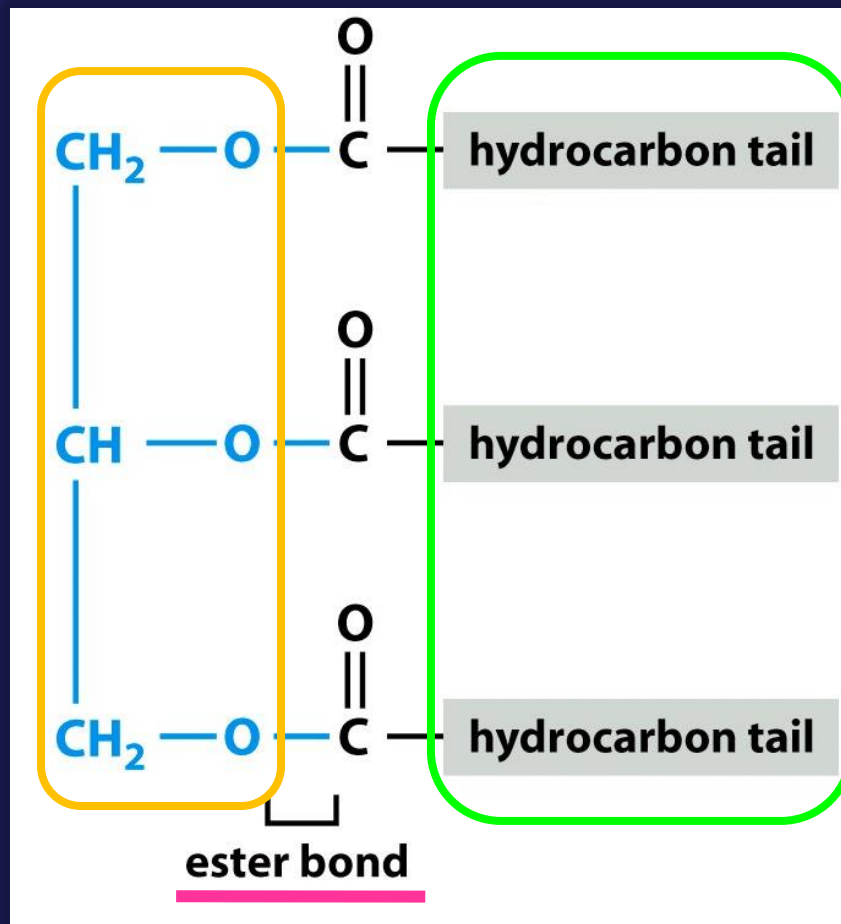
vedoucí ke vzniku ethanolu a CO<sub>2</sub>

Úplná absence O<sub>2</sub>

vedoucí ke vzniku laktátu

nedostatek O<sub>2</sub>

# Jak je to s tuky?

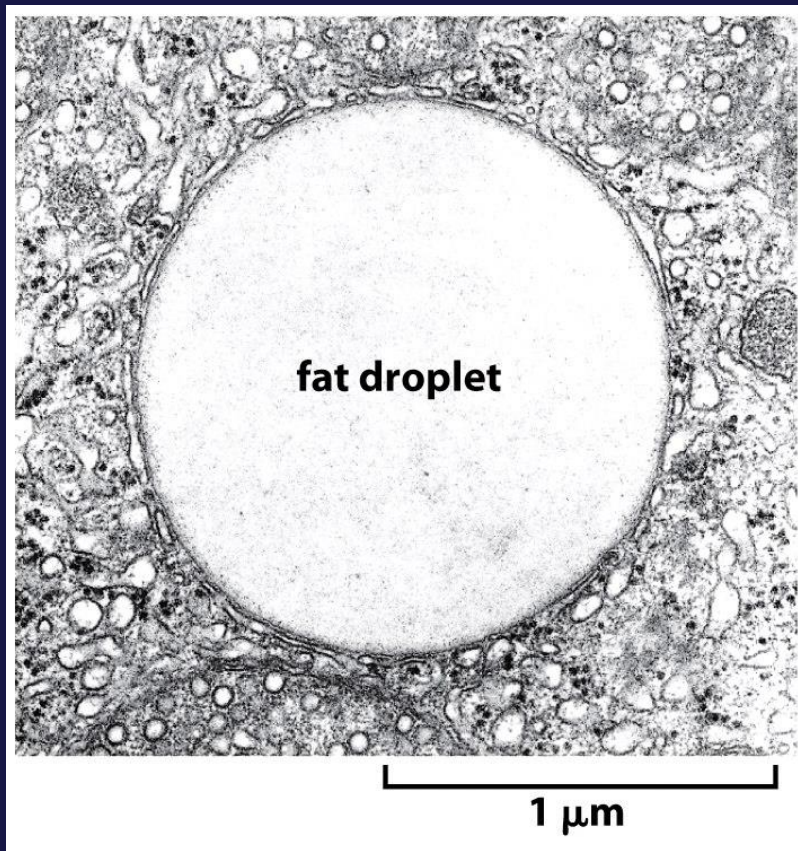


Po chemické stránce jsou tuky

## TRIACYGLYCEROLY

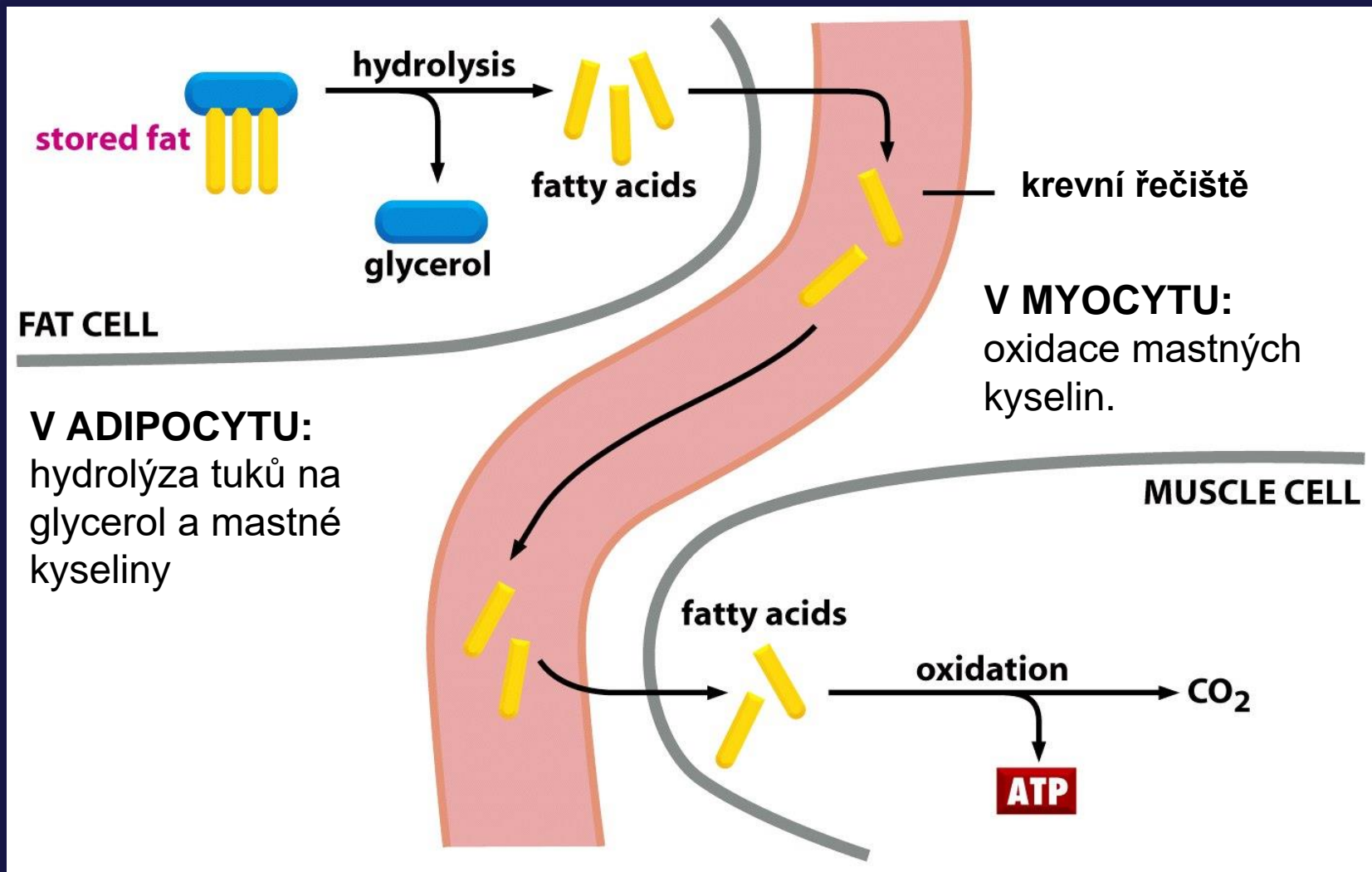
Mají glycerolovou část, ke které jsou esterovými vazbami připojeny tři mastné kyseliny

# *Jak je to s tuky?*



Tuky jsou nerozpustné ve vodě → **velké lipidové kapénky** ve specializovaných buňkách = **ADIPOCYTECH**

# Jak je to s tuky?



# ***$\beta$ -oxidace mastných kyselin na acetyl-CoA***

- ❖ je proces, při němž dochází k **postupné oxidaci mastných kyselin** (řetězec delší než 8 uhlíků) ....až na acetyl-CoA

mastná kyselina se změní acyl-CoA-synthetázou na sloučeninu acyl-CoA (náhrada OH skupiny za  $\sim$ S-CoA). Acyl-CoA prochází procesem beta-oxidace = dehydrogenace v  $\beta$ -poloze + adice vody

- ❖ Každá otáčka cyklu **zkracuje uhlíkový řetězec mastné kyseliny** o dva uhlíky a vytvoří se:
  - 1 x acetyl-CoA**
  - 1 x NADH**
  - 1 x FADH<sub>2</sub>**
- ❖ Acetyl-CoA vstupuje do citrátového cyklu (Krebsův cyklus)

# *Oxidativní fosforylace*

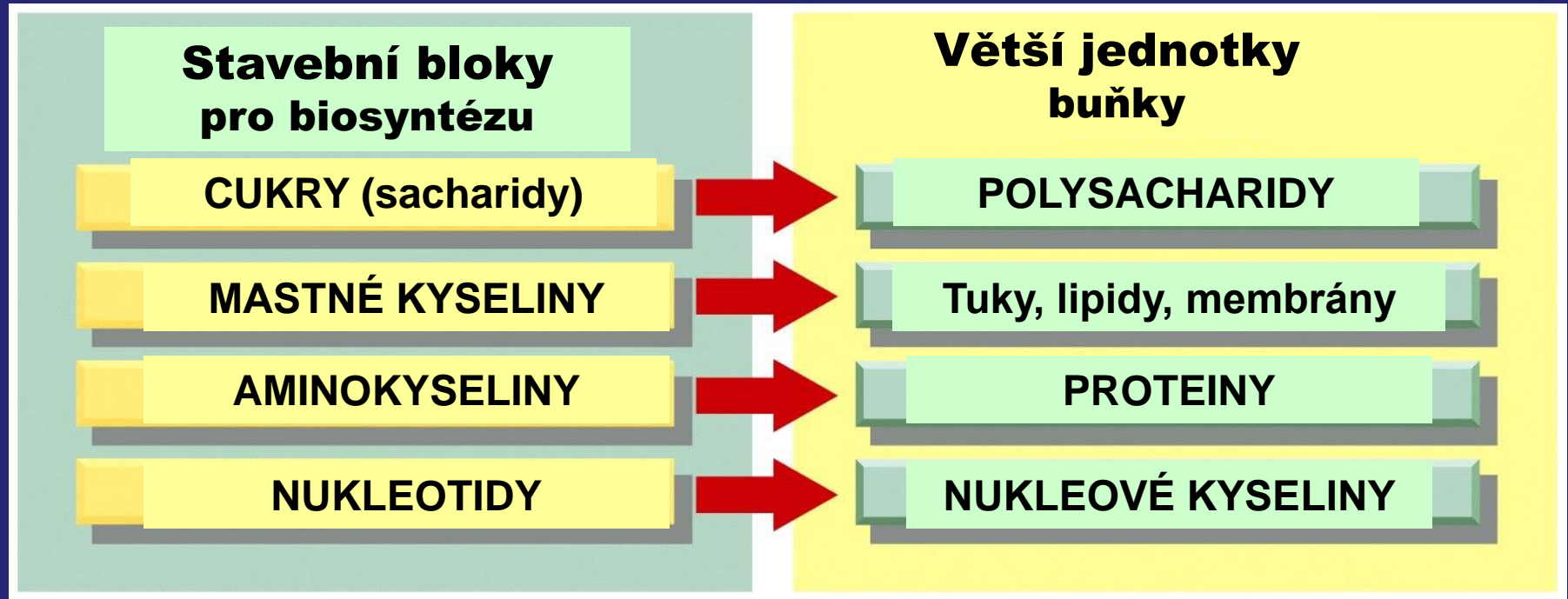
V poslední fázi odbourávání molekul potravy se uvolňuje největší část energie – v procesu zvaném **oxidační (oxidativní) fosforylace** (vnitřní mitochondriální membrána)

Úplná oxidace 1 molekuly glukózy na  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$  vede k zisku **30 molekul ATP**

Jen glykolýza (za anaerobních podmínek) pouze k zisku **2 molekul ATP**

# Syntéza makromolekul

**ENERGIE z potravy je využita pro syntézu makromolekul = biologických polymerů**



- ❖ jsou tvořeny z podjednotek - monomerů **KONDENZACÍ** (odstraňována je vody, resp. OH a H). **Vyžaduje přísun energie.**
- ❖ odbourávání polymerů se děje přidáním (adicí) vody-**HYDROLÝZOU**. Je to energeticky výhodná reakce.

# *Ukládání molekul potravy u živočichů*

Oxidací 1g tuku se uvolní asi 2,5x více energie než u 1g cukru.

Tuky – triacylglyceroly - tukové kapénky v tukových buňkách = **ADIPOCYTECH**.

Tuky hydrolyzují na triacylglycerol a mastné kyseliny. Ty se v „ $\beta$ -oxidaci“ odbourávají na acetyl-CoA a vstupují do Krebsova cyklu. **Člověk má v tucích zásobu energie cca na 1 měsíc.**

Cukry - glukózové jednotky spojené do polymeru **glykogenu** (polysacharid) do malých granulí umístěných v **CYTOPLAZMĚ BUNĚK (hl. svalových a jaterních)**.

Glykogen odbouráván na glukózo-1-fosfát, který vstupuje do glykolýzy. **Člověk má v glykogenu zásobu energie cca na 1 den.** *Větší zásoby glykogenu nemůže buňka vytvářet, protože na sebe váže velké množství vody.*



# *Ukládání molekul potravy u rostlin*

Při zvýšené fotosyntetické aktivitě za světla ukládají chloroplasty část vytvořených cukrů na **TUKY** a na **ŠKROB**.



Tuky – triacylglyceroly jako tukové kapénky

Cukry jako škrob (polymer glukózy, obdoba glykogenu)

**Obojí se ukládá v chloroplastech**

Velké zásoby vytváří rostlina pro embrya uvnitř semen

## 7. Buněčná respirace

# Vznik respirace

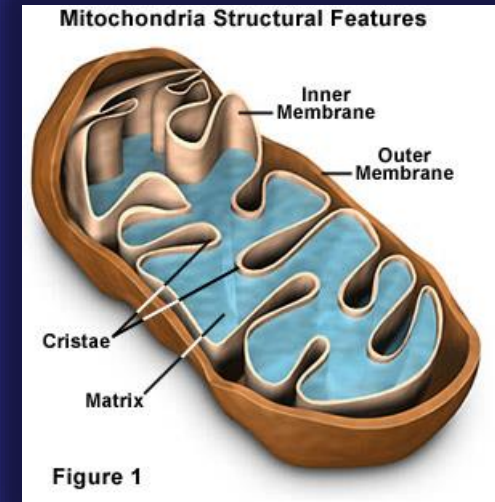
V počátku života na Zemi nebyl v atmosféře kyslík. Buňky získávaly energii (ATP) odbouráváním organických molekul v procesu anaerobní fermentace.

Později se vyvinul efektivnější **způsob získávání energie a tvorby ATP založený na transportu elektronů v membránách mitochondrií\***

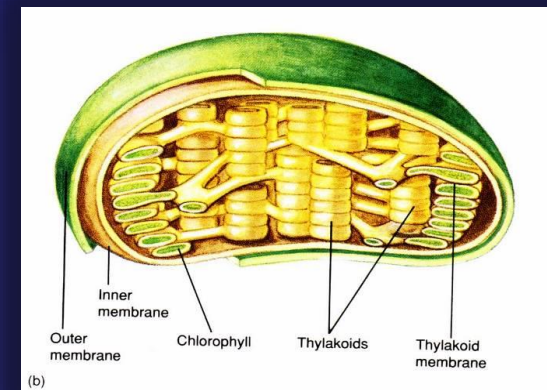
Tento princip využívají jak rostliny (fotosyntéza), tak i živočichové (buněčná respirace).

*\* U bakterií, které nemají mitochondrie probíhá transport elektronů a tvorba ATP v plazmatické membráně.*

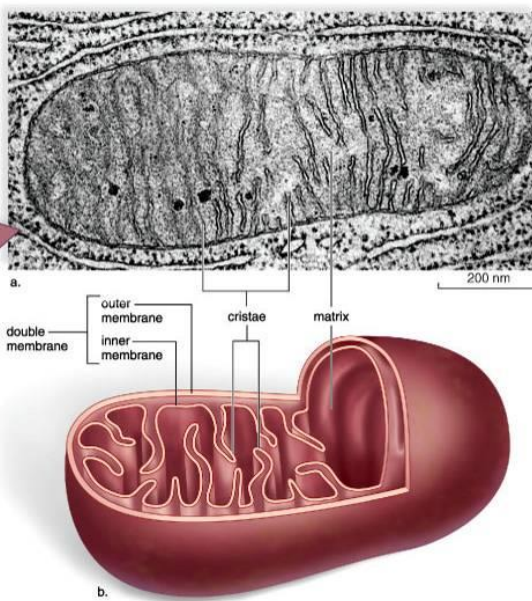
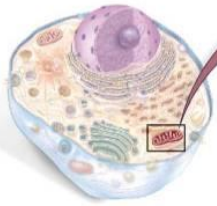
## Mitochondrie



## Chloroplast

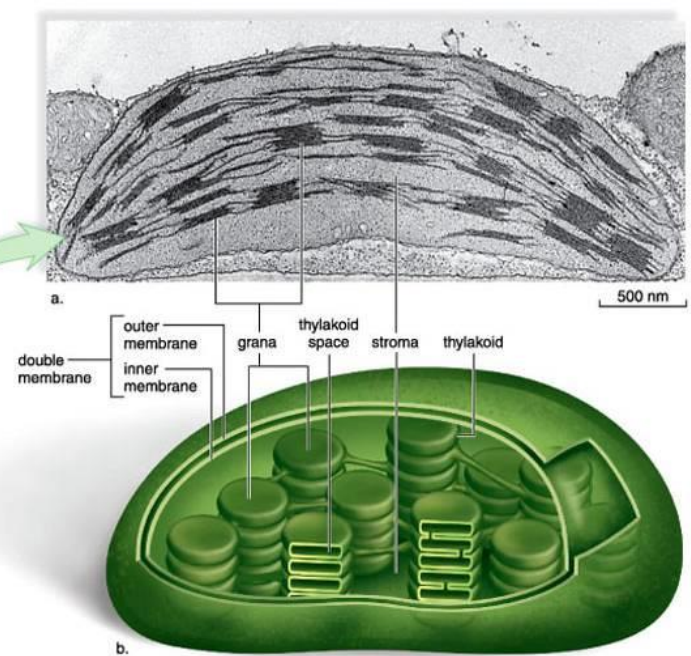


## Mitochondrie



Obě orgány mají v původ v bakteriích pohlcených dávnou eukaryontní buňkou. Vznikl tak výhodný symbiotický vztah.

Jak mitochondrie, tak chloroplasty mají vlastní genom i genetický aparát: DNA, RNA, ribozomy.



## Chloroplast

# *Transport elektronů v membránách a získávání energie*

**Fáze 1** (vytvoření elektrochemického gradientu)

**Fáze 2** (tvorba ATP)

# Vytvoření elektrochemického gradientu

- ❖ Elektrony s vysokým obsahem energie ve formě NADH a  $\text{FADH}_2$  (z glykolýzy, citrátového cyklu...) jsou přenášeny přenašeči **elektron-transportního řetězce** umístěném na vnitřní mitochondriální membráně.
- ❖ Při předávání elektronů z jednoho přenašeče na druhý se uvolňuje energie, která je použita pro přenos  $\text{H}^+$  iontů (z vody) do mezimembránového prostoru, kde vzrůstá jejich koncentrace a vytváří se tak **elektrochemický gradient  $\text{H}^+$** .
- ❖ Na konci **elektrontransportního řetězce** jsou elektrony předány molekulám kyslíku a vzniká voda.

# Tvorba ATP

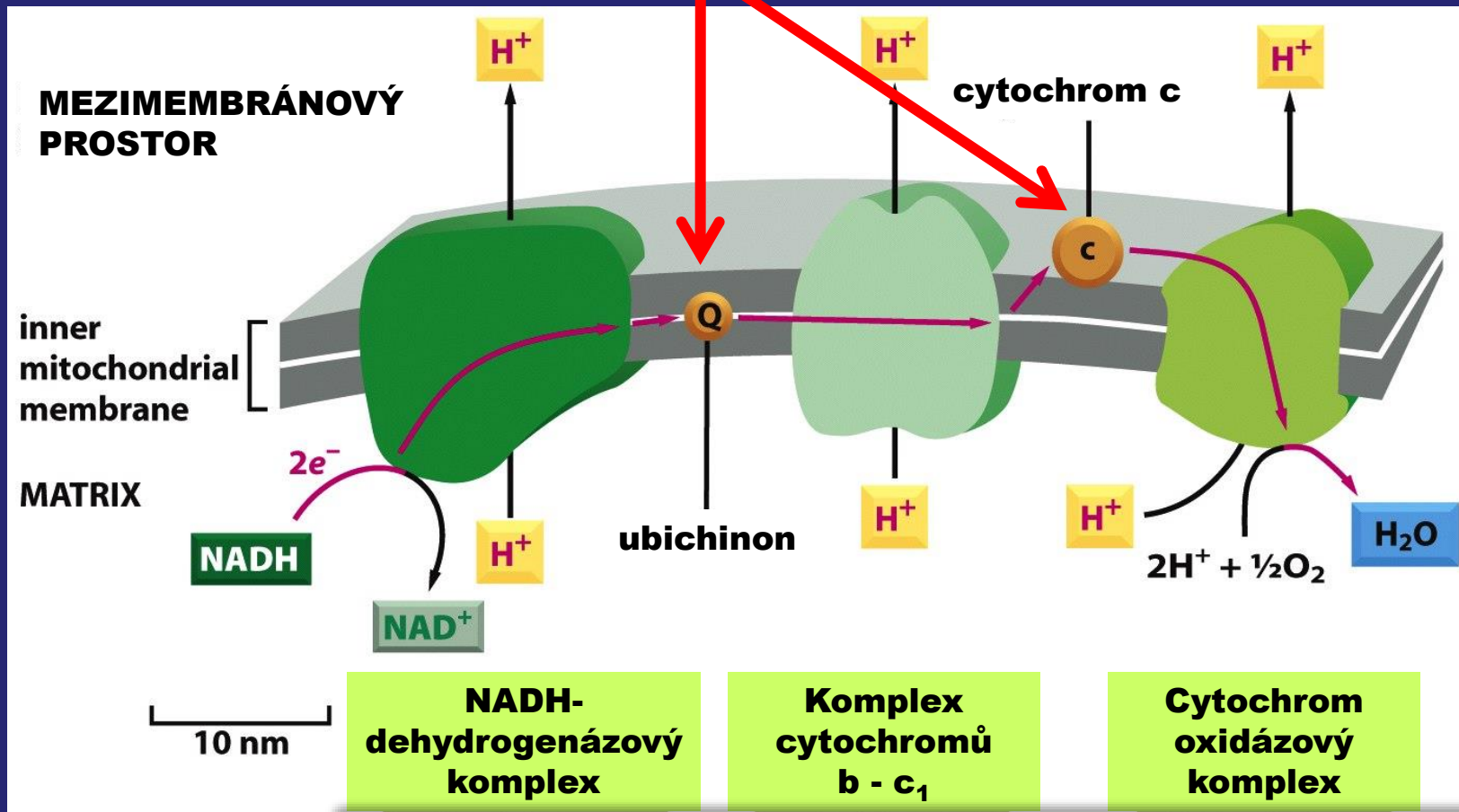
- ❖ Dochází k toku  $H^+$  iontů po elektrochemickém gradientu zpátky z mezimembránového prostoru do matrix.
- ❖ To je spřaženo se vznikem **ATP** z **ADP** a  **$P_i$** . Tento děj je katalyzován **ATP- syntázou** (*ATP-ázová pumpa F-typu*).



Více snad ozřejmí  
následující  
obrázky

**Elektrontransportní řetězec** (dýchací řetězec) je tvořen třemi multienzymovými systémy (tvořené transmembránovými proteiny vnořenými do membrány)

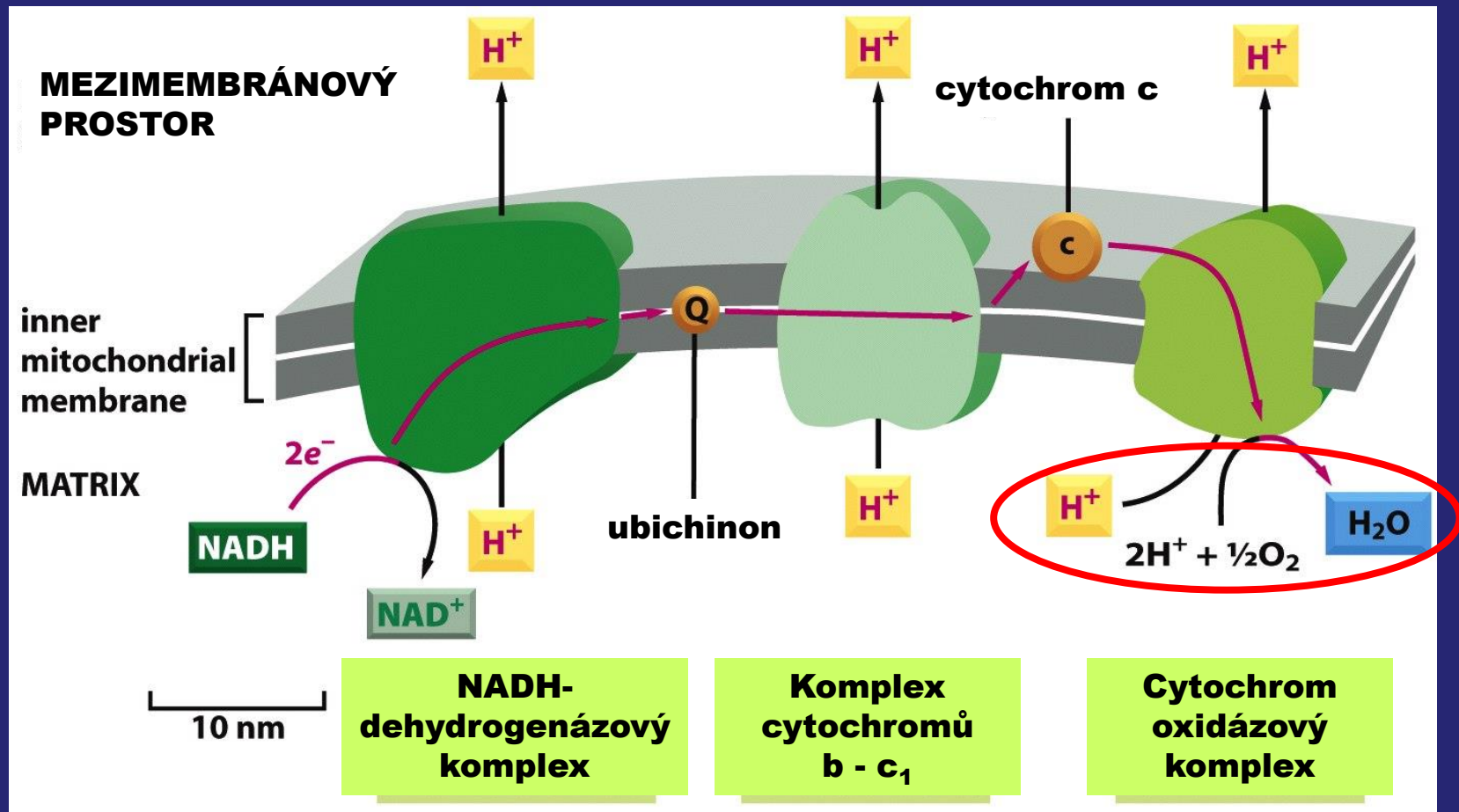
**Pohyblivé přenašeče elektronů**



**dopravují elektrony od jednoho komplexu k druhému**



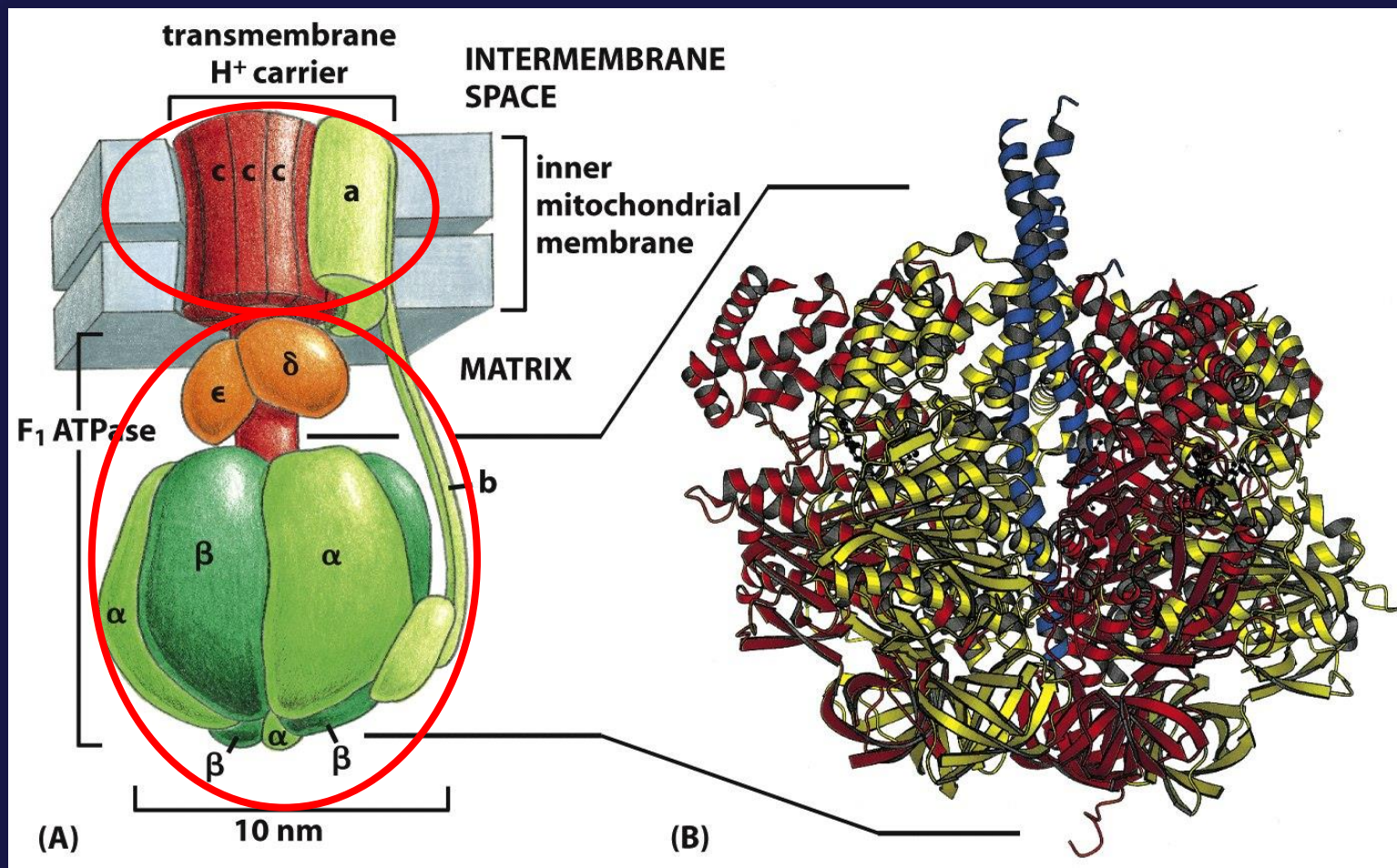
Elektrony začínají s velmi vysokou energií a postupně při každém kroku řetězcem tuto energii ztrácejí (tato energie pohání protonové pumpy, které jsou součástí komplexu).



Nakonec elektrony vstoupí do cytochromoxidázy, kde se spojí s molekulou O<sub>2</sub> za vzniku vody.

# ATP syntáza - struktura

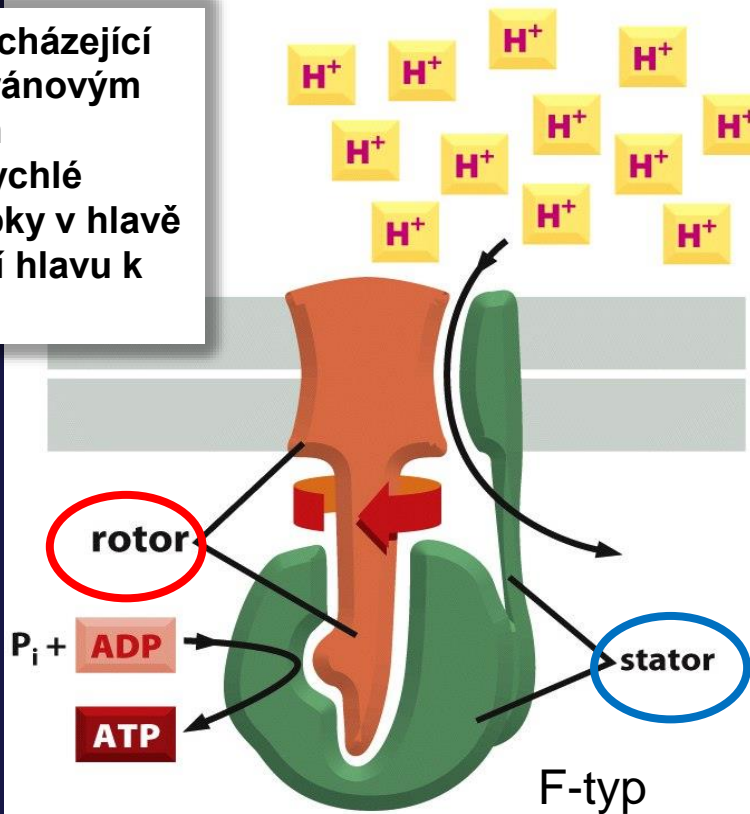
... je zařízení pro vratně spřažený přenos. Je to přenašeč, který je schopen převádět energii gradientu elektrochemického potenciálu protonů na energii chemické vazby a opačně.



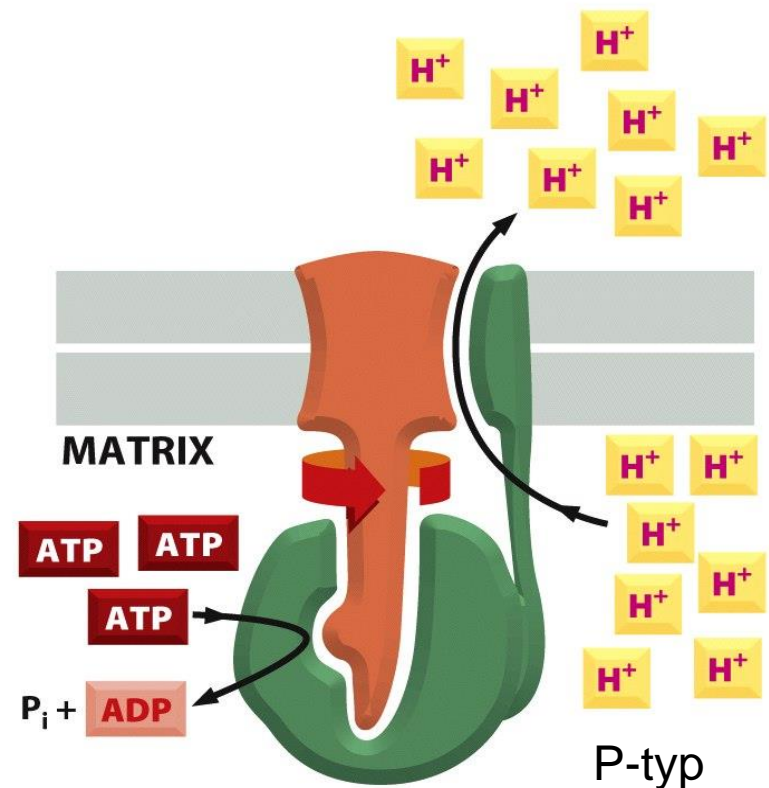
# ATP syntáza - funkce

- ❖ buď vytváří ATP využívajíc energii gradientu protonů ( $H^+$  iontů)
- ❖ nebo čerpá protony ( $H^+$  ionty) proti elektrochemickému gradientu a k tomu spotřebovává energii uloženou v ATP jeho hydrolyzou

Protony procházející transmembránovým přenašečem vyvolávají rychlé otáčení stopky v hlavě a tím přimějí hlavu k tvorbě ATP

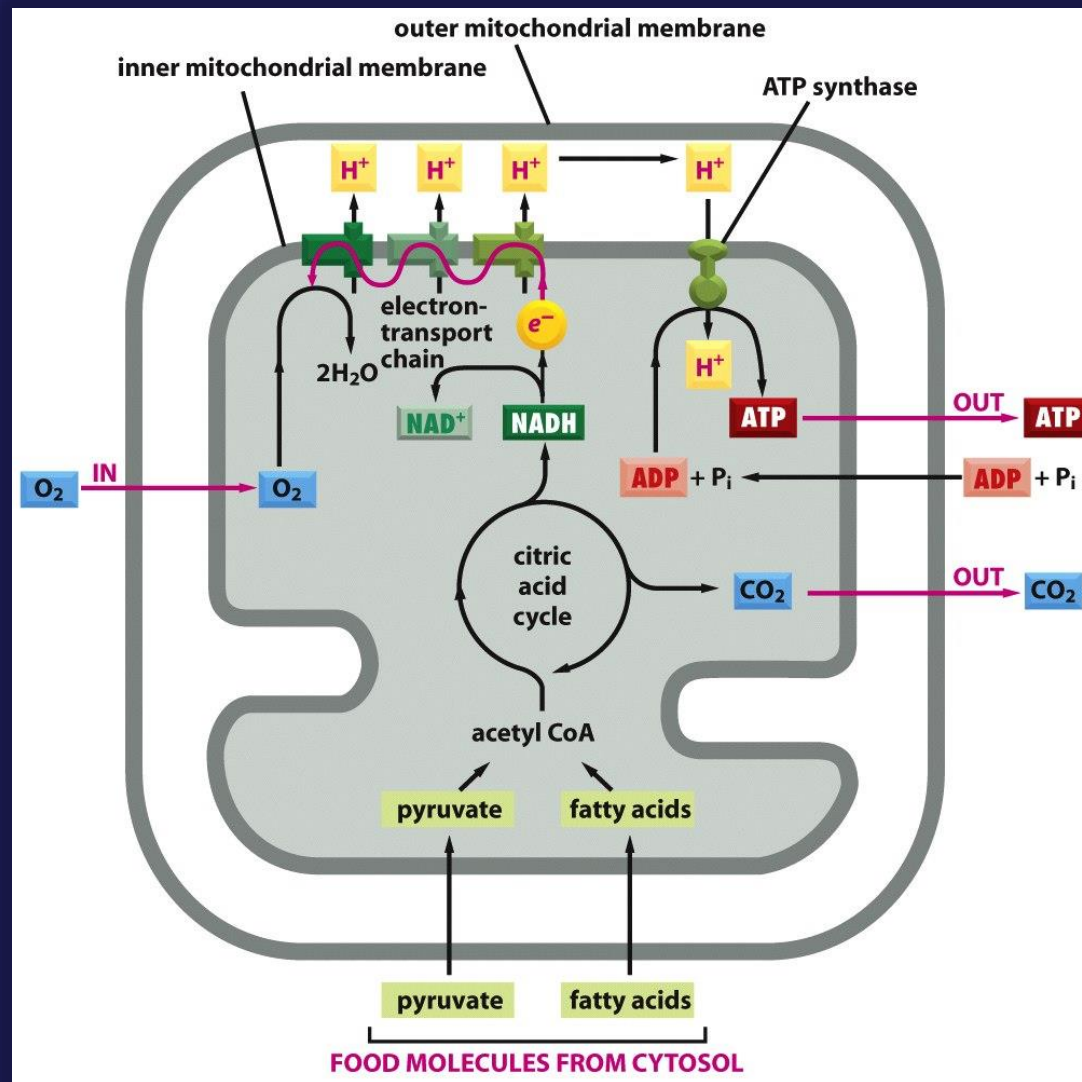


(A) **SYNTÉZA ATP**



(B) **HYDROLÝZA ATP**

# A jak to vypadá v mitochondriích?

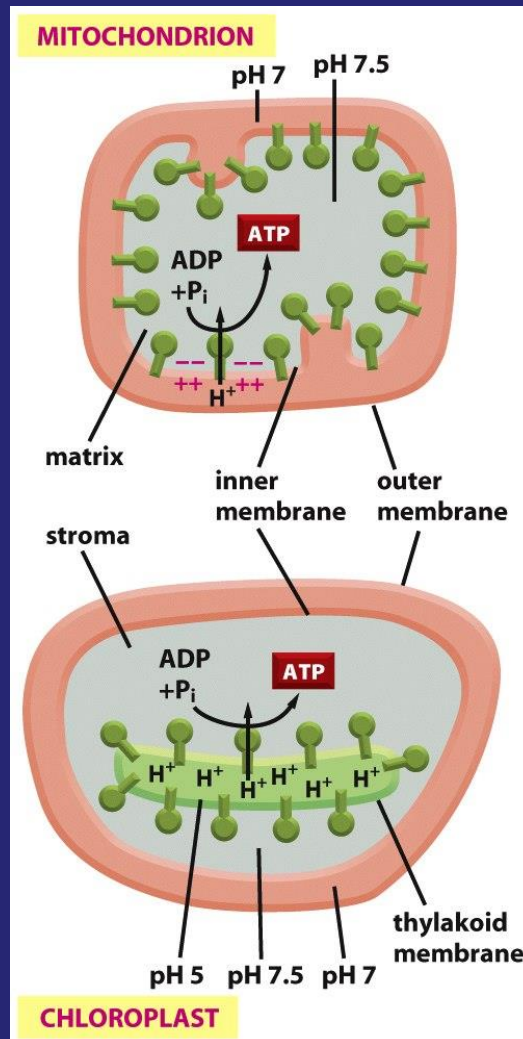


# Rozdílné umístění ATP-syntázy

## MITOCHONDRIE

ATP-syntáza je na vnitřní mitochondriální membráně.

$H^+$  ionty jsou čerpány do mezimembránového prostoru



 = ATP synthase

## CHLOROPLAST

ATP-syntáza je na thylakoidní membráně.


$H^+$  ionty jsou čerpány do vnitřního thylakoidního prostoru

## 8. Fotosyntéza

# Co to je fotosyntéza?

Je to světlem poháněná reakce, při níž se vytváří organické molekuly (cukry) z atmosférického  $\text{CO}_2$ .

Fotosyntézy jsou schopné rostliny, řasy a některé bakterie.

Využívají  **elektrony z vody**  
**energii ze slunce**

Fotosyntéza probíhá ve specializovaných organelách – **CHLOROPLASTECH**.

Proces probíhající v chloroplastech se podobá procesu v mitochondriích (*dochází k přenosu vysoce energetických elektronů*).

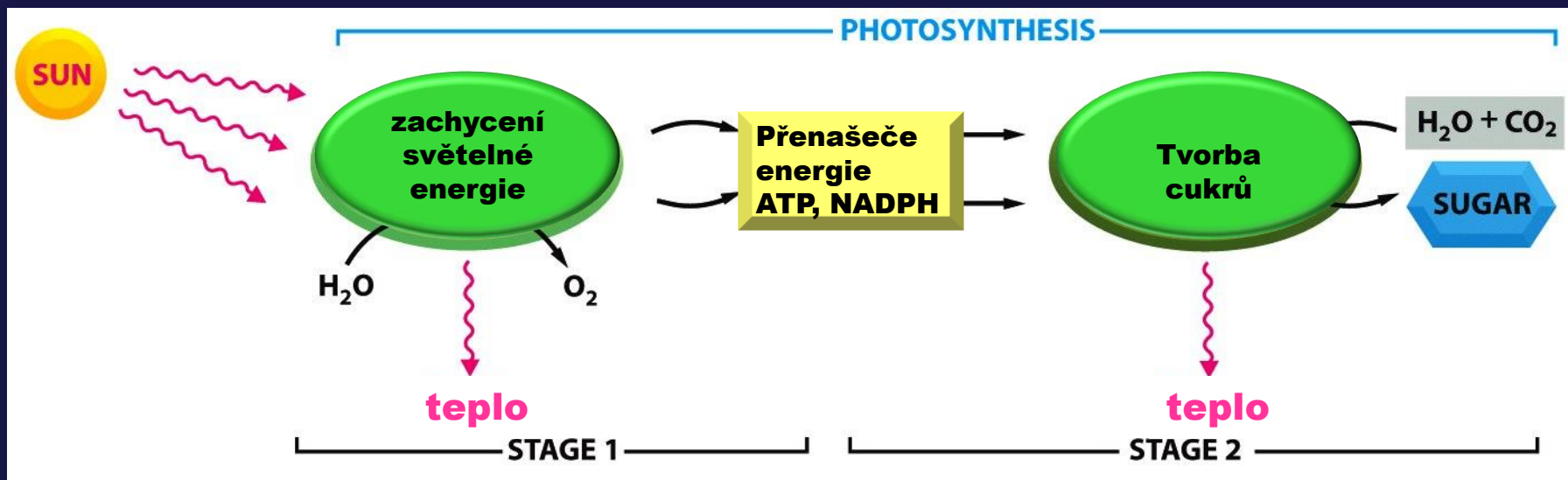
# Mohutná fotosyntéza

Fototrofní organismy ročně zachytí asi  $10^{71}$  kJ energie a její pomocí vyrobí asi  $14 \times 10^{11}$  tun organické hmoty, uvolní  $15 \times 10^{11}$  tun  $O_2$  a fixují  $20 \times 10^{11}$  tun  $CO_2$  ze vzduchu a oceánů [VODRÁŽKA, Z. *Biochemie 3. Praha : Academia, 1993. ISBN 80-200-0471-8. S. 55.*].

Na produktech fotosyntézy je závislý i dnešní průmysl, neboť uhlí, ropa a zemní plyn (tzv. fosilní paliva) jsou zbytky organismů, které žily v dávné minulosti a bez fotosyntézy by nevznikly



# Dvě stádia fotosyntézy



Světelná fáze

Temnostní fáze

# Světelná fáze fotosyntézy

Fotosyntetické reakce probíhá celá v chloroplastu

- ❖ Energie ze slunečního světla se přenáší na elektron v molekule chlorofylu.
- ❖ Elektron pak putuje elektron-transportním řetězcem v thylakoidní membráně.
- ❖ Během přenosu elektronů jsou přes thylakoidní membránu čerpány  $H^+$  protony
- ❖ Vzniká tak elektrochemický gradient, jenž pohání ATPsyntázu ve stromatu
- ❖ Posledním krokem je přenos elektronů s vysokým obsahem energie +  $H^+$  iontů na molekulu  $NADP^+$  a vzniká NADPH.

*Na konci této fáze vzniká:  $H^+$ , ATP, NADPH a  $O_2$*

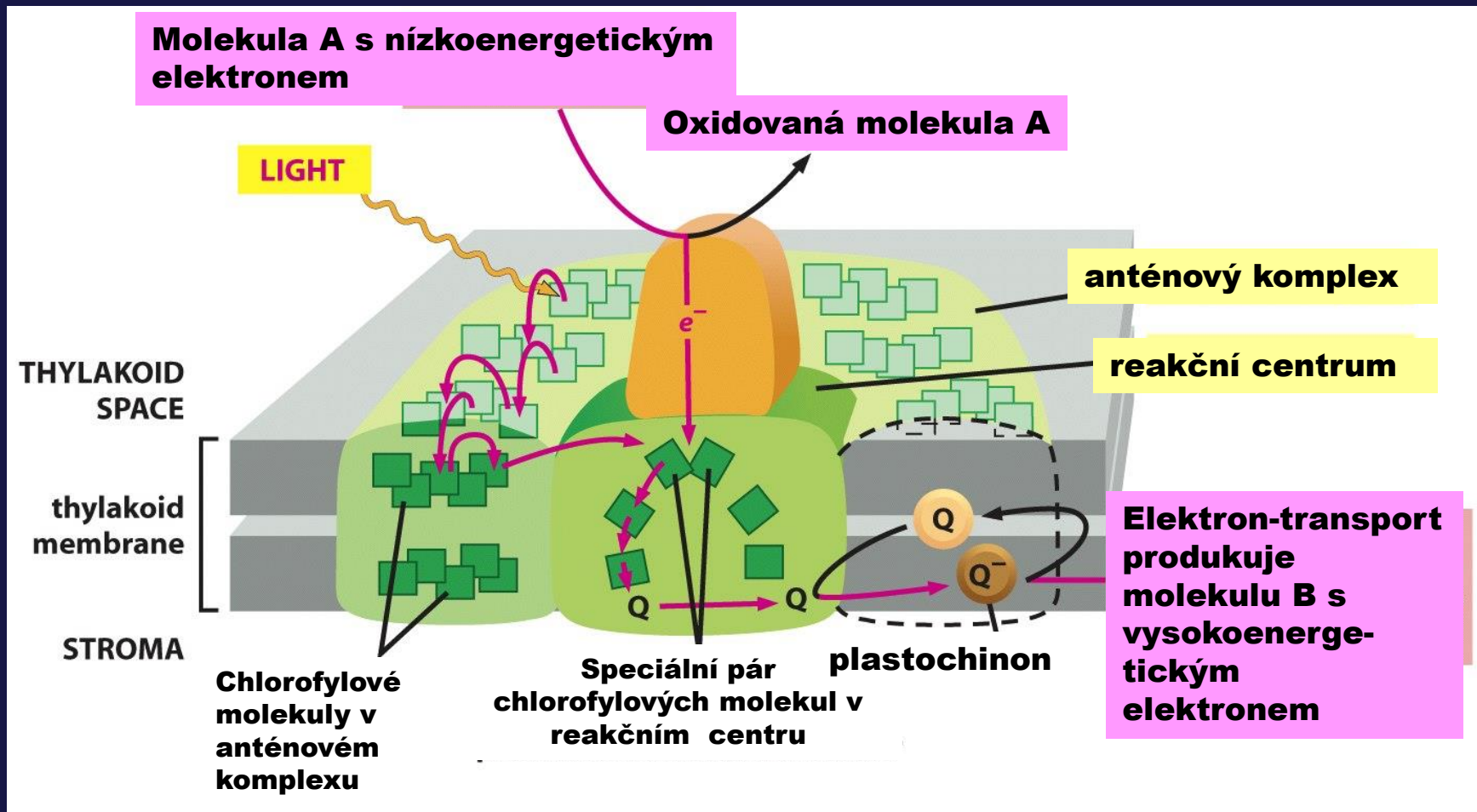
# *Temnostní fáze fotosyntézy*

**Reakce fixace uhlíku – začínají ve stromatu chloroplastu, pak pokračují v cytosolu)**

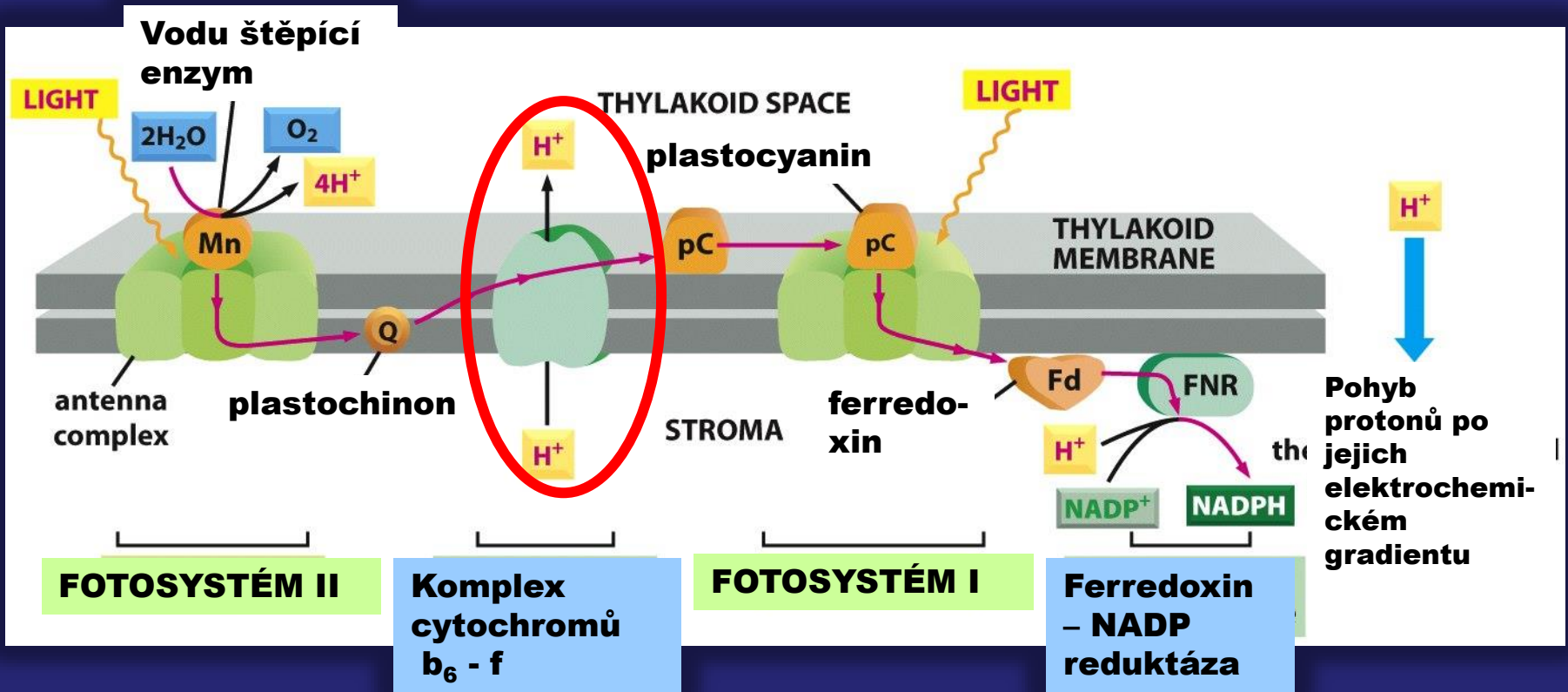
- ❖ Vytvořené ATP, NADPH slouží k pohonu syntézy sacharidů z  $\text{CO}_2$
- ❖ Sacharóza je pak přenášena do jiných buněk a tkání

*Na konci této fáze vzniká glycerinaldehyd-3-P jako výchozí molekula pro tvorbu dalších organických molekul.*

Sluneční světlo je absorbováno molekulami chlorofylu, kt. tvoří tzv. **ANTÉNOVÝ komplex**. Anténa sbírá elektrony (fotony), které byly excitovány světlem a předává je speciálnímu páru chlorofylových molekul v reakčním centru. RC tak získává vysokoenergetický elektron, který pak je předáván do elektrontransportního řetězce.



# Tok elektronů v thylakoidní membráně



Jediné místo v řetězci, kdy dochází k aktivnímu čerpání H<sup>+</sup> iontů.

# *Fixace vzdušného kyslíku probíhá v cyklické reakci*

❖ **C3 cyklus** (Calvinův, Calvin-Bensonův cyklus)

vznikají látky se 3 uhlíky

❖ **C4 cyklus** (Hatch-Slackův cyklus)

vznikají látky se 4 uhlíky

❖ **CAM cyklus**

obměna Hatch-Slackova cyklu

## ❖ **C3 cyklus** (Calvinův, Calvin-Bensonův cyklus)

využívají především rostliny mírného a chladných pásů - teplota v těchto oblastech není vysoká a respirace nepřevládá nad fotosyntézou.

## ❖ **C4 cyklus** (Hatch-Slackův cyklus)

využívají hl. teplomilné rostliny - při zvýšené teplotě se více uplatňuje fotorespirace, a tím klesá účinnost fotosyntézy, proto koncentrují  $\text{CO}_2$  (v buňkách mezofylu), než vejde do Calvinova cyklu

## ❖ **CAM cyklus**

Obměna C4 cyklu, využívají ji pouštní rostliny (sukulenty) - musí šetřit vodou, proto otevírají průduchy jenom v noci, kdy vážou  $\text{CO}_2$  do malátu. Během dne se malát štěpí na  $\text{CO}_2$ , který vstupuje do cyklu fixace.

# Iniciační fixace uhlíku

3 molekuly  $\text{CO}_2$  + 3 molekuly ribulosa 1,5-bis fosfát.

Reakce je katalyzována enzymem: ribulosa bis fosfát karboxylázou (RUBISCO) a probíhá ve stromatu chloroplastu. Je velmi pomalá\*. Molekul enzymu je proto v chloroplastech hodně \*\*.

Je to cyklický děj, na konci se regeneruje výchozí látka.

Fixují se 3 molekuly  $\text{CO}_2$  → vzniká 1 molekula **glyceraldehyd 3-P.**

Spotřebuje se při tom 9 molekul ATP a 6 molekul NADPH

- 3 molekuly substrátu zpracuje za sekundu – jiné enzymy i 1000x rychleji
- \*\* Tvoří až 50% celkové hmotnosti proteinů v chloroplastech.



# Fixace uhlíku

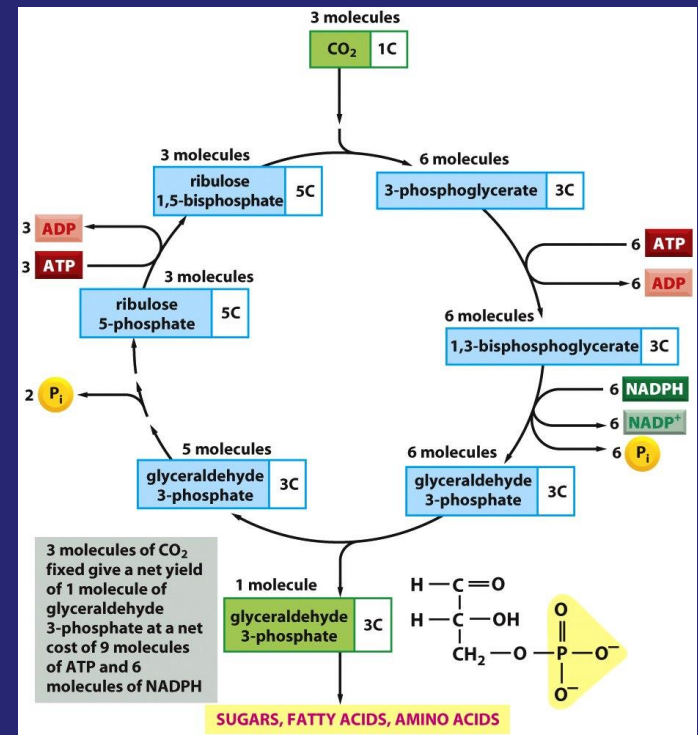
(Calvinův cyklus = C<sub>3</sub> cyklus)

a vznik organických molekul z CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O

Fixují se 3 mol. CO<sub>2</sub> → vzniká 1 mol. **glyceraldehyd 3-P.**  
Spotřebuje se při tom 9 molekul ATP a 6 molekul NADPH

Reakce katalyzována **ribulosa bisfosfát karboxylázou (RUBISCO)** a probíhá ve stromatu chloroplastu. Je velmi pomalá\*, molekul enzymu je proto v chloroplastech hodně\*\*.

Je to cyklický děj, na konci se regeneruje výchozí látka.



- \* 3 molekuly substrátu za sekundu – jiné enzymy i 1000x rychleji
- \*\* Tvoří až 50% celkové hmotnosti proteinů v chloroplastech.

# Co následuje

Glyceraldehyd 3-P je z chloroplastu přenesen do cytosolu.

**GLYKOLÝZA**

...mění se v pyruvát

**OXIDAČNÍ FOSFORYLACE**

**Výchozí  
surovina pro  
řadu dalších  
metabolitů**

...především z něj vzniká  
disacharid **SACHARÓZA**  
(hlavní transportní forma  
cukru u rostlin)

ten, co zůstane v chloroplastu je  
převeden na **ŠKROB**

# SHRNUTÍ

Buňky jsou schopny existence díky stálému přísunu energie pro růst, údržbu a reprodukci.

Prvotním zdrojem energie pro všechny živé organismy je Slunce. Rostliny a fotosyntetizující bakterie používají k tvorbě organických molekul sluneční energii přímo. Živočichové získávají energii z potravy = pojidáním rostlin a jiných živočichů

V buňce probíhají stovky reakcí. Většina z nich je specificky katalyzována enzymy. Tyto katalyzované reakce vytvářejí řetězce reakcí = metabolické dráhy.

Katabolické reakce odbourávají molekuly potravy oxidací a uvolňují energii. Anabolické reakce vedou k tvorbě složitých molekul, které buňka potřebuje a vyžadují přísun energie.

# SHRNUTÍ

Enzymy katalyzují reakce tak, že umožní molekulám substrátu snížit aktivační energii nutnou k vytvoření nebo odbourání specifických kovalentních vazeb

Spontánně bez dodání energie probíhají pouze takové reakce, které zvyšují entropii (neuspořádanost) vesmíru, volná energie takové reakce je záporná.

Energeticky nevýhodné reakce mohou proběhnout pouze tehdy, pokud jsou spřaženy s reakcemi energeticky výhodnými.

V těchto spřažených reakcích hrají významnou roli tzv. přenašečové molekuly: ATP, NADH, NADPH, FADH<sub>2</sub>.  
ATP přenáší vysoce energetickou fosforylovou skupinu.  
NADH, NADPH, FADH<sub>2</sub> vysokoenergetické elektrony.

# SHRNUTÍ

Glukóza a další molekuly potravy jsou odbourávány postupnou oxidací. Uvolněná energie je ukládána do přenašečových molekul ATP a NADH.

Odbourávání molekul potravy a vznik energie má tři základní fáze: glykolýza, cyklus kyseliny citrónové a oxidační fosforylace.

Glykolýza probíhá v cytosolu a glukóza je odbourávána na dvě molekuly pyruvátu (kyseliny pyrohroznové). Vzniká při tom ATP a NADH – čistý zisk je 2 molekuly ATP a 2 molekuly NADH.

Pyruvát je za přítomnosti kyslíku převáděn na acetyl-CoA a  $\text{CO}_2$ .

# SHRNUTÍ

Acetyl CoA je v citrátovém (Krebsově) cyklu převeden na  $\text{CO}_2$  a vodu. Při této oxidaci se uvolňuje energie, která je ukládána především do přenašečových molekul NADH a  $\text{FADH}_2$  v podobě vysoce energetických nabitých elektronů. *(Vzniká 1 molekula GTP, 3 molekuly NADH a 1 molekula  $\text{FADH}_2$ )*

V procesu oxidační fosforylace na vnitřní membráně mitochondrií jsou vysoce energetické elektrony přenašečových molekul využívány v elektron-transportním řetězci ke vzniku ATP = energetického platidla v buňce.

Z tuků jsou hydrolýzou z nich uvolněny mastné kyseliny. V mitochondriích jsou oxidovány na molekuly acetyl-CoA a dále využity v citrátovém cyklu i oxidační fosforylaci jako glukóza.

# SHRNUTÍ

Molekuly potravy jsou v buňce uskladňovány ve speciálních zásobárnách.

Tuky (v tukových buňkách - adipocytech) , glukózové podjednotky jako glykogen u živočichů nebo jako škrob u rostlin.

Molekuly potravy neslouží pouze k zisku energie (uvolňuje se jejich postupnou oxidací), ale jsou i zdrojem základních stavebních jednotek pro biosyntetické (anabolické) reakce.

# SHRNUTÍ

Většina ATP, která je produkována živočišnými buňkami vzniká v mitochondriích.

Mitochondrie jsou ohraničeny dvěma membránami – vnitřní uzavírá mitochondriální matrix.

Matrix obsahuje velké množství enzymů. Jsou zde také enzymy citrátového cyklu.

Elektron-transportní řetězec buněčného dýchání (dýchací řetězec) je umístěn ve vnitřní mitochondriální membráně.

Při přenosu vysokoenergetických elektronů přes tři multienzymové komplexy se postupně uvolňuje energie těchto elektronů a je využita pro čerpání protonových  $H^+$  iontů přes membránu do mezimembránového prostoru.



# SHRNUTÍ

Tím vzniká elektrochemický gradient protonových iontů. Při pohybu iontů zpět po elektrochemickém spádu se uvolňuje energie, která je využívána k tvorbě ATP pomocí ATP-syntázy.

Při fotosyntéze se v chloroplastech generují vysokoenergetické elektrony absorpcí slunečního světla (fotonů) molekulou chlorofylu.

Elektron-transportní řetězec je umístěn v thylakoidní membráně. Na konci těchto fotosyntetických dějů vzniká energie v podobě ATP a NADPH.

Tato energie je u rostlin použita k fixaci uhlíku v  $\text{CO}_2$  do molekul cukrů. Nejdůležitější molekulou je glyceraldehyd-3-P. Molekuly jsou pak přenášeny do cytosolu.