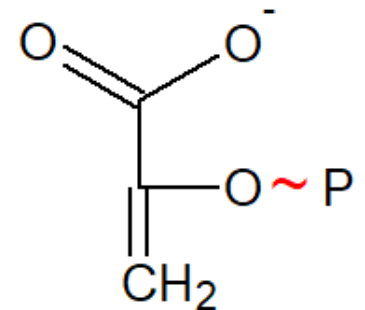
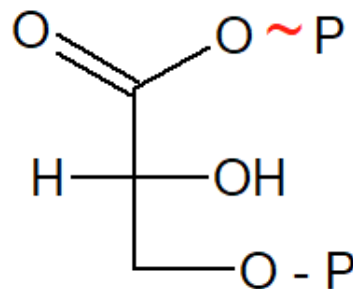
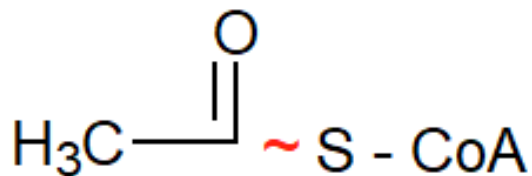


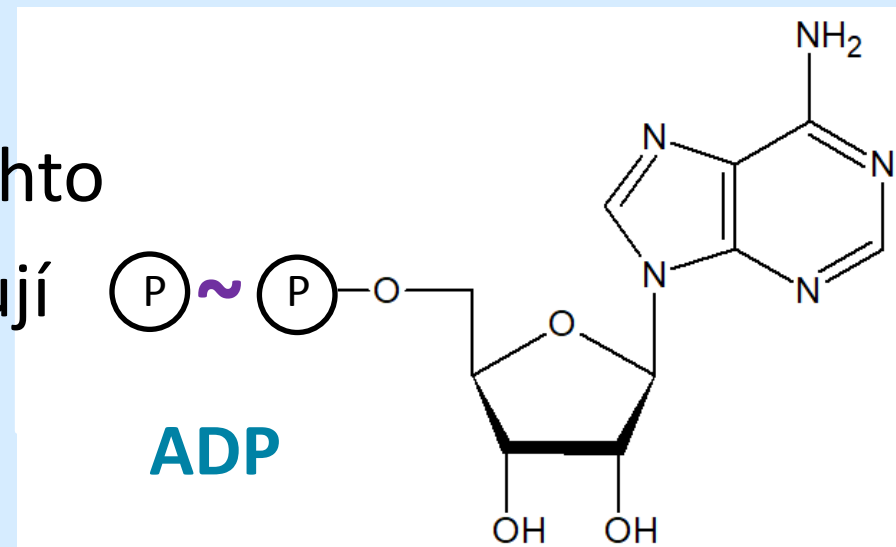
Makroergické sloučeniny

Bc. Denisa Hubáčková



Makroergické sloučeniny – obecná charakteristika

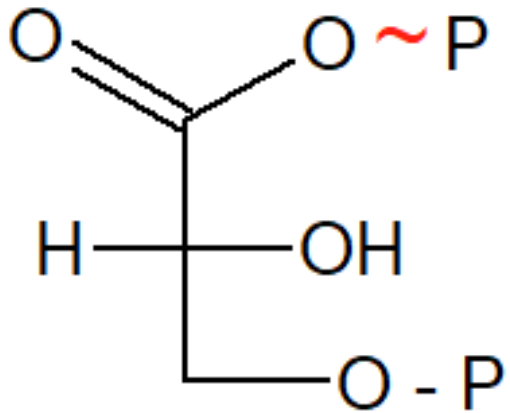
- makroergické sloučeniny při svém **štěpení** poskytují množství energie využitelné pro procesy, které energii vyžadují
- fungují jako **nosiče energie**
- při jejich hydrolýze se uvolňuje energie větší než **25 kJ/mol**
- makroergické vazby v těchto sloučeninách se znázorňují se pomocí symbolu **~**



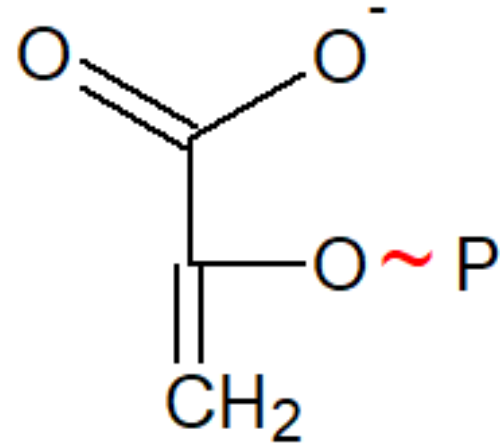
Makroergické sloučeniny – obecná charakteristika

- mezi nejdůležitější makroergické sloučeniny patří univerzální přenašeč energie **ATP**, dále **GTP, CTP, UTP** – ostatní nukleosidtrifosfáty
- **acetyl-SCoA**
- **fosfoenolpyruvát**
- **1,3-bisfosfoglycerát**
- při **hydrolýze** se v nich obvykle štěpí fosfoanhydridové vazby, esterové vazby, thioesterové vazby (srovnat se štěpením bílkovin)

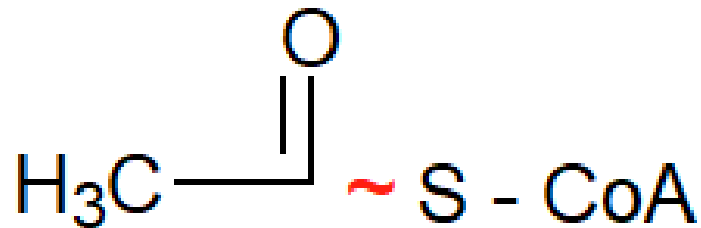
Makroergické sloučeniny – zástupci



1,3-bisfosfoglycerát



fosfoenolpyruvát



acetyl-CoA

Makroergické sloučeniny – energie hydrolýzy makroergické vazby

Sloučenina	ΔG^0 (kJ/mol)
fosfoenolpyruvát	-61,9
1,3-bisfosfoglycerát	-49,3
ATP (\rightarrow AMP + PP _i \rightarrow 2 P _i)	-45,6? zkontrolovat
kreatinfosfát	-43,1
ATP (\rightarrow ADP + P _i)	-30,5

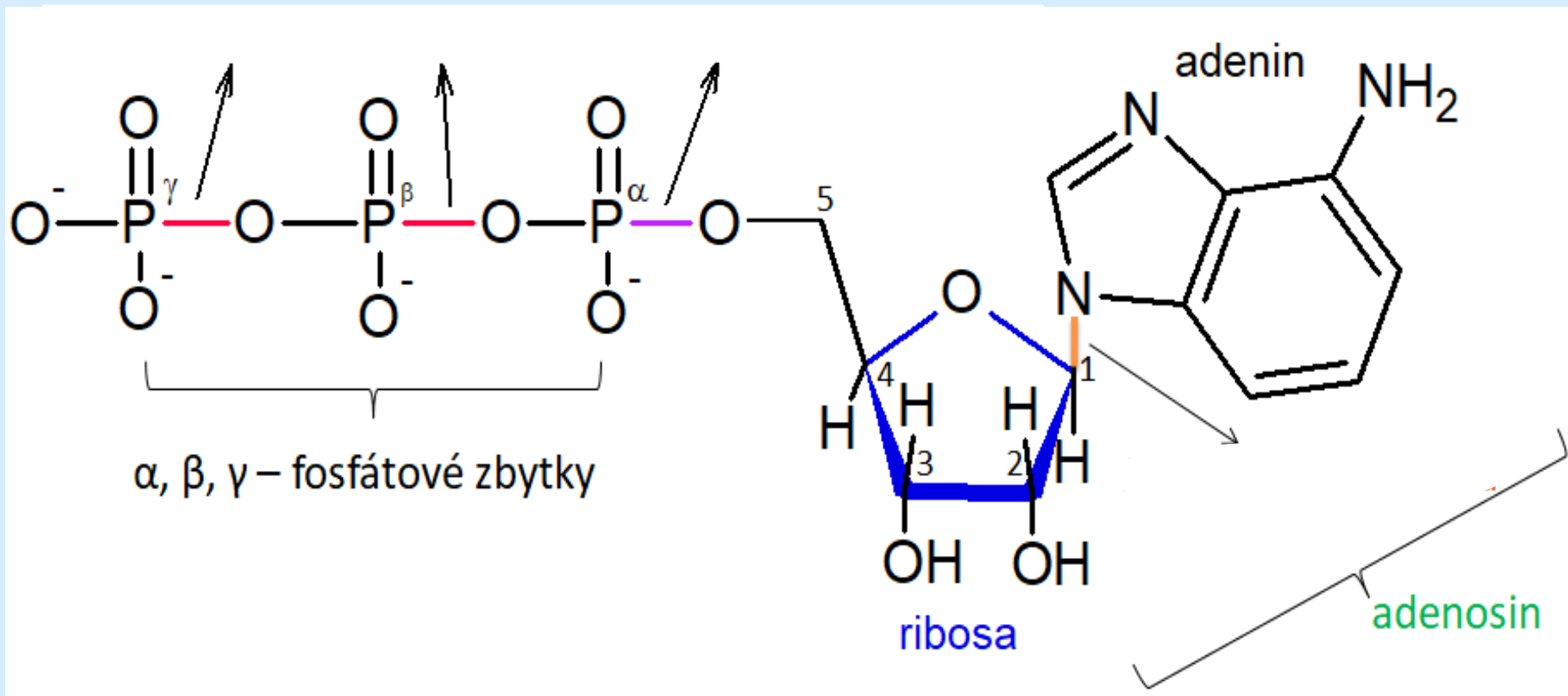
ATP – adenosintrifosfát

Chemická struktura

- po chemické stránce je ATP **nukleotid**
- **nukleotid** se skládá ze tří komponent:
 - a) **pětiuhlíkatého cukru** (ribosa, deoxyribosa),
 - b) **báze** (cytosin (C), thymin (T), uracil (U), guanin (G), adenin (A)),
 - c) **fosfátové skupiny**
- cukr s bází má pak podle báze příslušné označení **nukleosid** (např. guanosin, adenosin)

ATP – adenosin trifosfát

Chemická struktura



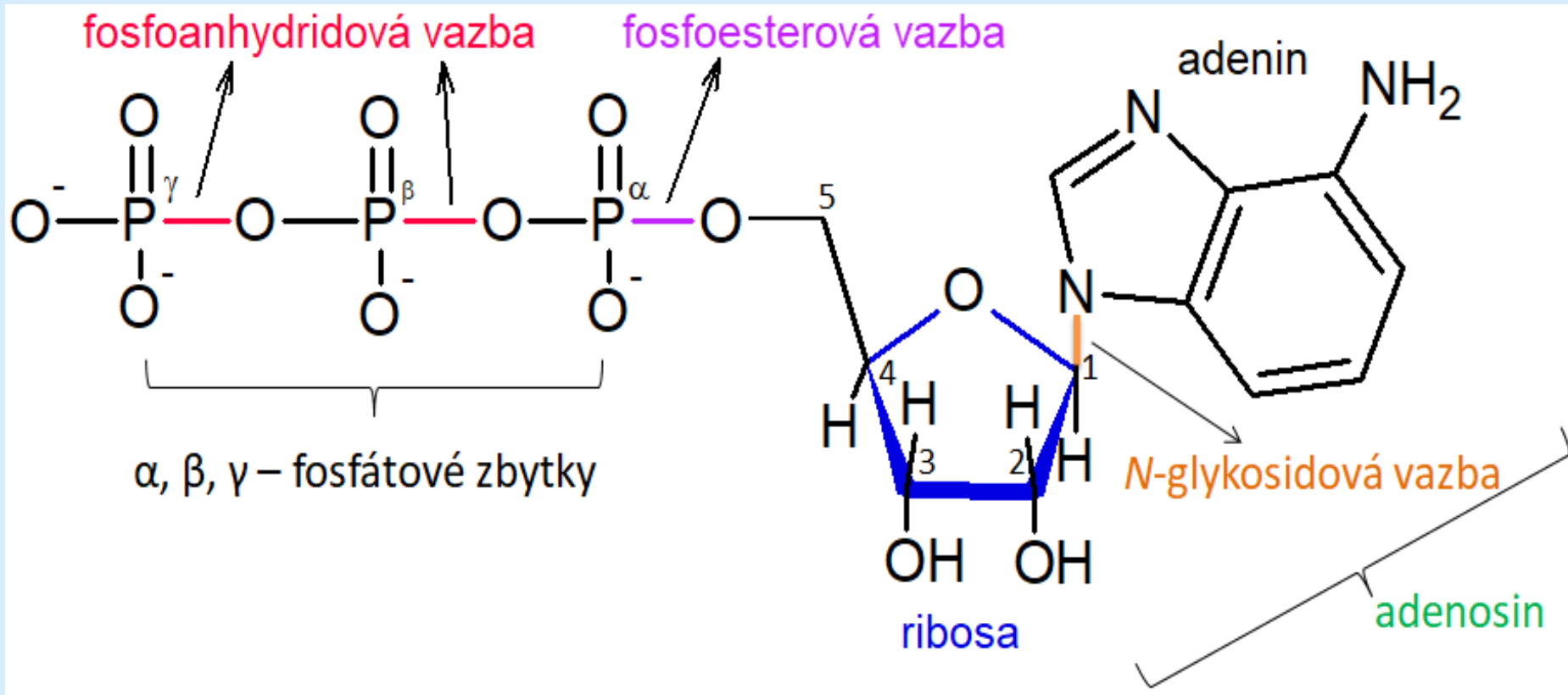
ATP – adenosintrifosfát

Chemická struktura

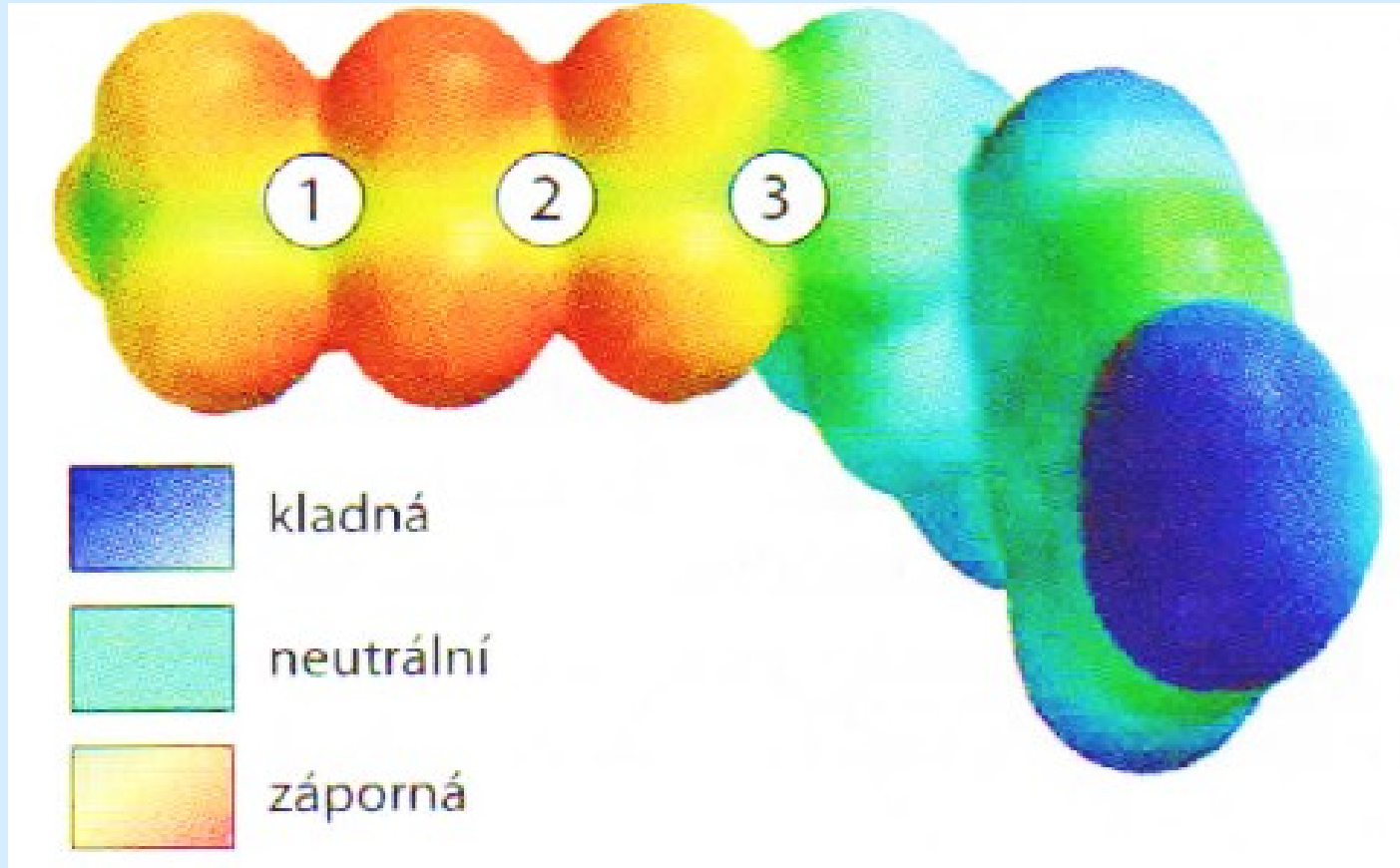
- mezi cukrem a bází se nachází **N-glykosidová vazba** (spojuje 1' -OH skupinu s dusíkem heterocyklu)
 - na 5'-OH skupinu cukru je připojen řetězec tří fosfátových zbytků **fosfoesterovou** vazbou
 - mezi jednotlivými fosfáty se nacházejí labilní **fosfoanhydridové** vazby
- **tyto vazby jsou nosiči energie**

ATP – adenosintrifosfát

Chemická struktura

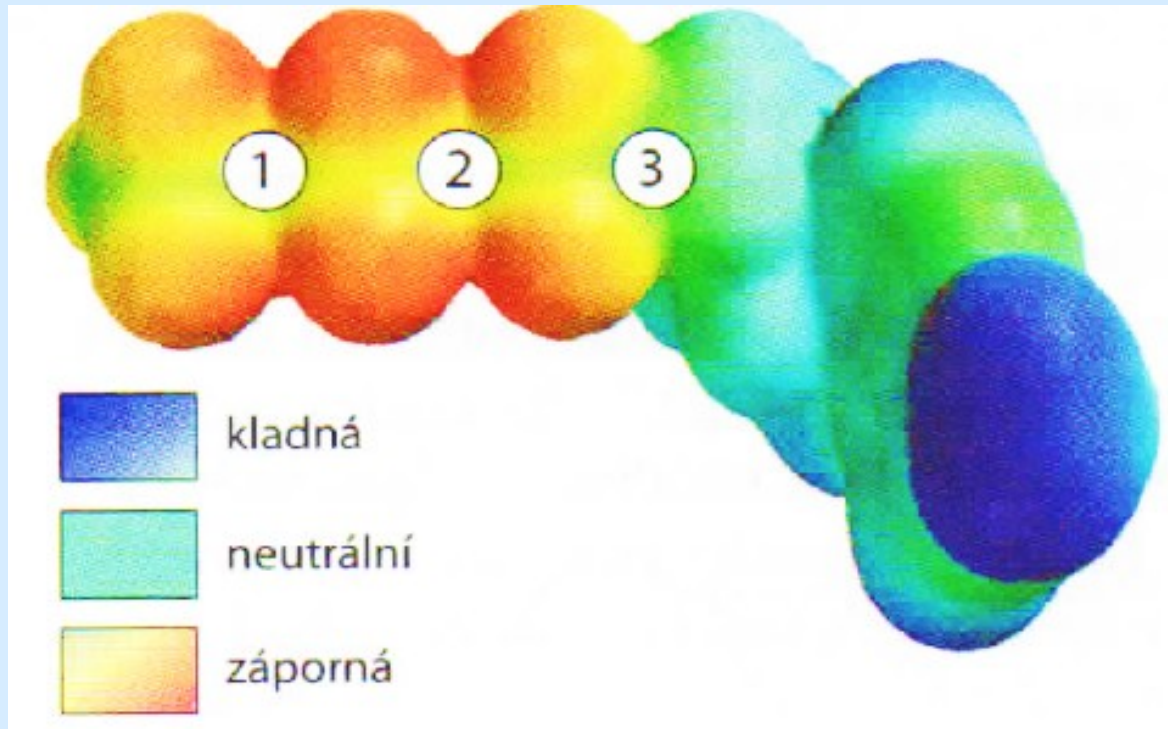


ATP – Proč nesou vazby tolik energie?



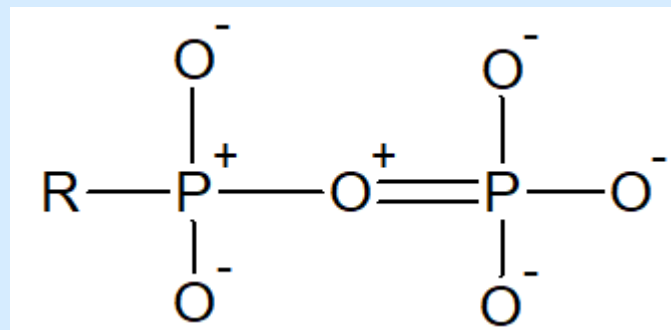
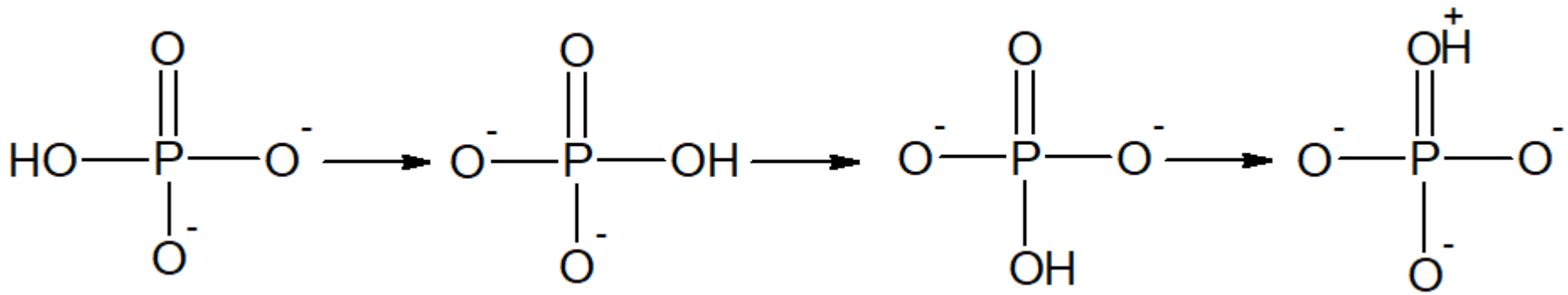
ATP – Proč nesou vazby tolik energie?

1. odpuzování fosfátových skupin
2. stabilizace systému vznikem rezonančních struktur (namalovat)



ATP – Proč nesou vazby tolik energie?

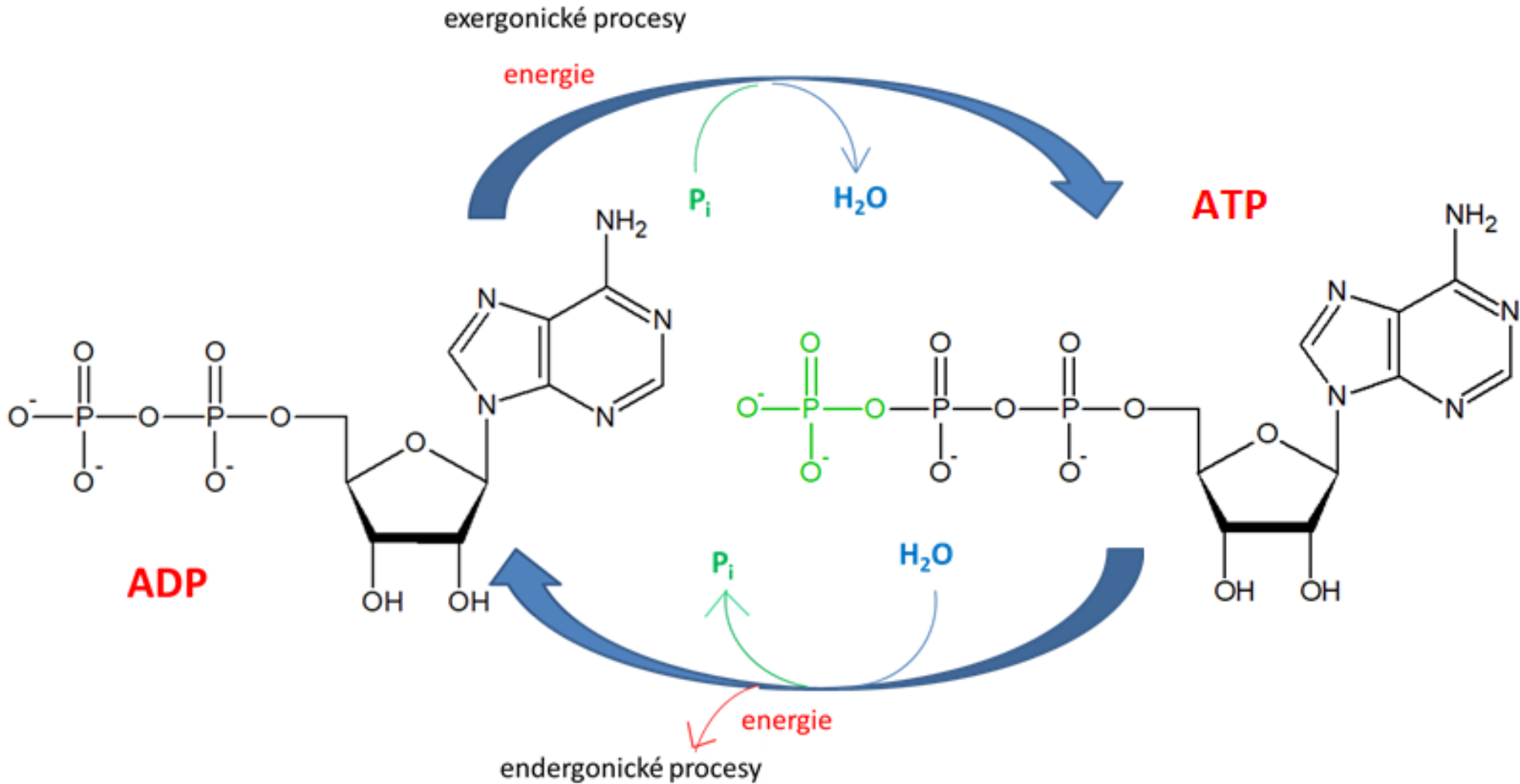
1. odpuzování fosfátových skupin
2. stabilizace systému vznikem rezonančních struktur (namalovat)



ATP – Jak získáme energii z fosfoanhydridových vazeb?

- makroergické sloučeniny (ATP) lze poměrně jednoduchou enzymaticky katalyzovanou cestou = **hydrolýzou** rozložit na produkty s mnohem nižší energií
- reakce je značně **exergonická**
- důležité je si uvědomit, že reakce je obousměrná, podle potřeby organismu neustále probíhá uvedená reakce
$$\text{ADP} + \text{P}_i \leftrightarrow \text{ATP} + \text{H}_2\text{O}$$

Hydrolýza ATP



ATP – Kolik energie získáme hydrolýzou ATP? ΔG

Gibbsova energie G

- volná energie G je energií molekuly (soustavy), která by se dala využít k práci při konstantní teplotě
- její jednotkou je kJ (dříve se používala jednotka kcal, 1kcal = 4,18 kJ)

v reakci $A + B \rightarrow C + D$ je:

$$\Delta G = (\text{volná energie } C + D) - (\text{volná energie } A + B)$$

$\Delta G < 0$ = exergonické procesy

$\Delta G > 0$ = endergonické procesy

→ právě v těchto dějích hraje významnou roli energie uložená v ATP a energetické spřáhování

ATP – Kolik energie získáme hydrolýzou ATP?

- hydrolýza je štěpení kovalentní vazby substrátu adicí vody
- $\Delta G^\circ = -30,5 \text{ kJ/mol}$
- skutečná fyziologická hodnota



→ koncentrace ATP je ve velkém nadbytku nad ADP + P_i (c ATP v buňkách je řádově miliony/ dm^{-3} zatímco ADP je okolo $10 \mu\text{M}$)



- celková volná energie ΔG závisí i na koncentracích výchozích látek a produktů

ATP – Kolik energie získáme hydrolýzou ATP?

Platí následující vztah:

- $\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln ([B]/[A])$
- ΔG je celková změna volné energie, ΔG° je standardní změna volné energie, R plynová konstanta rovná $8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ a T je termodynamická teplota v kelvinech ($30^\circ\text{C} = 303,15 \text{ K}$), $[A]$ je koncentrace výchozí látky a $[B]$ je koncentrace produktu
- pokud $[A] = [B]$, potom $\Delta G = \Delta G^\circ$ (protože $\ln 1 = 0$)

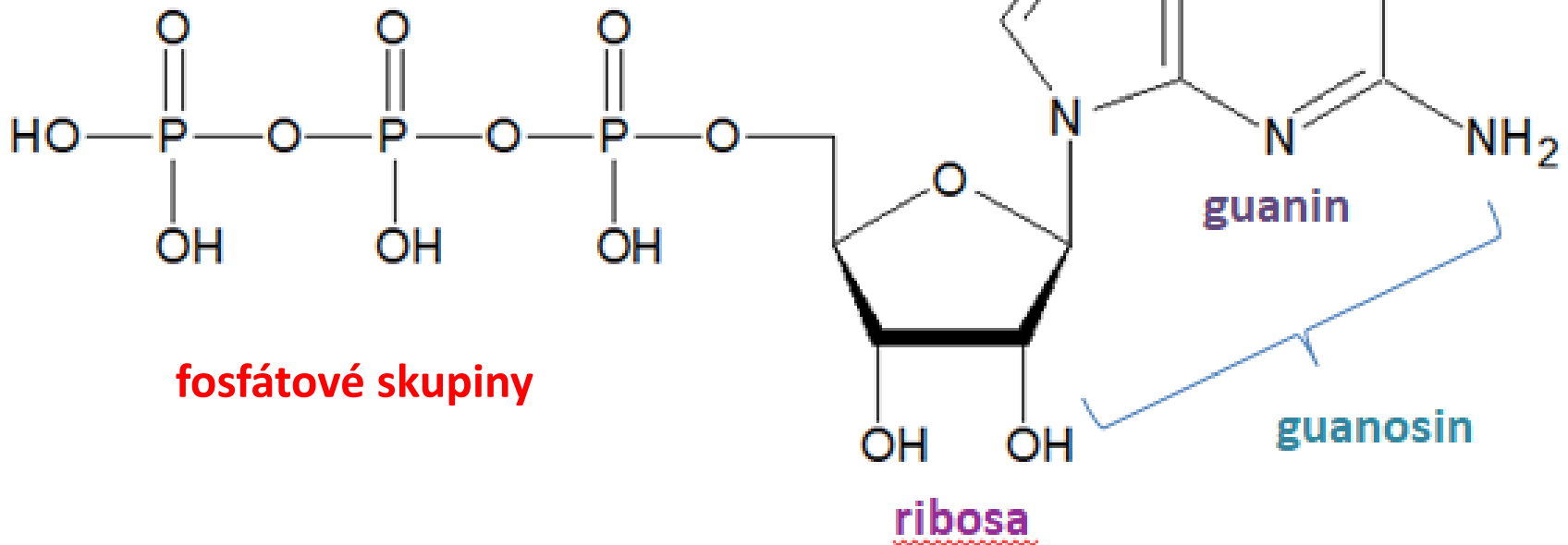
V případě ATP:

- $\Delta G = \Delta G^\circ + 2,52 \ln ([\text{ADP}] \times [\text{P}]/[\text{ATP}]) = (-30,5 + 2,52 \ln ([\text{ADP}] \times [\text{P}]/[\text{ATP}])) \text{ kJ/mol} = -50,2 \text{ kJ/mol}$

GTP – guanosintrifosfát

Chemická struktura

- a) cukr ribosa,
 - b) guanin,
 - c) tři fosfátové skupiny
- } **guanosin**



GTP - funkce

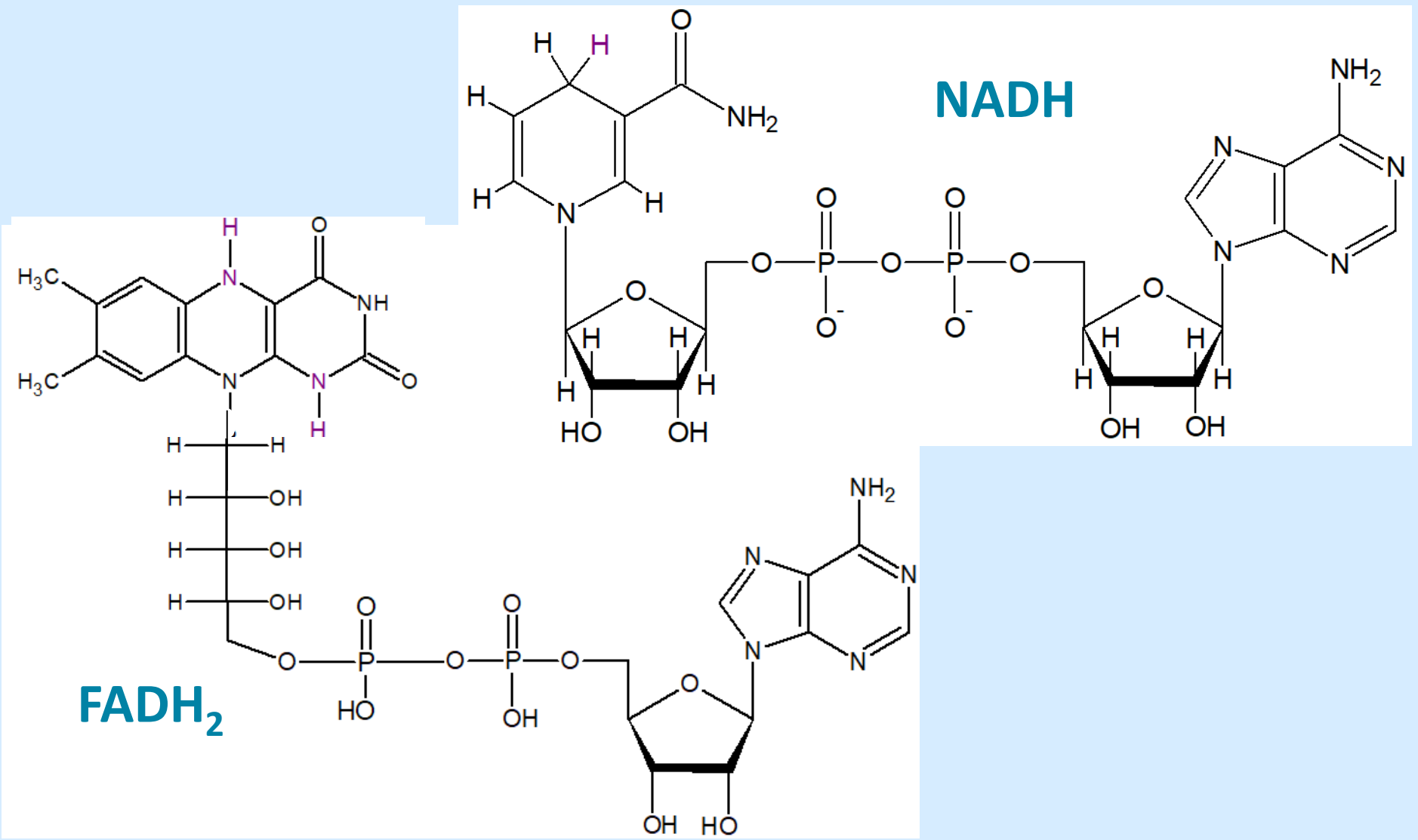
- poskytnout energii např. při **sestavování tubulinu do mikrotubulů**
- v proteosytéze při translaci umožňuje **navázání tRNA na ribozomy**
- vystupuje jako **substrát při replikaci DNA** nebo při **transkripci do RNA**

(podobná fce jako ATP, avšak mnohem specifitější)

ATP a GTP jsou energeticky ekvivalentní a může docházet k přechodu:

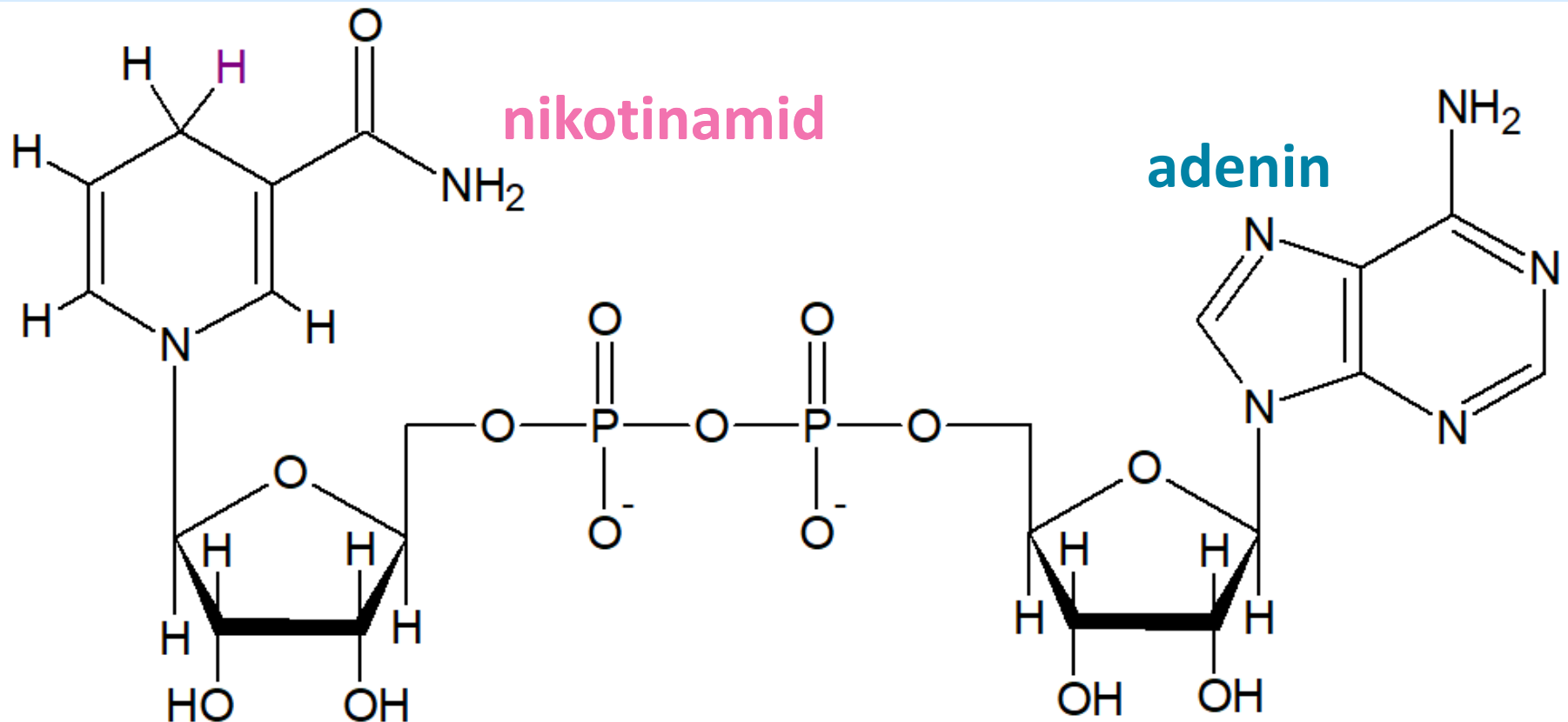


Aktivované přenašeče – koenzymy: NADH, FADH₂, NADP



NADH - nikotinamidadenindinukleotid

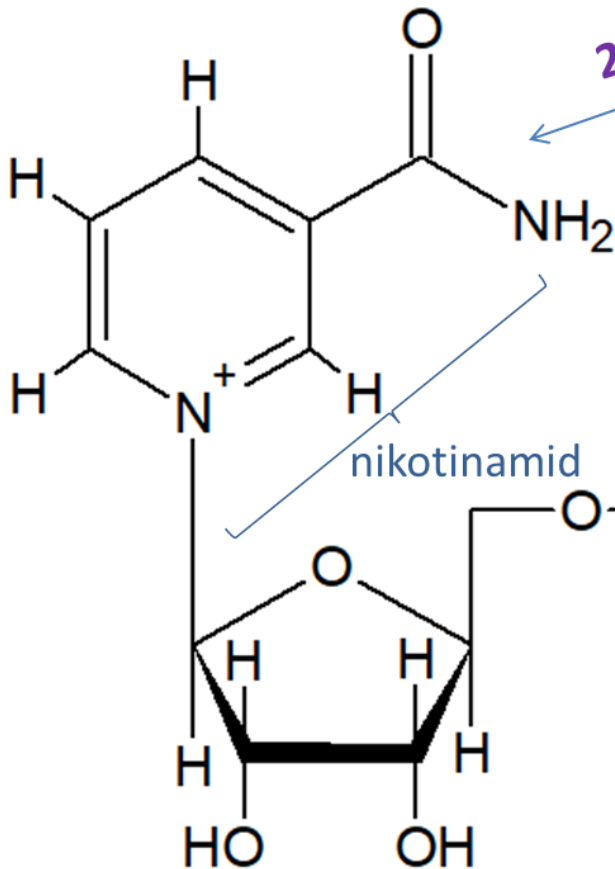
- patří do aktivovaných přenašečů vysokoenergetických elektronů a atomů vodíku
- podílí se tak na energetickém metabolismu
- obsahuje **2 spojené nukleotidy**, které se liší pouze bází



NADH – oxidačně-redukční vlastnosti

oxidovaná forma

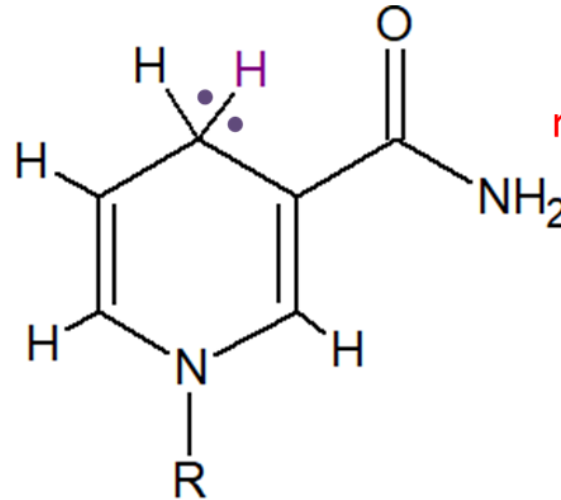
NAD⁺



$2\text{H}^+, 2\text{e}^-$

NADH + H⁺

redukována forma



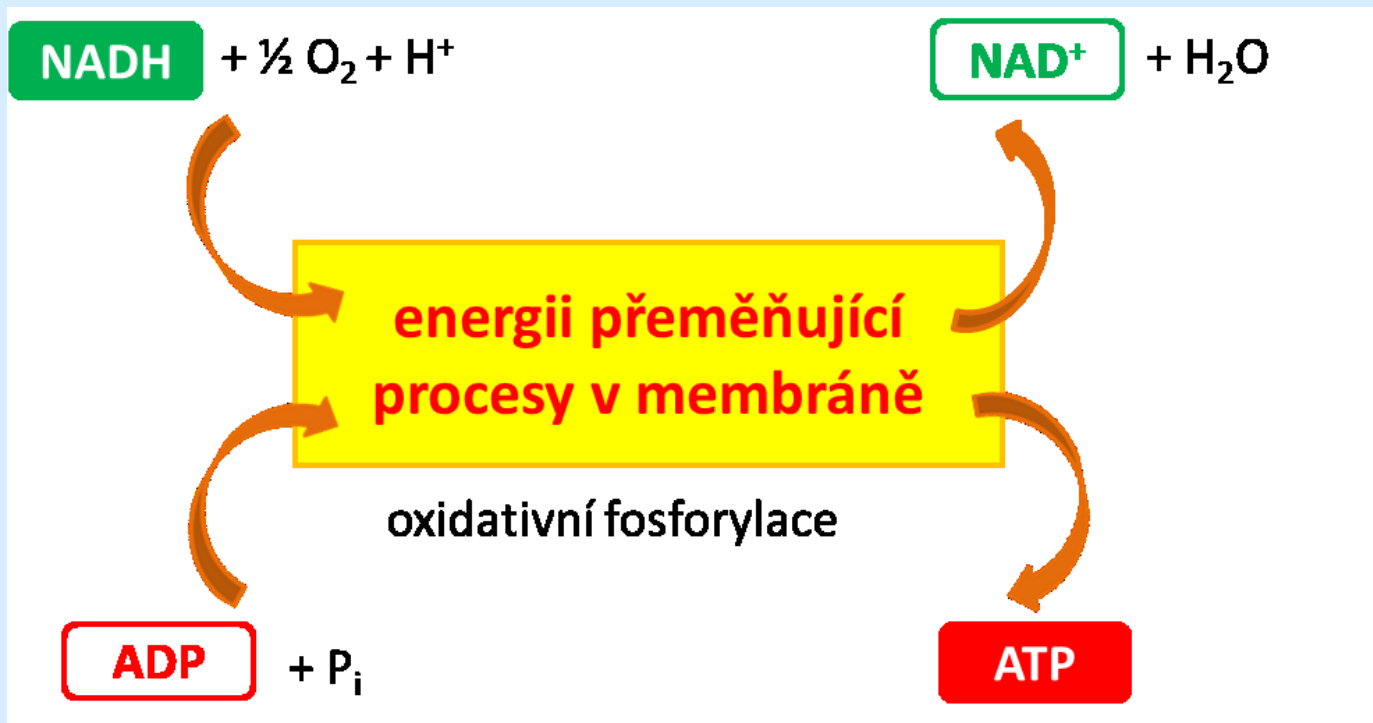
nikotinamid

NADH – oxidačně-redukční vlastnosti

- **oxidovaná forma** má tvar **NAD⁺** a přijímá 2 elektrony a proton H⁺ (neboli H⁻)
- vzniká jako jeden z produktů elektronového transportního řetězce reoxidací
- **redukovaná forma NADH + H⁺** vzniká v procesech jako je např. glykolýza, přeměna pyruvátu na acetyl-CoA a především v Krebsově cyklu (obecně v katabolických drahách)

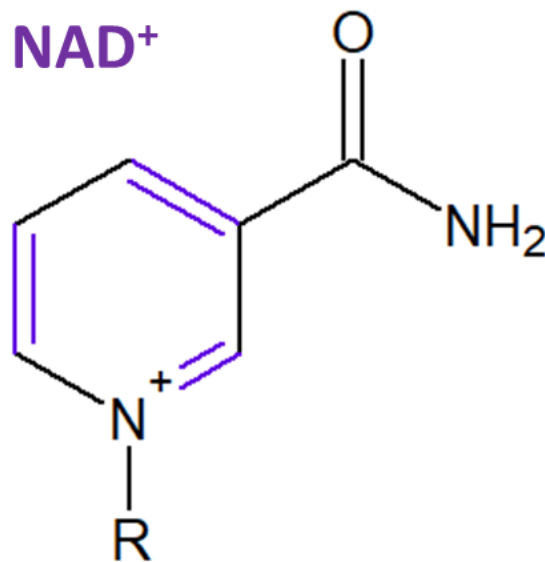
NADH - funkce

- úkol plní **v dýchacím řetězci**, kde energie uvolněná z oxidace NADH na NAD^+ je využita na energeticky náročný vznik ATP z ADP
- vysokoenergetické elektrony se nakonec spojují s molekulovým kyslíkem a s H^+ za vzniku vody

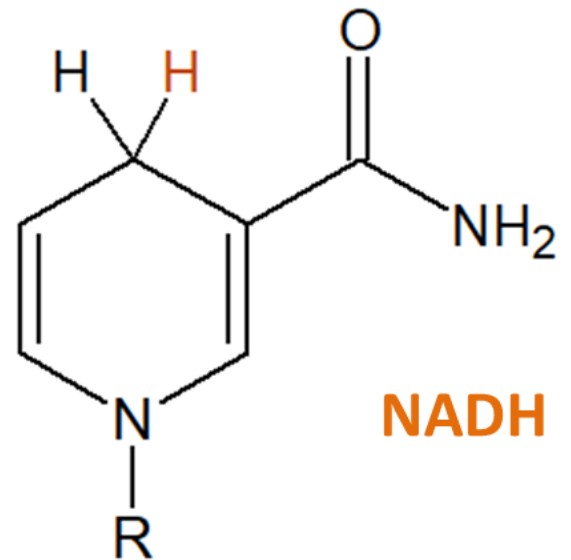


NADH – Proč je tak dobrým redukčním činidlem?

nikotinamidový
kruh

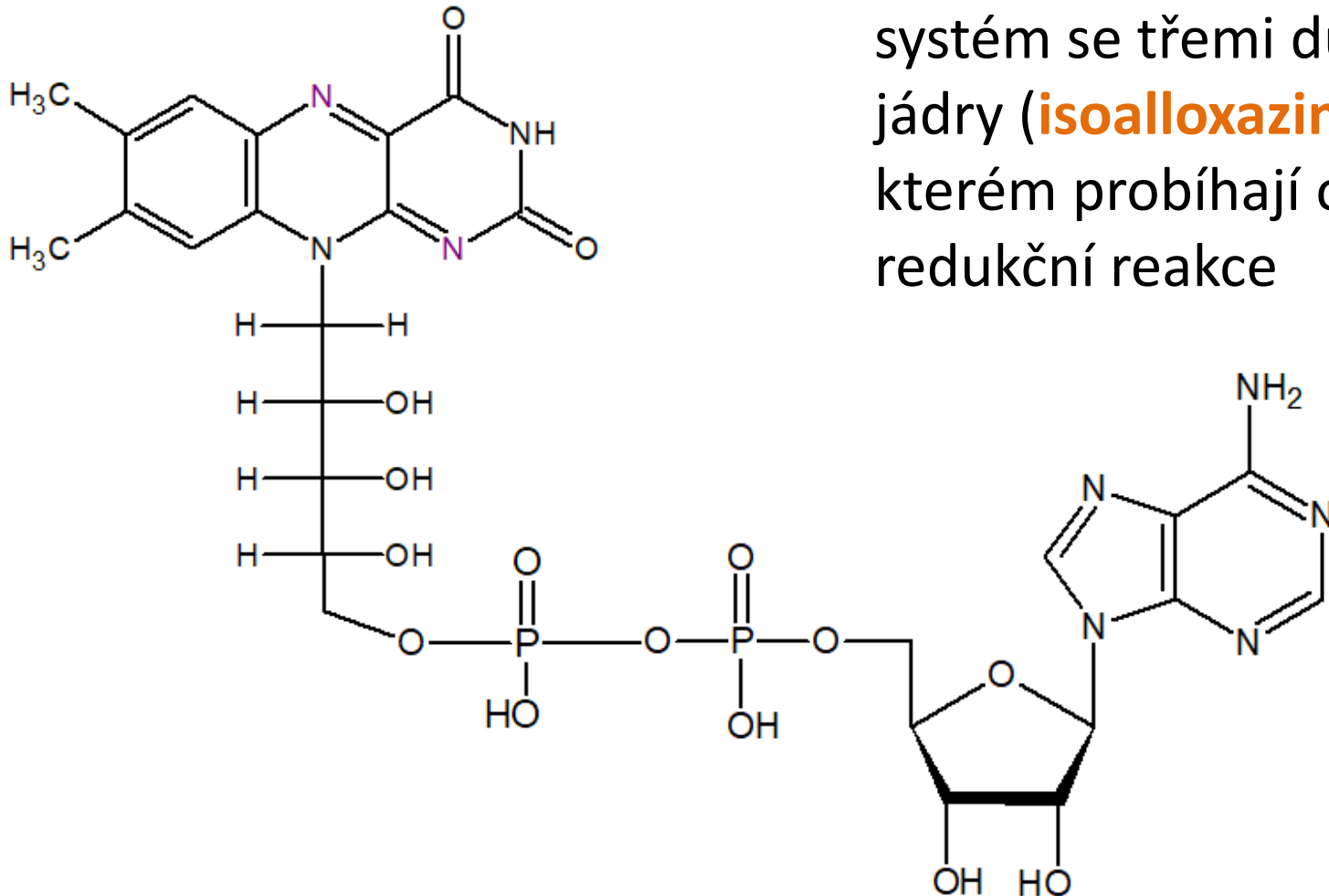


x

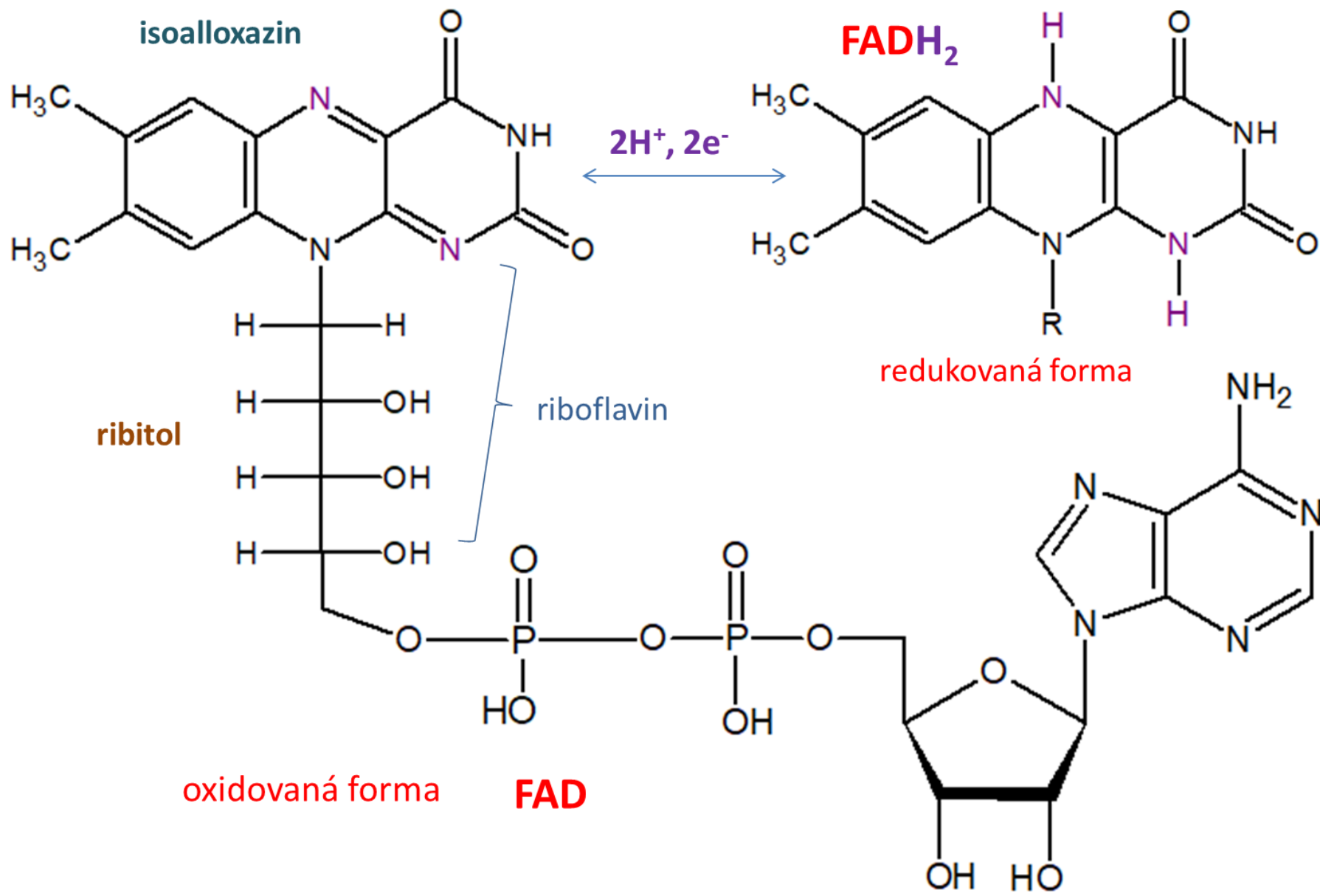


FADH₂ - flavinadeninindinukleotid

- **FAD** je tvořen adeninmononukleotidem: **adenin**, **ribosa** a **fosfát**, přes který se váže **další fosfát**, cukr **ribitol** a cyklický systém se třemi dusíkatými jádry (**isoalloxazin**), na kterém probíhají oxidačně-redukční reakce



FADH₂ – oxidačně-redukční reakce



FADH₂ – oxidačně-redukční reakce, funkce

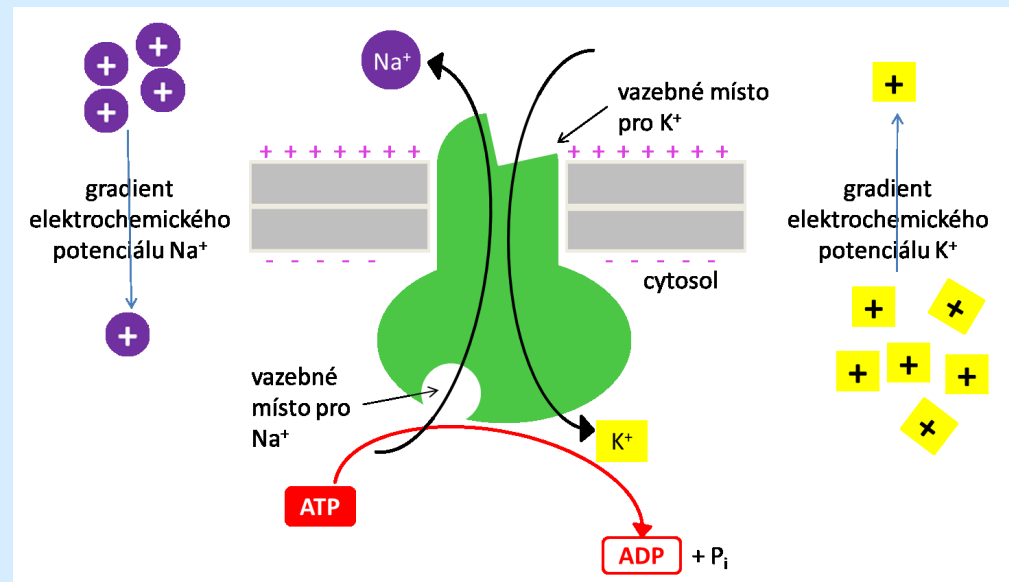
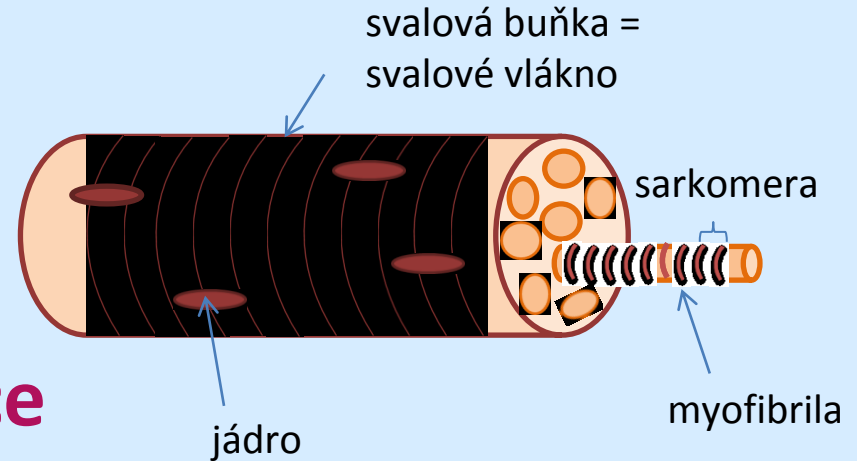
- **oxidovaná forma** má podobu **FAD**, redukovaná potom **FADH₂**, takže systém může přenášet **dva atomy vodíku** a **dva elektrony**
- FADH₂ vzniká v Krebsově cyklu nebo při oxidaci mastných kyselin na acetyl-CoA
- stejně jako NADH má za úkol **přenést elektrony a vodíky do dýchacího řetězce**
- FAD se obvykle účastní oxidace za tvorby alkenů (viz citrátový cyklus)

Procvičování

1. Jaké typy vazeb mohou být makroergické, ke každému typu přidej příklad.
2. Jak byste definovali ΔG ?
3. Proč vazby v ATP uvolňují snadno tolik E?
4. Jaká je funkce NADH a z čeho se skládá?
5. Kolik elektronů do elektrontransportního řetězce přenáší NADH a kolik $FADH_2$?

Možnosti využití energie vázané v ATP

- a) chemická práce
- b) mechanická práce**
- c) elektroosmotická práce**
- d) informační a regulační práce
- e) světelná energie
- f) teplo**

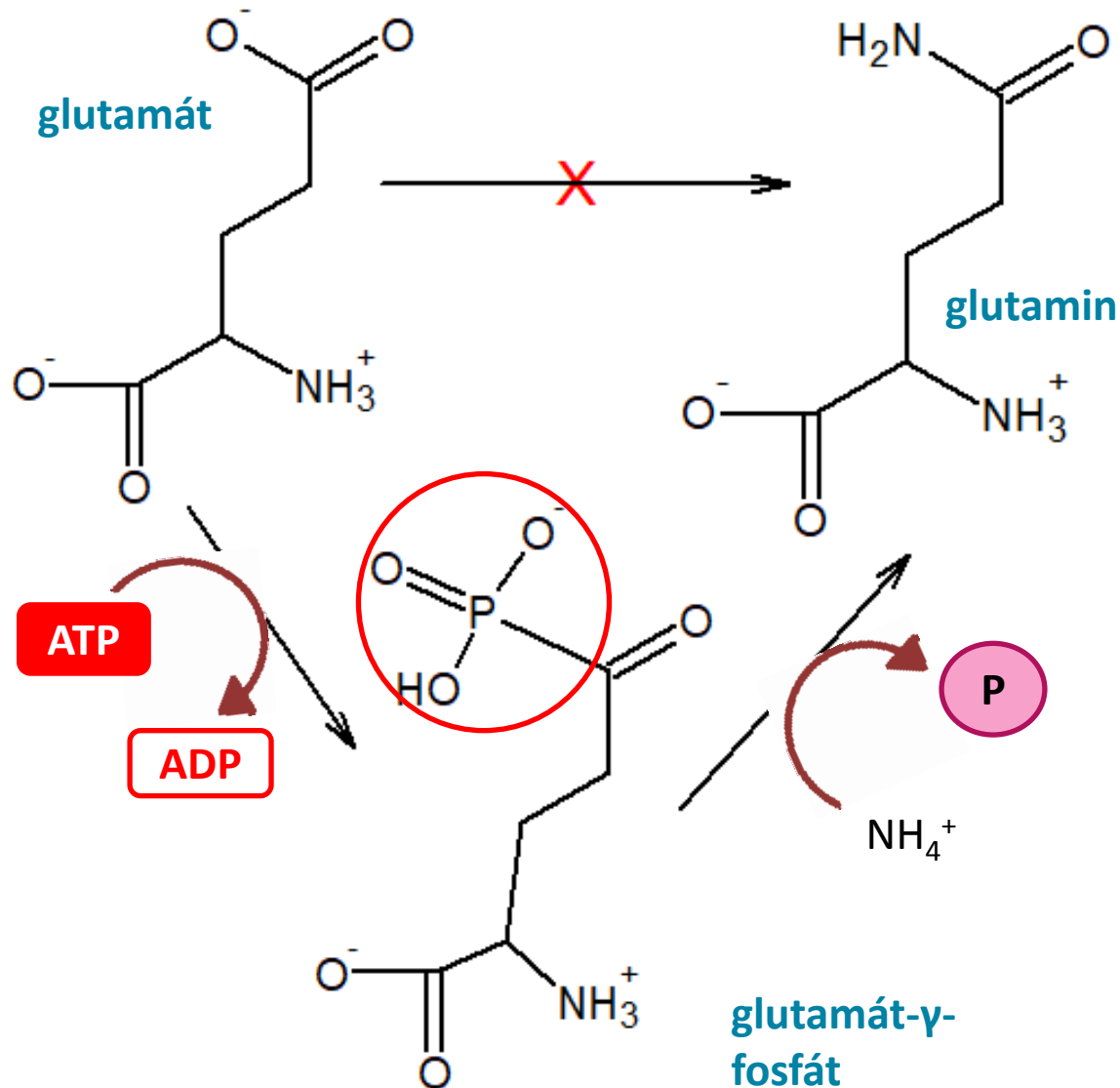


Možnosti využití energie vázané v ATP

a) chemická práce

- vzniká **energeticky bohatá sloučenina**
- $\text{ATP} + \text{glukosa} \rightarrow \text{glukosa-1-P} + \text{ADP}$
- ❖ **energetické spřáhování ?**
- ❖ využití E z exergonické hydrolýzy ATP pro procesy endergonické
- ❖ oba děje musí provázet společný meziprodukt

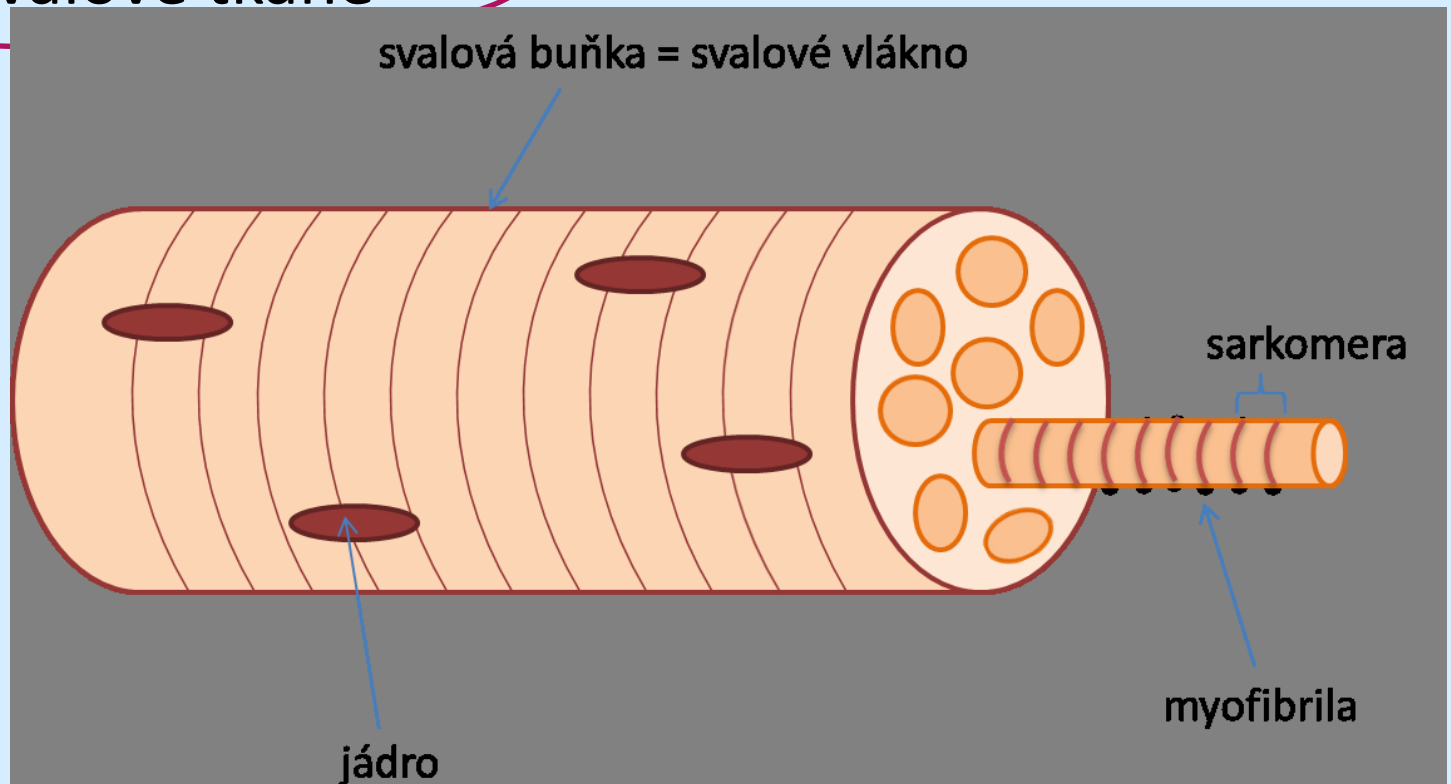




Možnosti využití energie vázané v ATP

b) mechanická práce

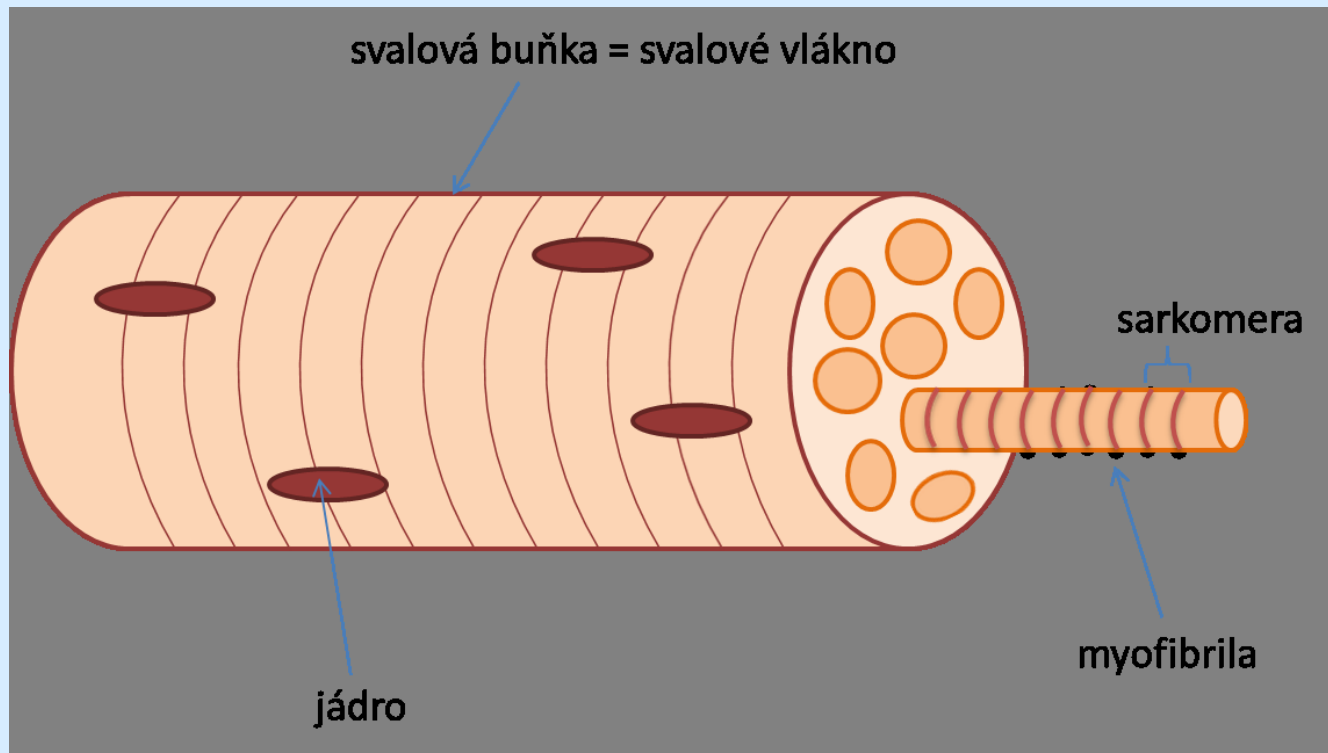
- buněčný pohyb přestavbou cytoskeletu
- pohyb makromolekul po vláknech mikrotubulů
- práce svalové tkáně



Možnosti využití energie vázané v ATP

b) mechanická práce

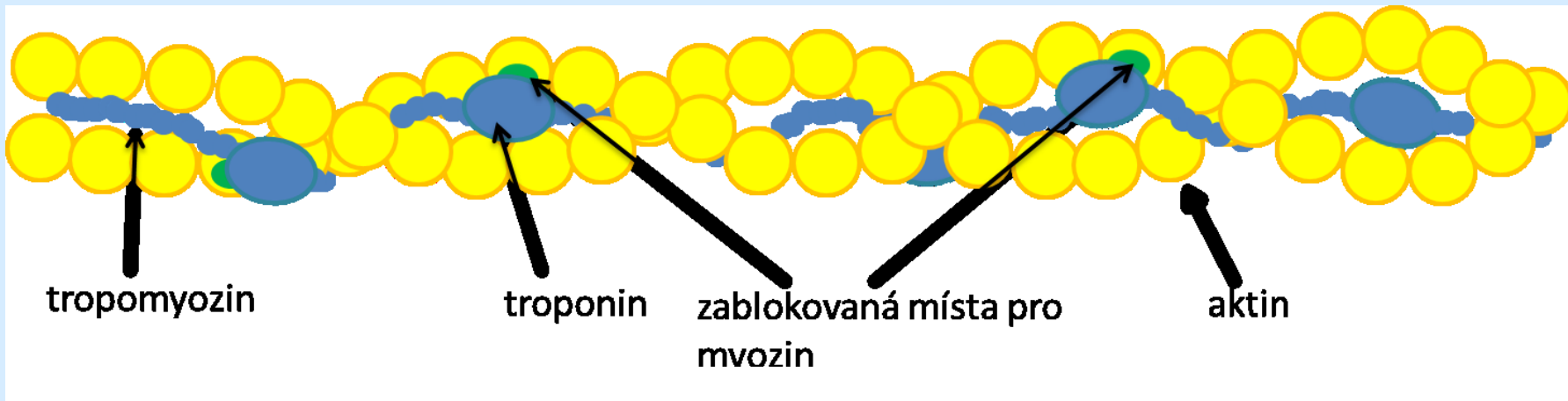
- svalová buňka se skládá z několika set podjednotek zvaných **myofibrily**
- každá myofibrila je podélně rozdělena na mnoho tzv. **kontraktilních jednotek** - **sarkomer**



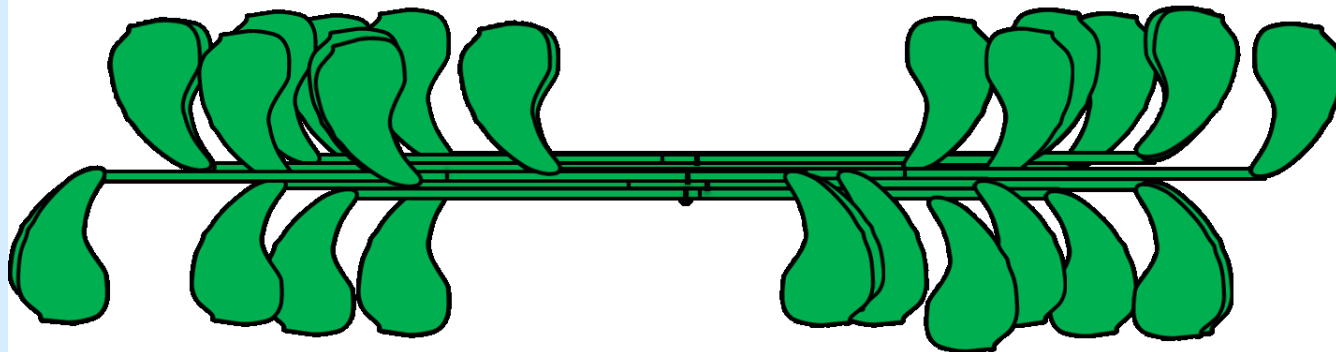
Možnosti využití energie vázané v ATP

a) mechanická práce

- sarkomera obsahuje vlákna **aktinu (tenčí)** a vlákna **myozinu (silnější)**



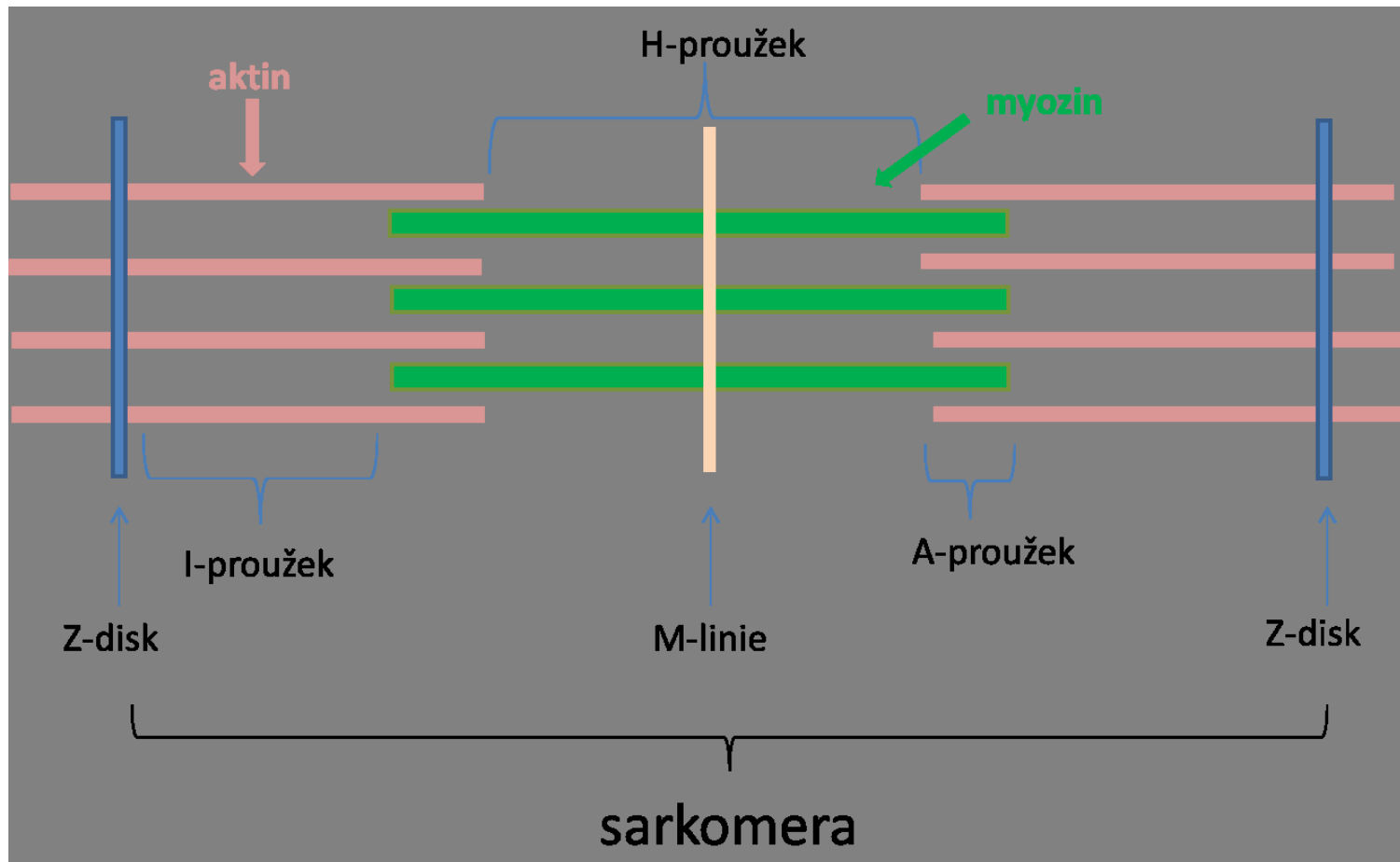
myozinové filamentum

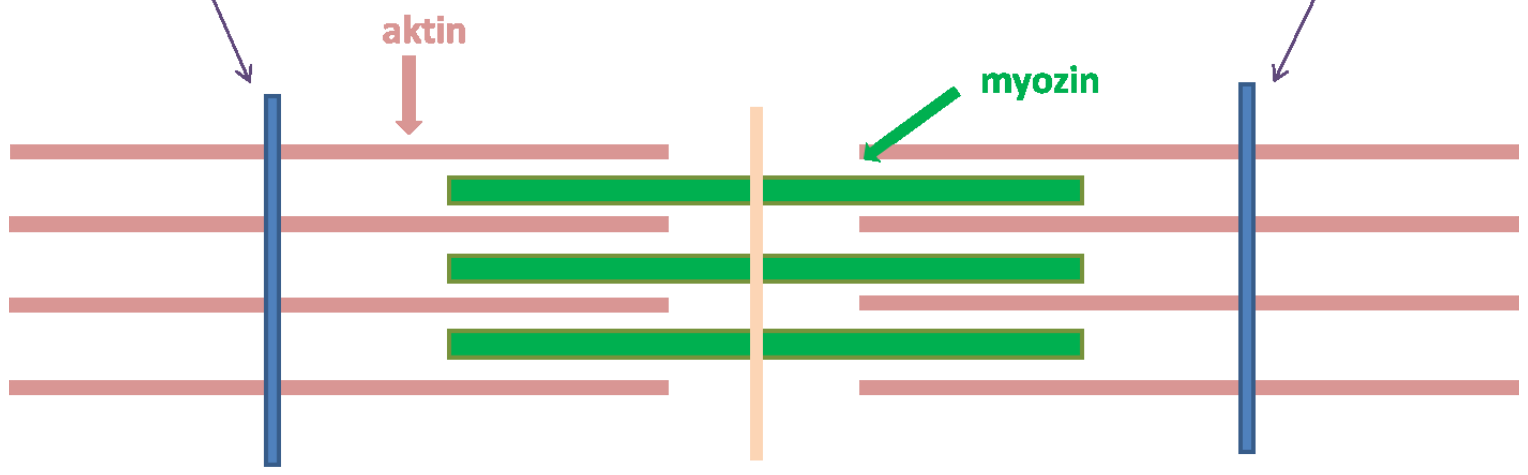
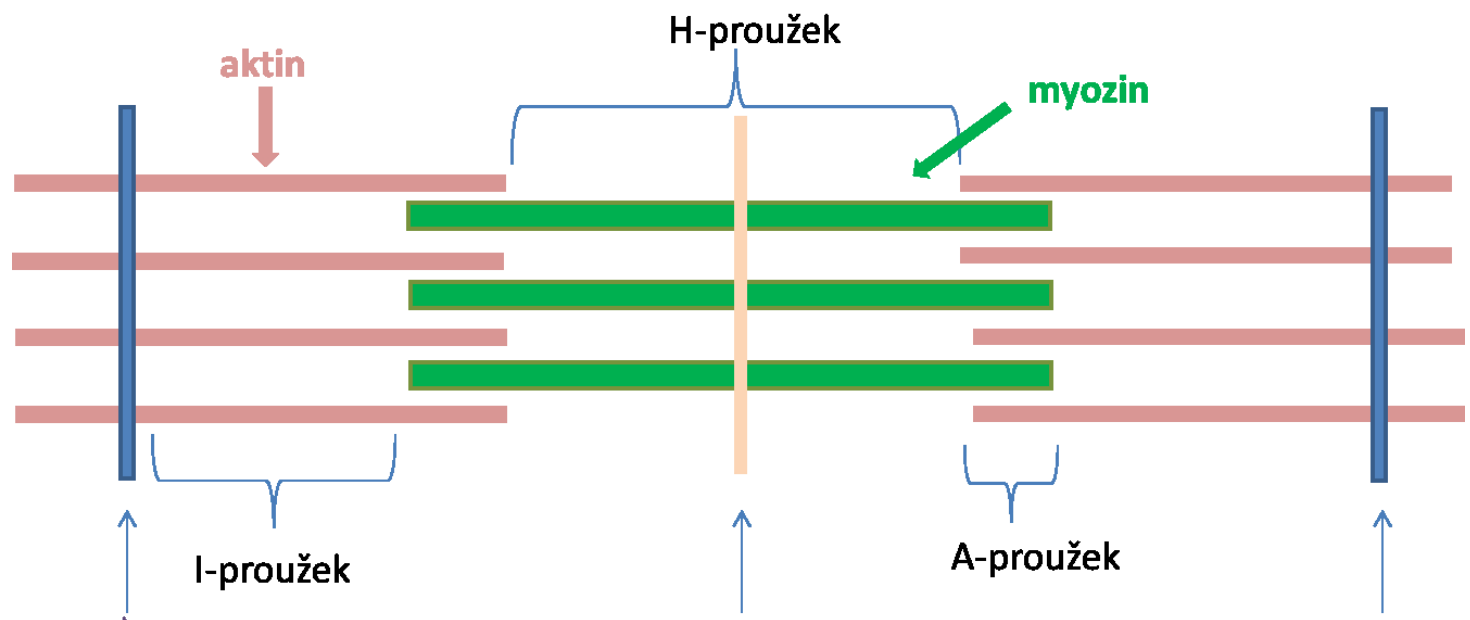


Možnosti využití energie vázané v ATP

b) mechanická práce

- svalový stah je způsoben teleskopickým nasouváním aktinu na myozin za současného zkrácení sarkomery

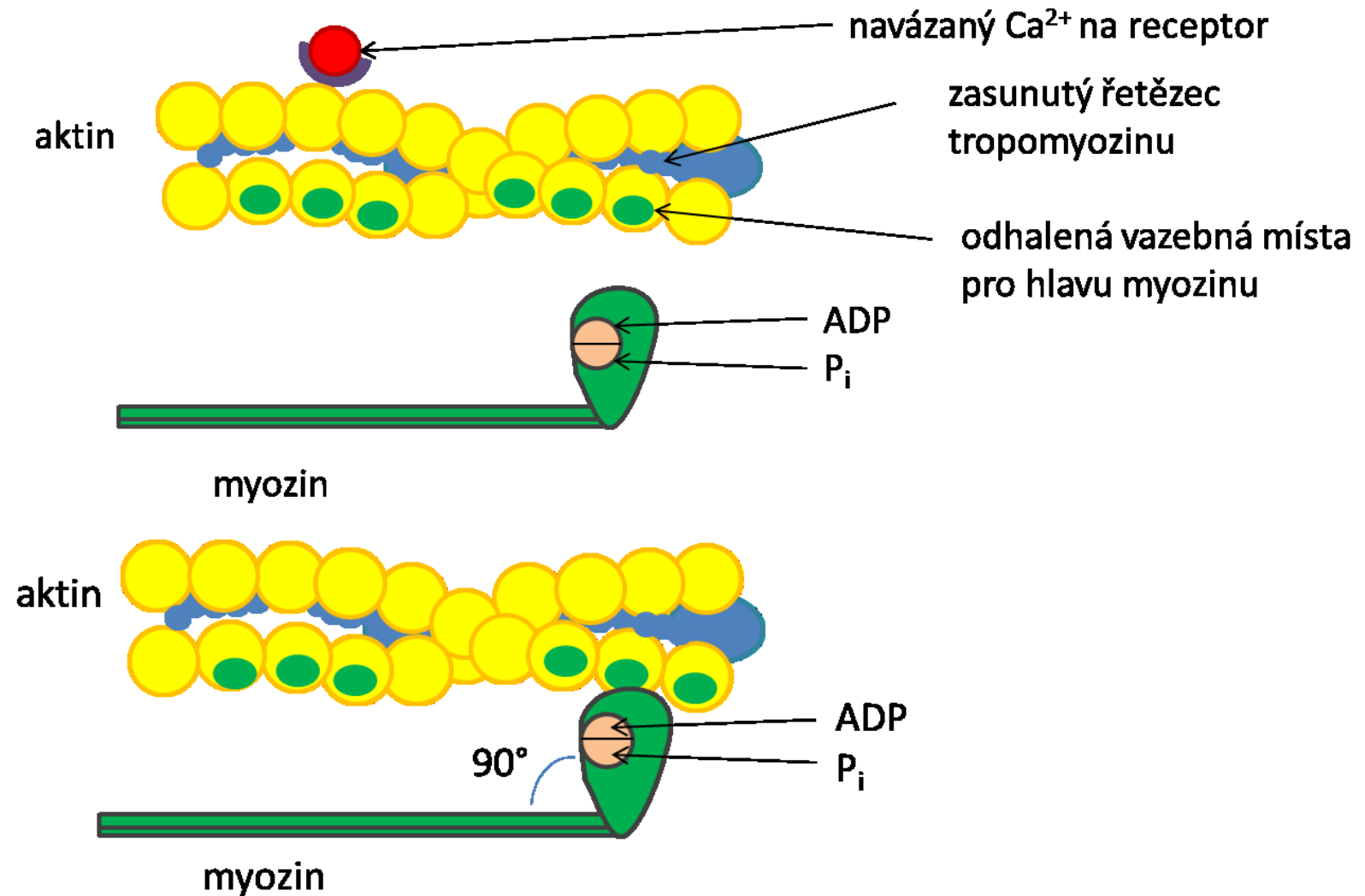




zkrácení sarkomery

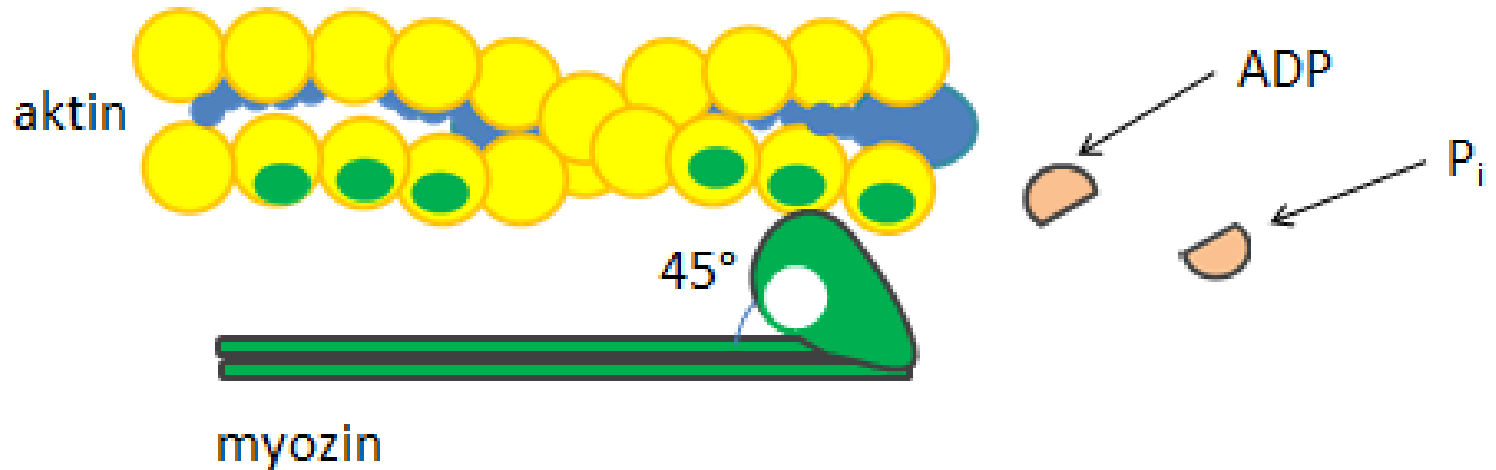
Možnosti využití energie vázané v ATP

b) mechanická práce, role ATP v aktinomyozinovém komplexu



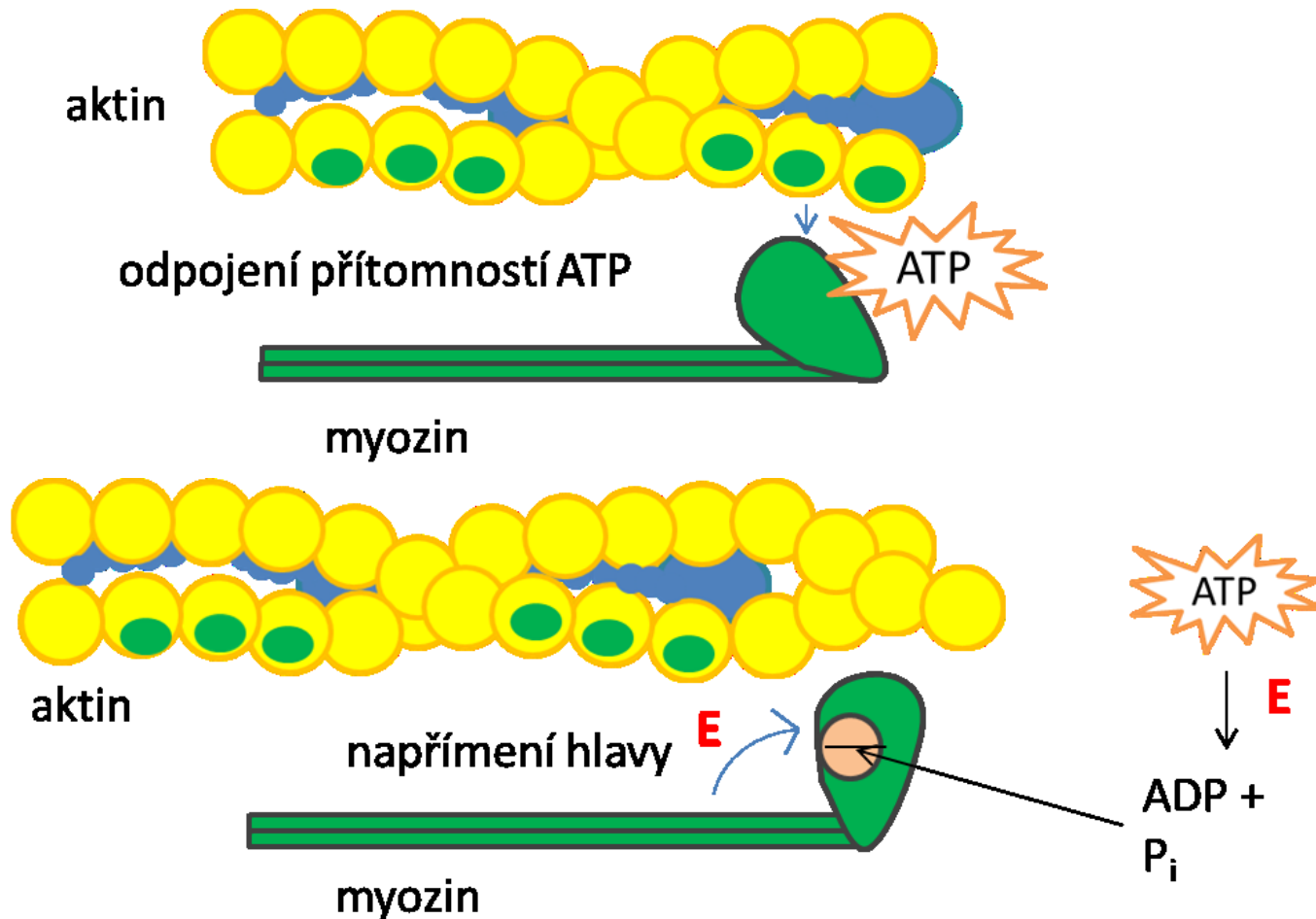
Možnosti využití energie vázané v ATP

b) mechanická práce, role ATP v aktinomyozinovém komplexu



Možnosti využití energie vázané v ATP

b) mechanická práce, role ATP v aktinomyozinovém komplexu



Opakování

- Nakresli nikotinamid v oxidované formě a proved' jeho redukci.
- Proč se NADH snadno oxiduje?
- Proč se ATP lehce zbavuje krajní fosfátové skupiny?
- Jaký je energetický zisk hydrolýzy ATP?
- Jaký je celý název FADH_2 ?

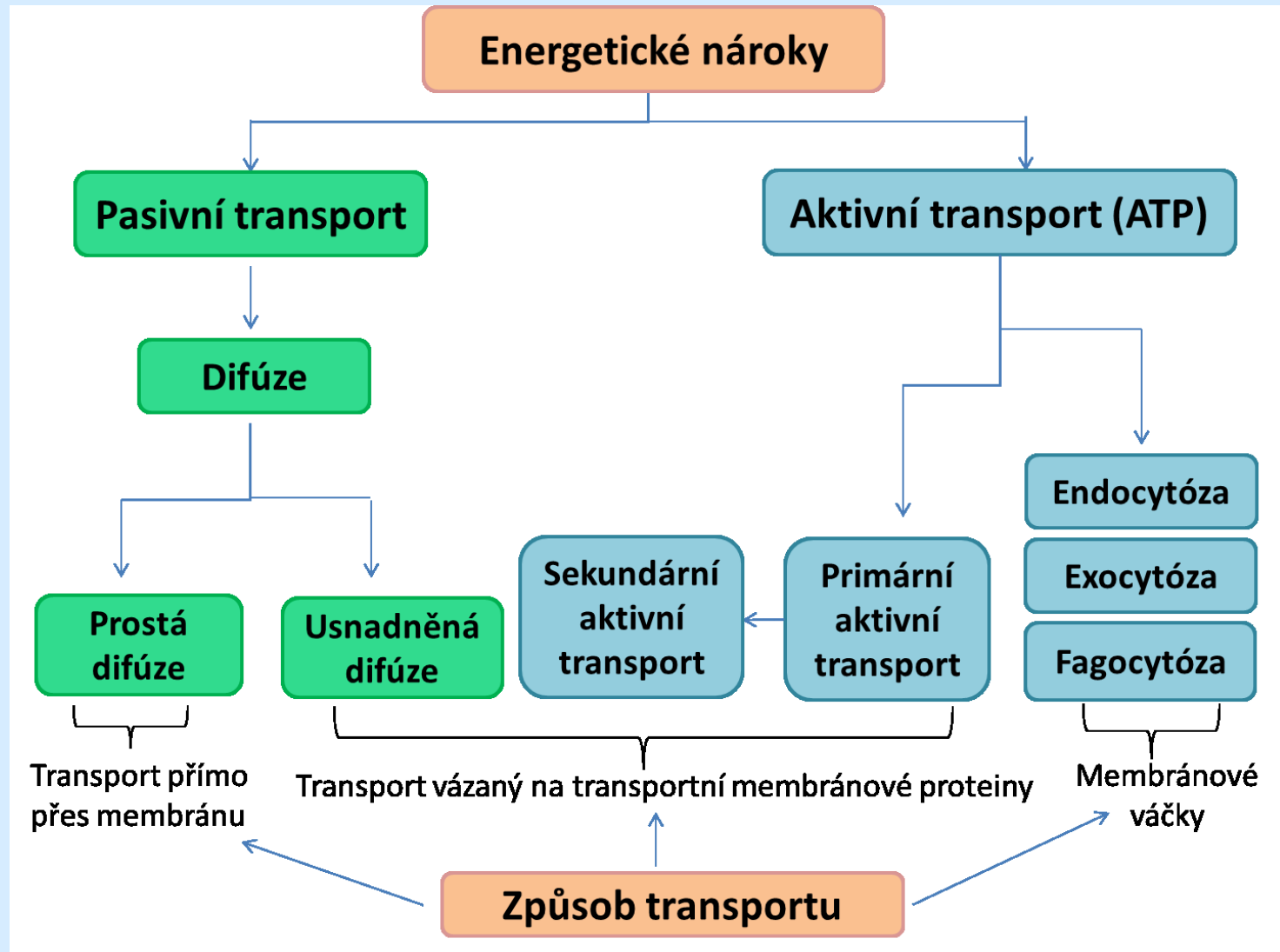
Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce

- živá buňka neustále **komunikuje s okolím**
- vyžaduje výměnu energie a hmoty s vnějším prostředím, což přispívá k udržení **homeostázy** celého organismu
- komunikaci zajišťuje **cytoplazmatická membrána** z fosfolipidové dvojvrstvy, která je propustná jen pro určité látky (semipermeabilní)
- většina látek se do buňky musí dostat pomocí **buněčných transportních mechanismů** buď **aktivně za spotřebování energie (ATP)** nebo pasivně difúzí

Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce



Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce

Z hlediska způsobu průchodu přes membránu:

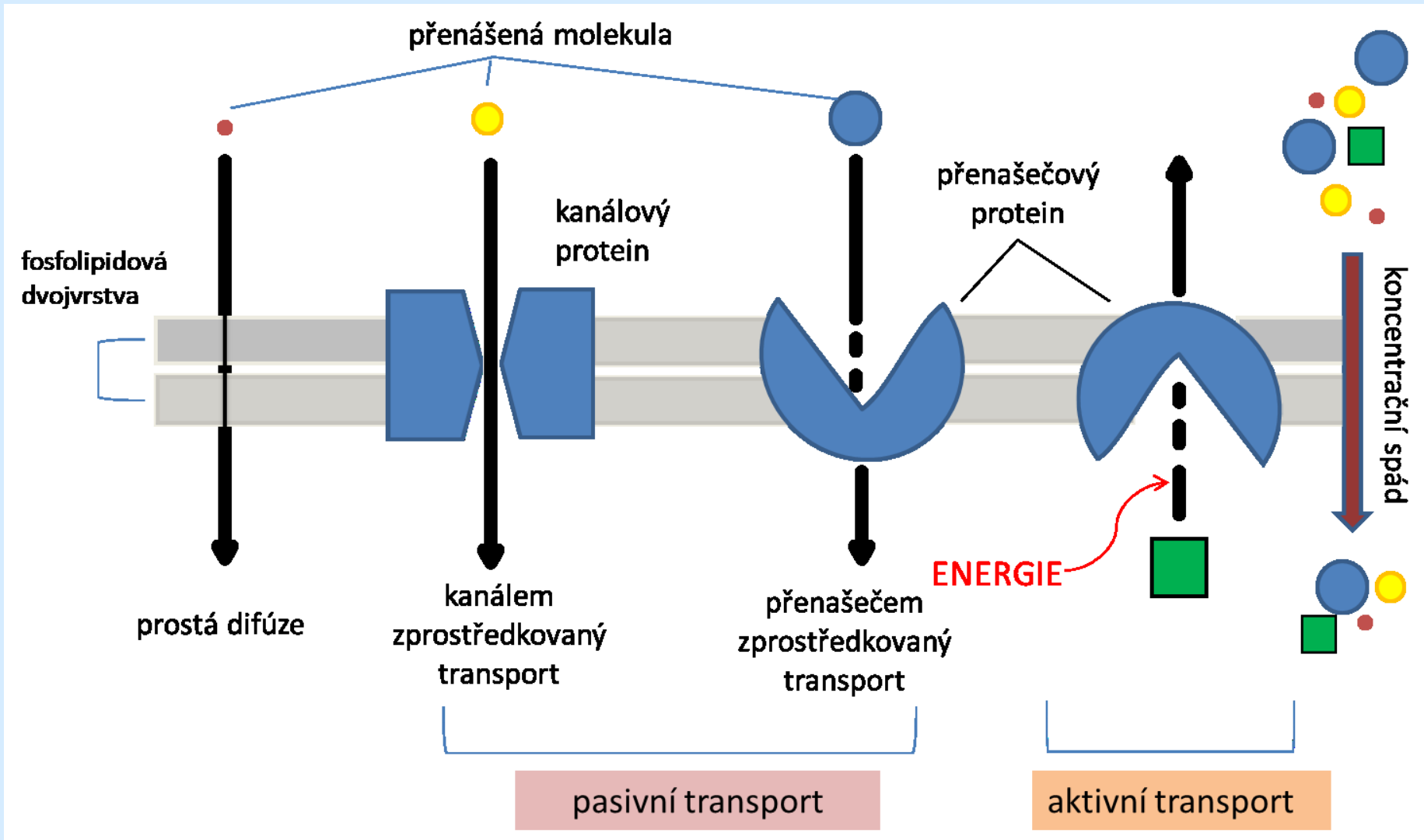
- **přímý** transport
- transport prostřednictvím **membránových proteinů (přenašeče, kanály)**
- transport pomocí **membránových váček (exo/endocytóza, fagocytóza)**

Z hlediska energetických nároků:

- **pasivně difúzí**
- **aktivně** za spotřeby **ATP**

Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce



Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce

- přenašeče pro látky s **polárním charakterem, elektrickým nábojem** nebo pro látky **přílišné velikosti**
- mohou fungovat jak **pasivně**, kde hnací silou je koncentrační gradient přenášené látky (tzv. **usnadněná difúze**)
- **aktivně** - transport částic **proti** koncentračnímu spádu **za spotřeby ATP**

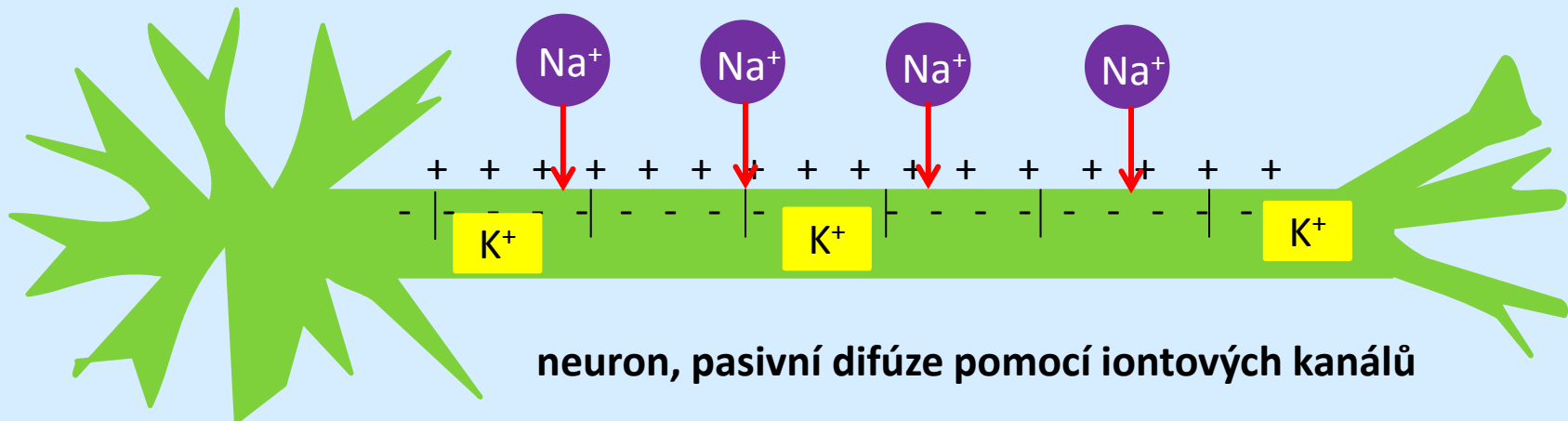
Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce

Přenos nervového vzruchu:

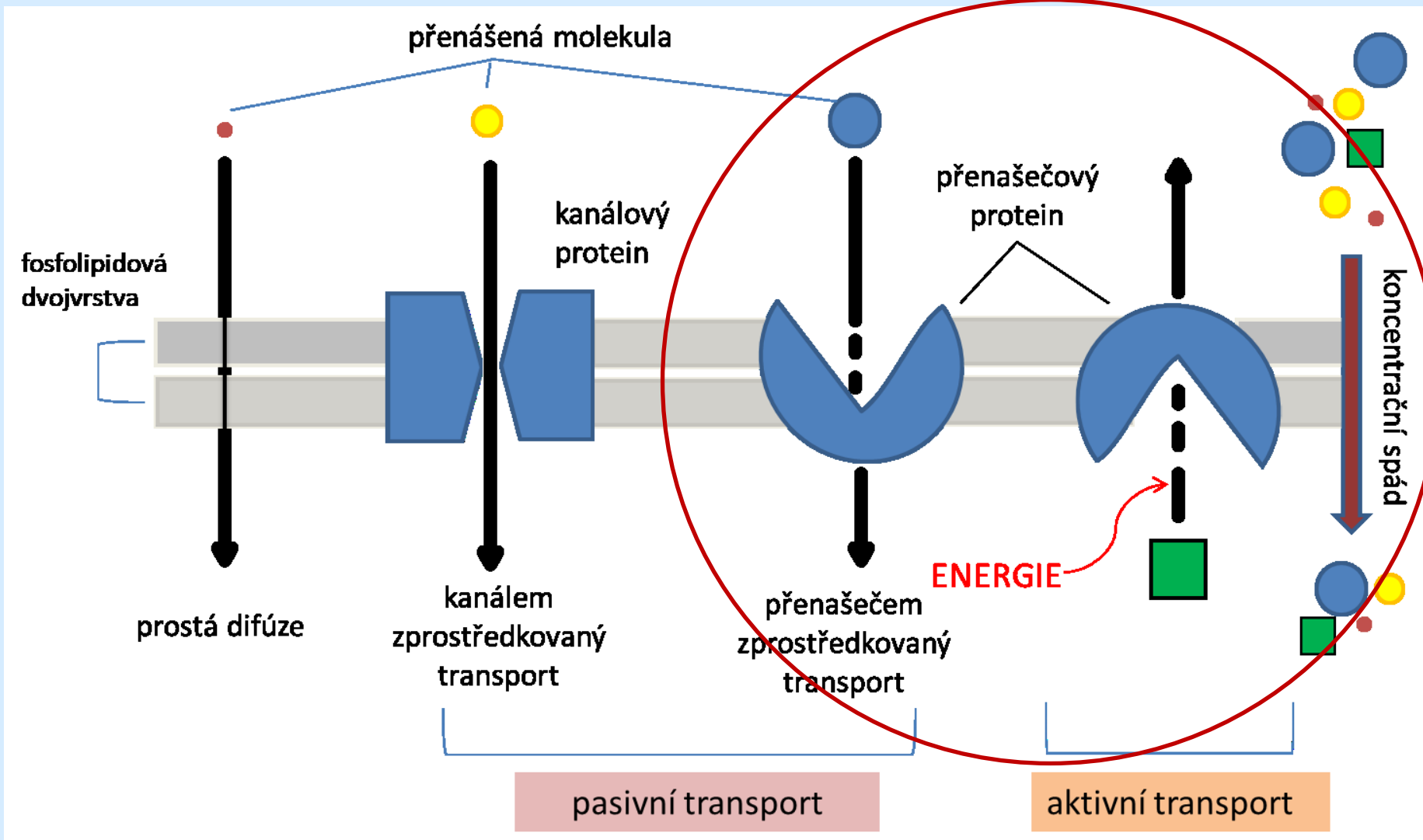
Prostředí	Koncentrace iontů (mmol/dm ³)					
	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻
uvnitř buňky	12	139	4	< 10 ⁻³	0,8	12
v okolí buňky	145	4	116	1,8	1,5	24

gradient elektrochemického potenciálu



Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce

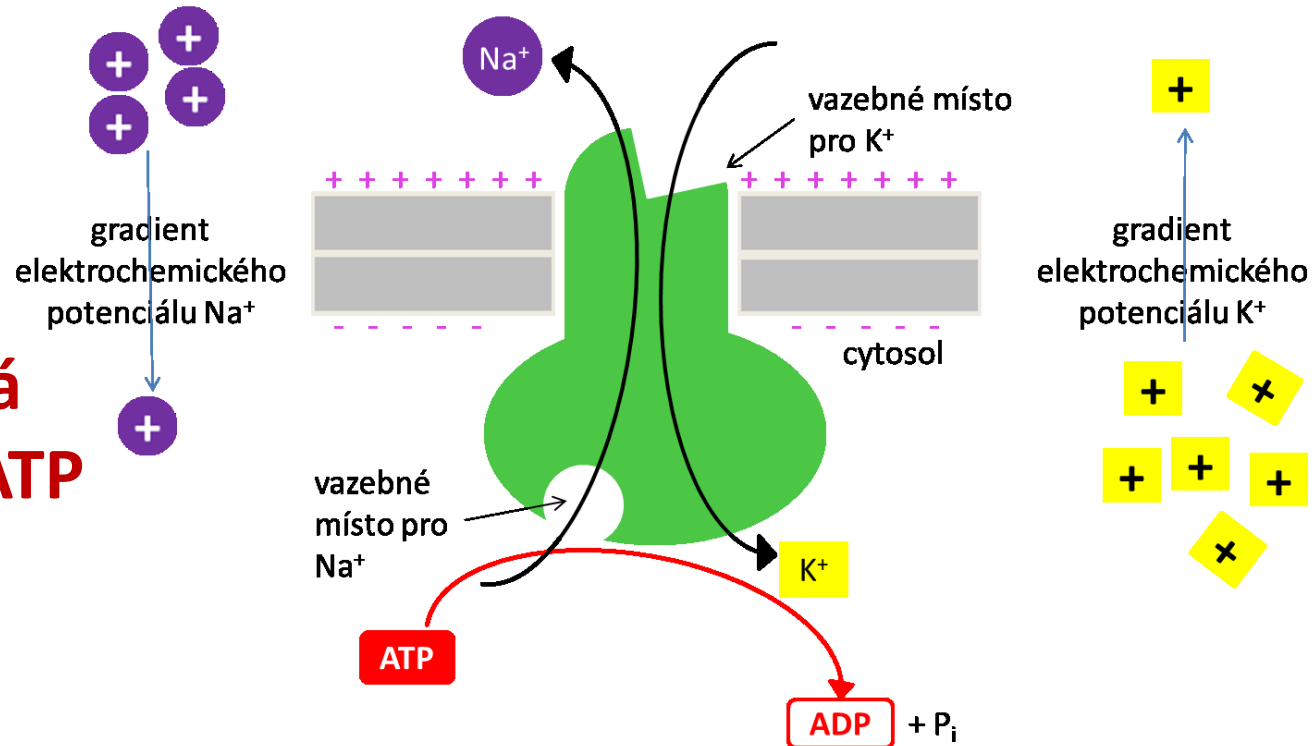


Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce

- těmto aktivně fungujícím přenašečům se říká **pumpy**
- **iontovými pumpami** je aktivně (endergoně) udržován rozdíl mezi rozdělením látek a iontů vně a uvnitř živočišné buňky

- pohonem pump je **exergonická hydrolýza ATP**



Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce

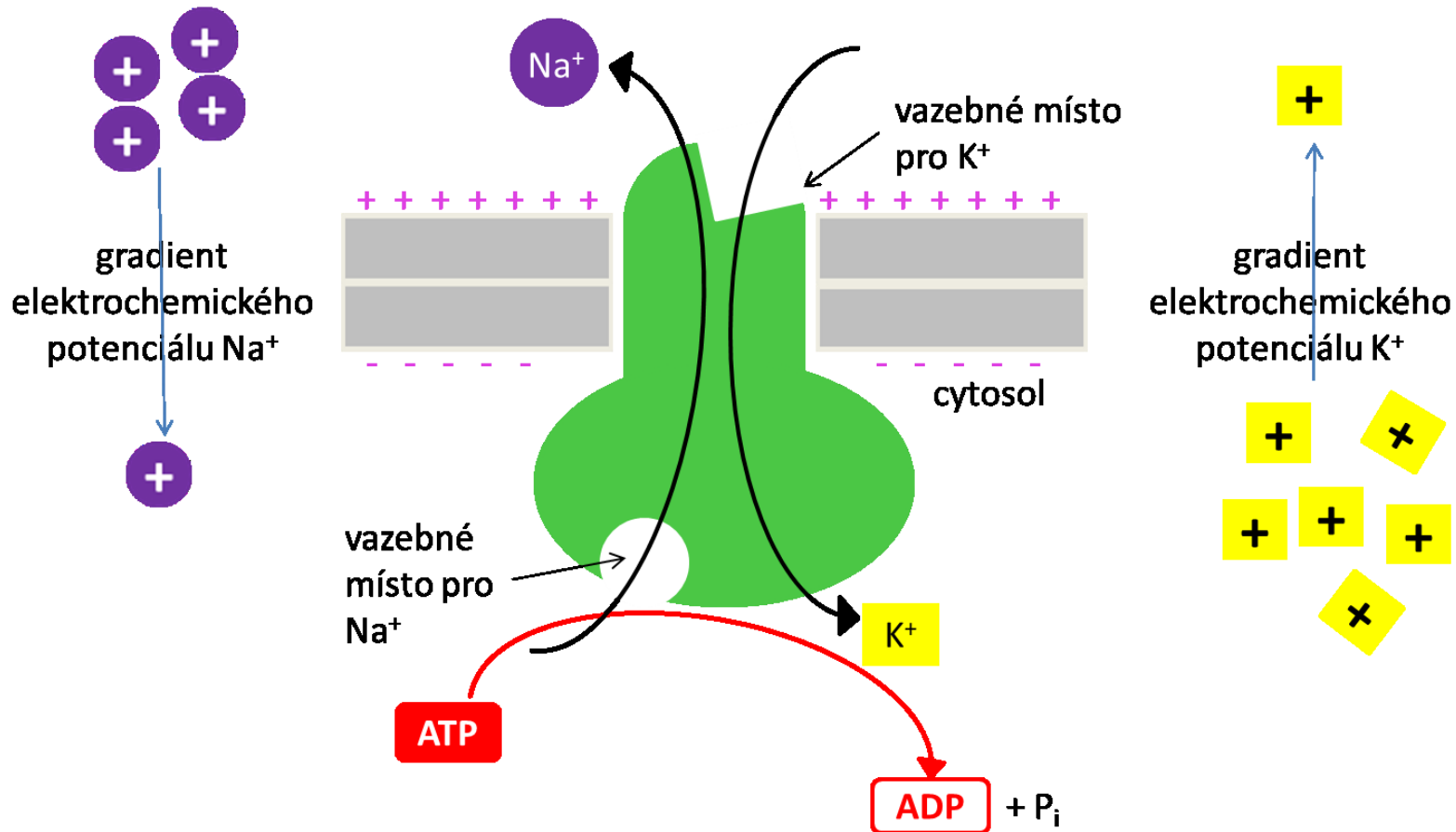
Na⁺, K⁺ -ATPáza

- současně čerpá Na⁺ ionty z buňky **ven** a K⁺ ionty **do** buňky
- využívá až **30 %** veškeré ATP
- musí totiž neustále odčerpávat Na⁺ ionty z buňky, které jsou dovnitř hnány silným el.chem. potenciálem
- udržuje tak koncentraci Na⁺ v cytosolu 10-30x nižší a koncentrace K⁺ 30x vyšší než mimo buňku

Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce

Primárně aktivní transport - Na^+ , K^+ -ATPáza (sodno-draselná pumpa)



Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce

Na^+ , K^+ -ATPáza = sodno-draselná pumpa

1. Na^+ se váže na pumpu v **intracelulárním prostoru**, čímž aktivuje funkci proteinu
2. dochází k rozštěpení **ATP na ADP + P_i** a **navázání fosfátu** na pumpu
3. fosforylace pumpy způsobí **změnu konformace** pumpy a **uvolnění Na^+** do extracelulárního prostoru, současně se **uvolní místo pro K^+**
4. **navázáním K^+ dojde k odstranění fosfátové skupiny** (defosforylace) a pumpa se vrátí do výchozí polohy a **uvolní K^+ dovnitř** buňky

Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce

Na⁺, K⁺ -ATPáza = sodno-draselná pumpa

- při jednom cyklu dojde k přenosu 3 Na⁺ ven z buňky a 2 K⁺ dovnitř buňky = což udržuje **nerovnoměrné koncentrace iontů**

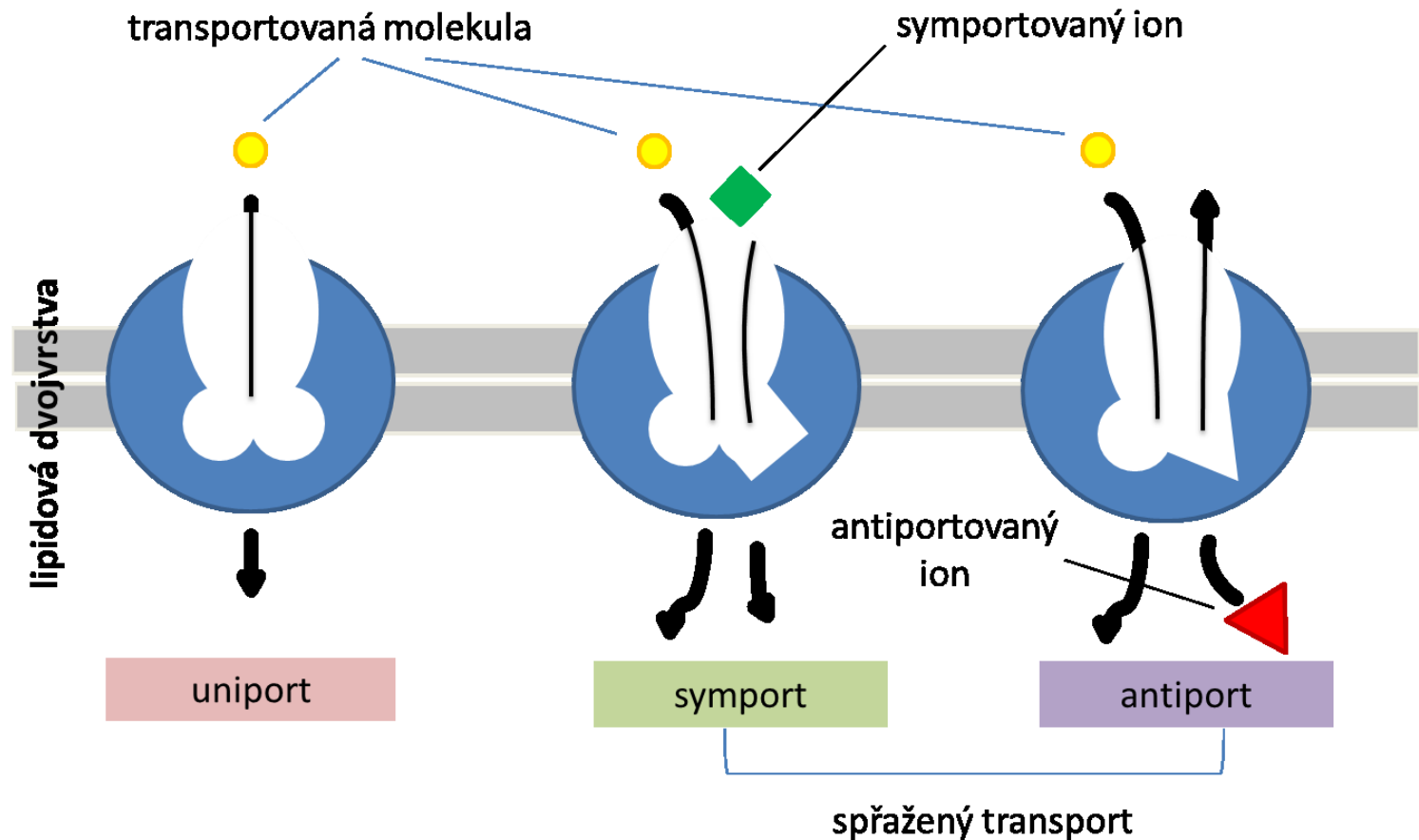
Prostředí	Koncentrace iontů (mmol/dm ³)					
	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻
uvnitř buňky	12	139	4	< 10 ⁻³	0,8	12
v okolí buňky	145	4	116	1,8	1,5	24

- **buňka je tak chráněná před plazmolýzou**
- primární aktivní transport

Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce

Transportní proteiny podle počtu přenášených částic a směru přenosu



Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce

Sekundárně aktivní transport – SGLT kanál

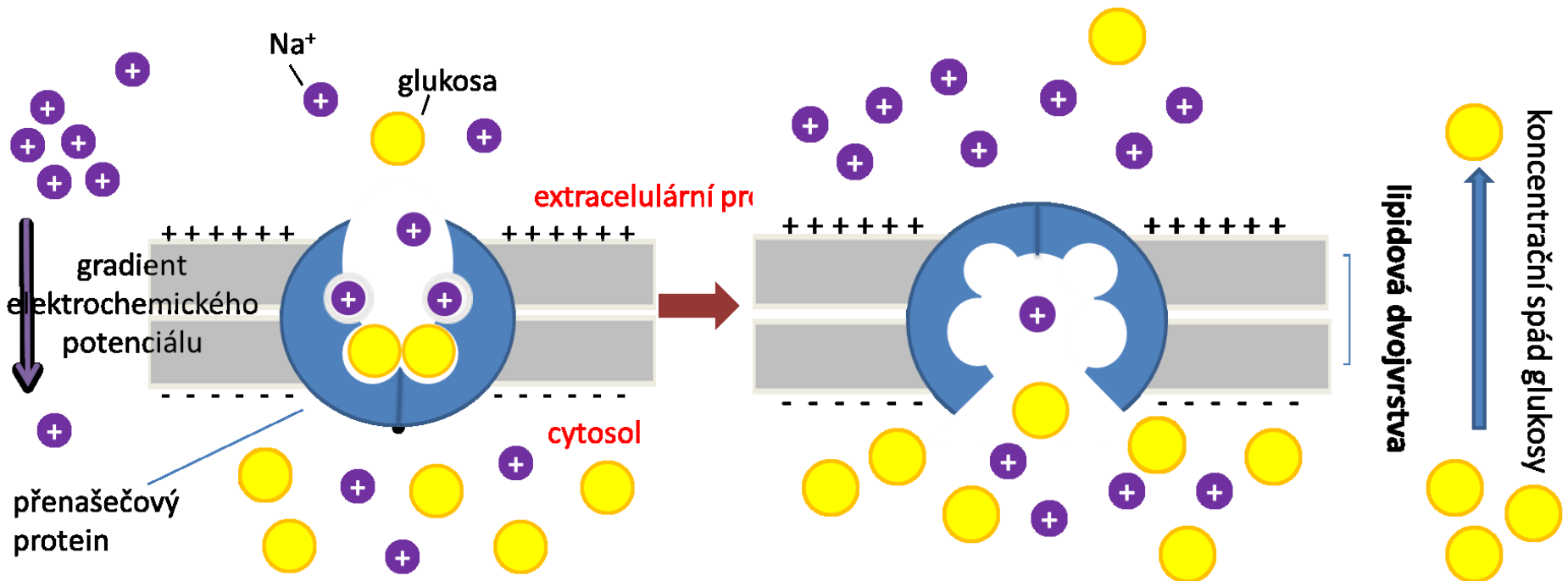
(sodium glukose transporter)

- látka přenášena **proti koncentračnímu spádu**, aniž by přenašeč přímo využíval ATP
- hnací silou je gradient jiné látky vzniklý v předchozím kroku, k jehož vytvoření se použila ATP dříve (přečerpání Na^+ z buňky)
- **symport** využívající tok Na^+ po směru el. chem. gradientu směrem dovnitř buňky **k přenosu glukózy do buňky**
- nachází se např. v epitelu střeva

Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce

Sekundárně aktivní transport – SGLT kanál
(sodium glukose transporter)



Možnosti využití energie vázané v ATP

c) elektroosmotická práce

Rostliny

- rostlinné buňky **nemají** ve svých membránách **sodno-draselné** pumpy
- pro transport dalších látek přes membránu využívají namísto gradientu Na^+ **elektrochemický gradient H^+**
- H^+ -ATPáza využívá hydrolýzu ATP k odčerpání H^+ z buňky a **je analogií** sodno-draselných pump u buněk živočišných

Možnosti využití energie vázané v ATP

d) informační a regulační práce

- energie potřebná k syntéze různých regulačních molekul (cAMP, hormonů, neurotransmitterů), které mají právě funkci regulační a informační

acetylcholin

testosteron

oxytocin

dopamin

serotonin

Možnosti využití energie vázané v ATP

e) světelná energie

- světelná energie vzniká při jevu zvaném **bioluminiscence**
- např. světlušky, světélkující medusy, ryby i bakterie
- tento jev je založen na vzniku **elektronově excitované látky**, která při přechodu do výchozího stavu vyzařuje určité kvantum energie **$h\nu$**
- obecně je látka vstupující do reakce nazývána **luciferin**, její oxidační dekarboxylací za účasti O_2 , **ATP** a enzymu **luciferasa** dochází k **vyzáření fotonu**
- účinnost tohoto procesu je po fyzikální stránce obrovská = **více než 90%**

Možnosti využití energie vázané v ATP

f) teplo

- **druhý termodynamický zákon** → nelze veškerou energii využít na práci, vždy část energie unikne do vnějšího prostředí ve formě tepla = odpadní forma energie (např. sval)

Jindy může docházet i k řízené produkci tepla:

- to je známé při využití energie pro výrobu tepla v hnědé tukové tkáni pro děj zvaný **netřesová termogeneze**.
- využívají ho např. **hibernující živočichové nebo novorozeňata**

Vytváření ATP

1. **substrátová fosforylace**
 2. **proton-motivní síla** → mitochondrie (oxidativní fosforylace), chloroplasty (fotosyntéza), popř. buněčné membrány bakterií
- Proč u bakterií ne v mitochondrii?



Vytváření ATP

1. substrátová fosforylace

- přenáší se fosfátový zbytek na ADP pomocí enzymů



- k substrátové fosforylaci dochází:
a) v **glykolýze** b) v **citrátovém cyklu**
- substrátová fosforylace je jediným zdrojem ATP pro buňky s fermentativním typem metabolismu

Vytváření ATP

METABOLIMUS

- jednou z cest tvorby ATP pro živočichy je získání energie z **přijímaných živin**, což úzce souvisí s metabolismem
- **metabolismus je soubor všech chemických procesů a přeměn energií, které buňka (popř. organismus) vykonává za účelem přežití**
- **jedná se propojený komplex enzymových reakcí**

Vytváření ATP

METABOLIMUS

katabolismus

anabolismus

exergonický děj

dráhy rozkladné

oxidace

endergonický děj

redukce

dráhy skladné

Vytváření ATP

METABOLIMUS

katabolismus

dráhy rozkladné

exergonický děj

oxidace

anabolismus

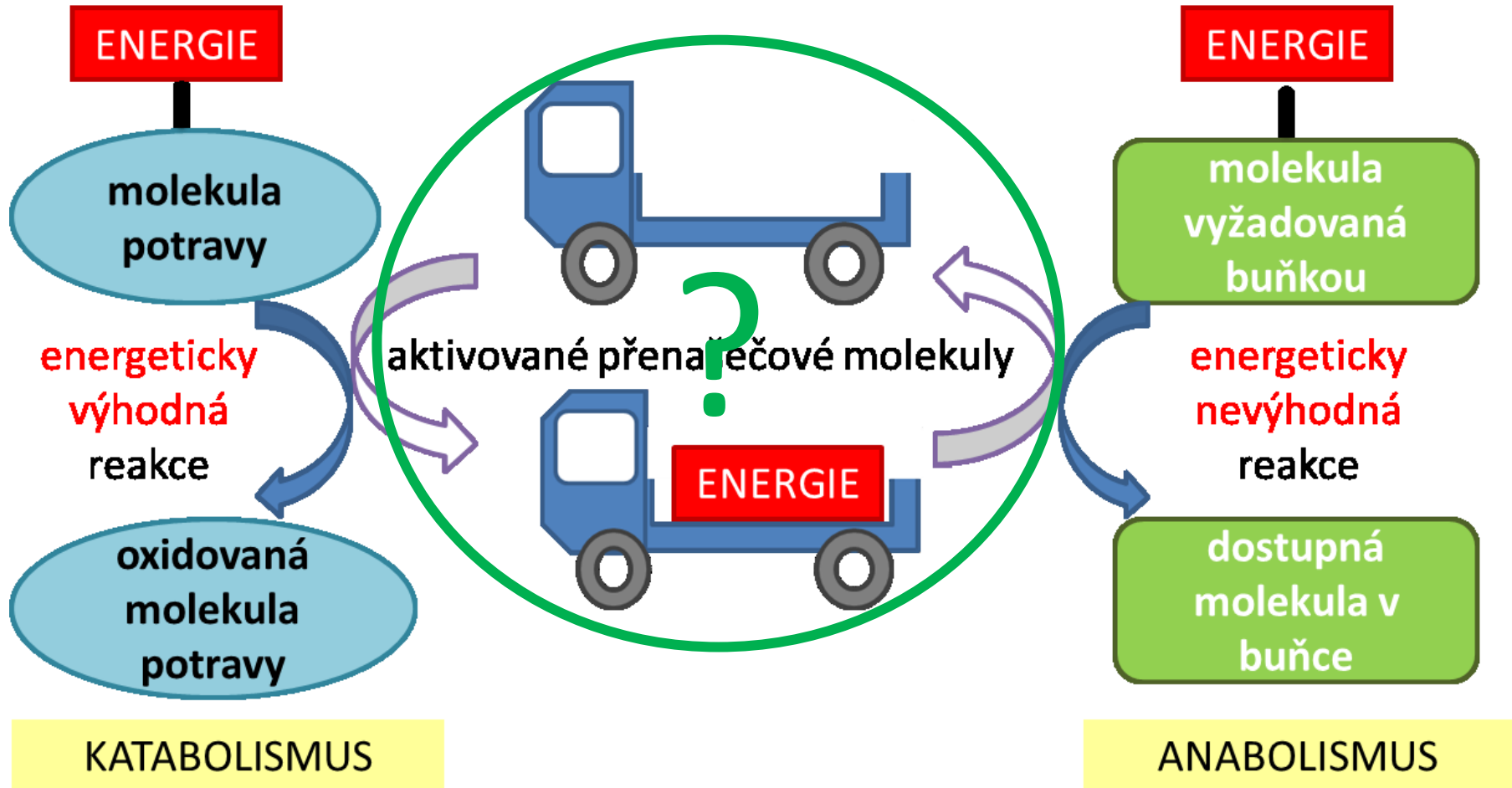
dráhy skladné

endergonický děj

redukce

Vytváření ATP

METABOLIMUS

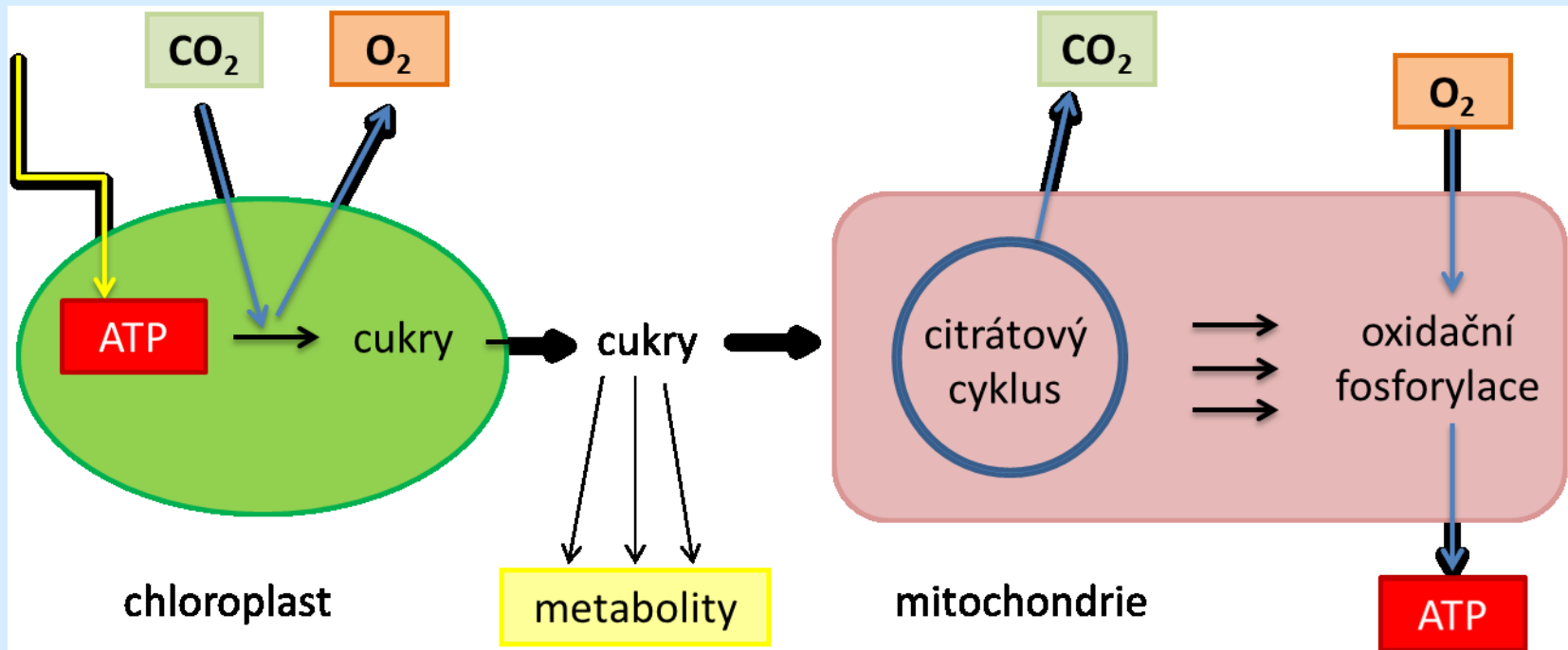


Vytváření ATP - METABOLIMUS

Typ výživy a metabolismu		Zdroj E	Zdroj C	Zdroj H	Organismy
autotrofní	fotoautotrofní	světlo	CO ₂	H ₂ O	rostliny, sinice
		světlo	CO ₂	H ₂ S, H ₂	fotoautotrofní organismy, siřné bakterie
	chemoautotrofní	oxidace anorg. látek	CO ₂	H ₂ O	chemoautotrofní organismy
heterotrofní	fotoheterotrofní	světlo	org. látky	org. látky	fotoheterotrofní bakterie
	chemoheterotrofní	oxidace org. látek	org. látky	org. látky	chemoheterotrofní bakterie, houby, živočichové, člověk

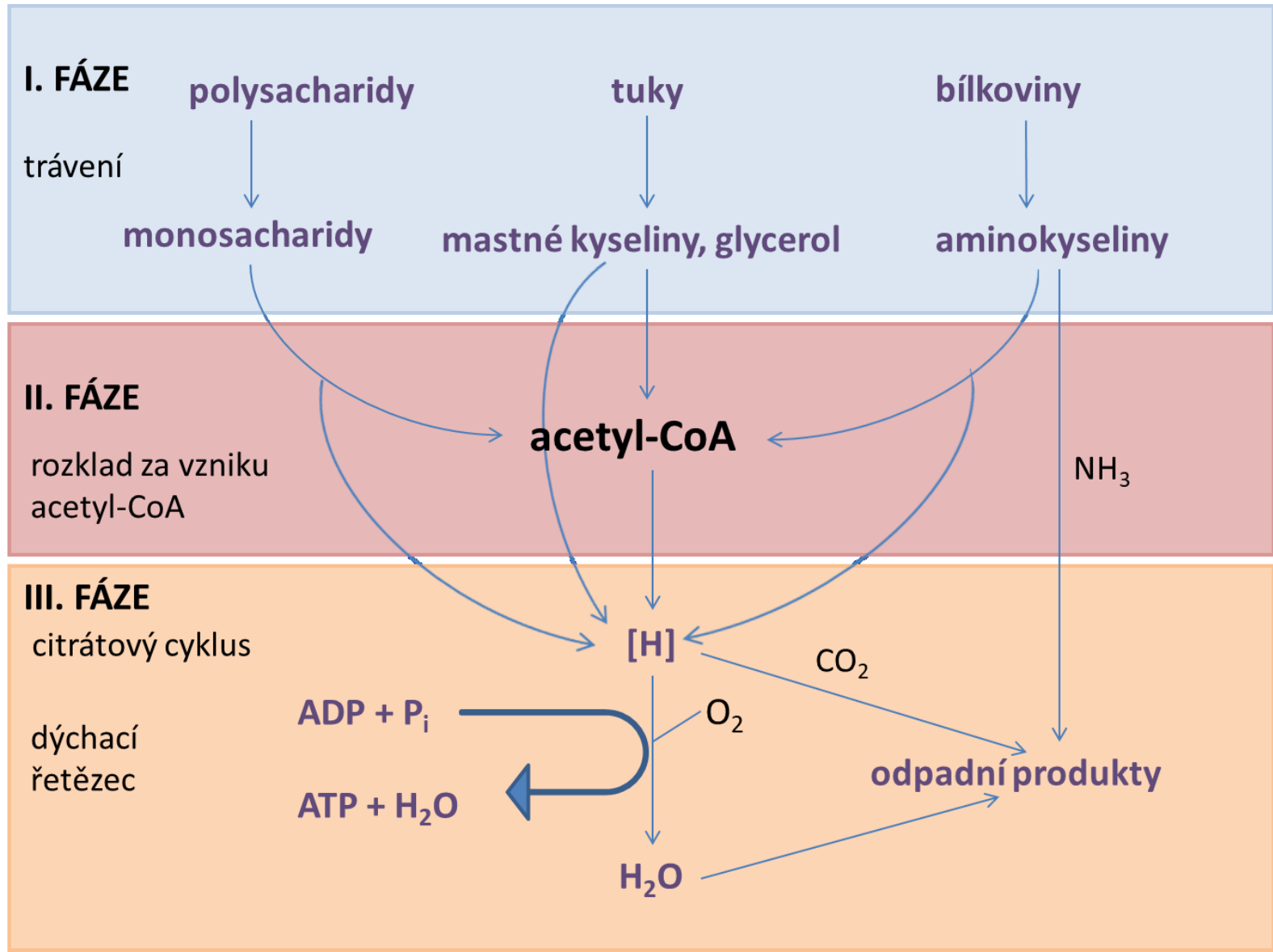
Vytváření ATP - METABOLIMUS

- rostlina si cukry syntetizuje sama procesem **fotosyntézy** v **chloroplastech**
- ty jsou potom rozváděny k **mitochondriím**, kde se využívají přesně stejné dráhy oxidačního odbourání cukrů jako u živočichů



Vytváření ATP – METABOLIMUS

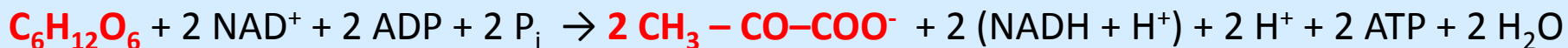
chemoheterotrofové - živočichové



Vytváření ATP

1. substrátová fosforylace - glykolýza

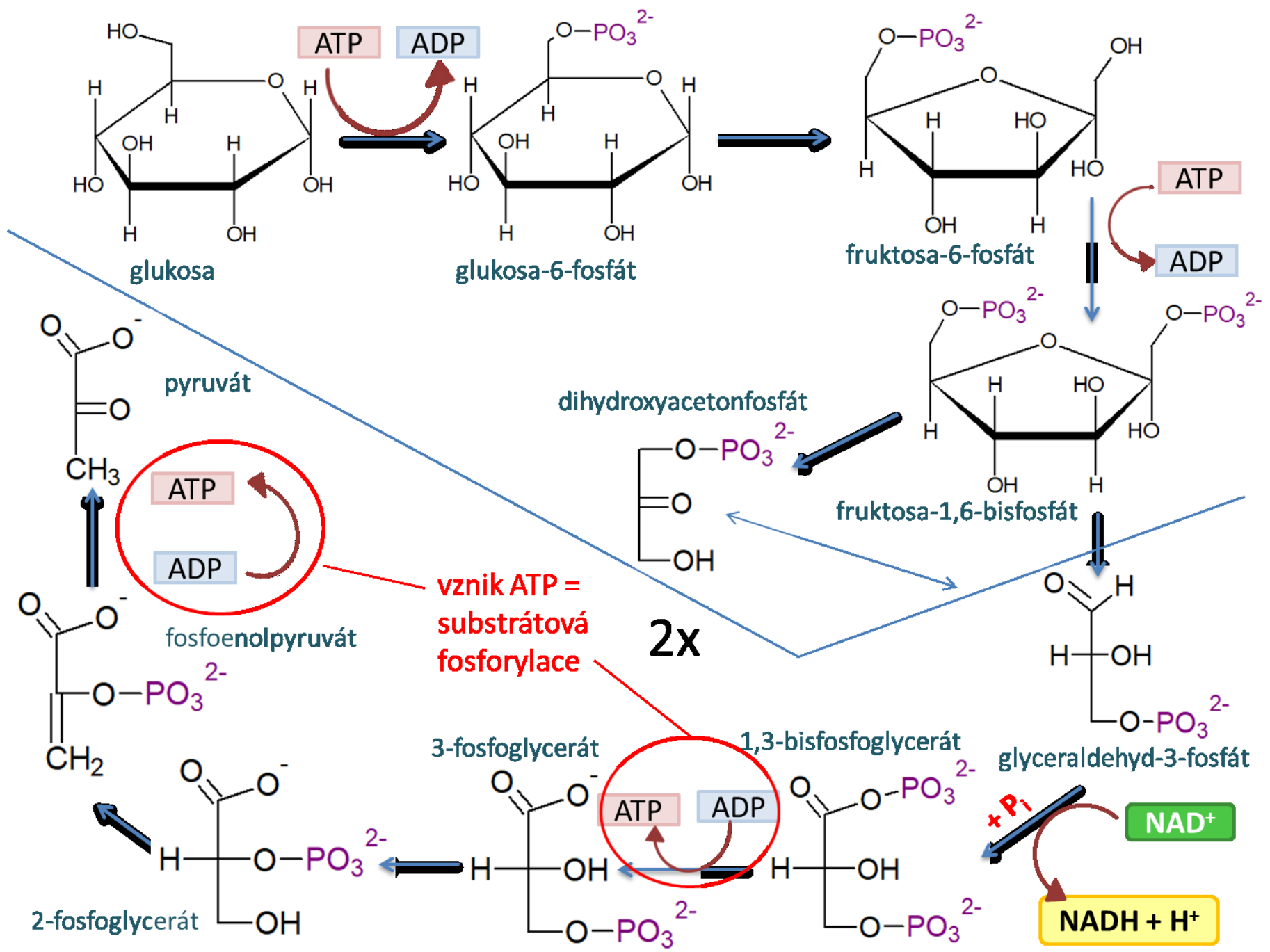
- odbourání glukosy ve sledu reakcí → vytváří ATP bez přítomnosti kyslíku
- probíhá v cytosolu a je přítomna u většiny buněk a u anaerobních organismů



D-glukosa

pyruvát

- výsledkem aerobní glykolýzy jsou 2 molekuly ATP, 2 molekuly pyruvátu a 2 molekuly NADH, které spolu s pyruvátem vstupují do mitochondrie, kde se dále metabolizují



Vytváření ATP

1. substrátová fosforylace - glykolýza

- získaná energie z oxidace glukosy je tak uložena do vysokoenergetické vazby v ATP a část zůstává uložena v elektronech s vysokým obsahem energie, které přenáší NADH
- Kde probíhá glykolýza?
- Kam putuje NADH?
- Jaký je princip substrátové fosforylace?
- Co je výsledkem konečného zpracování pyruvátu?

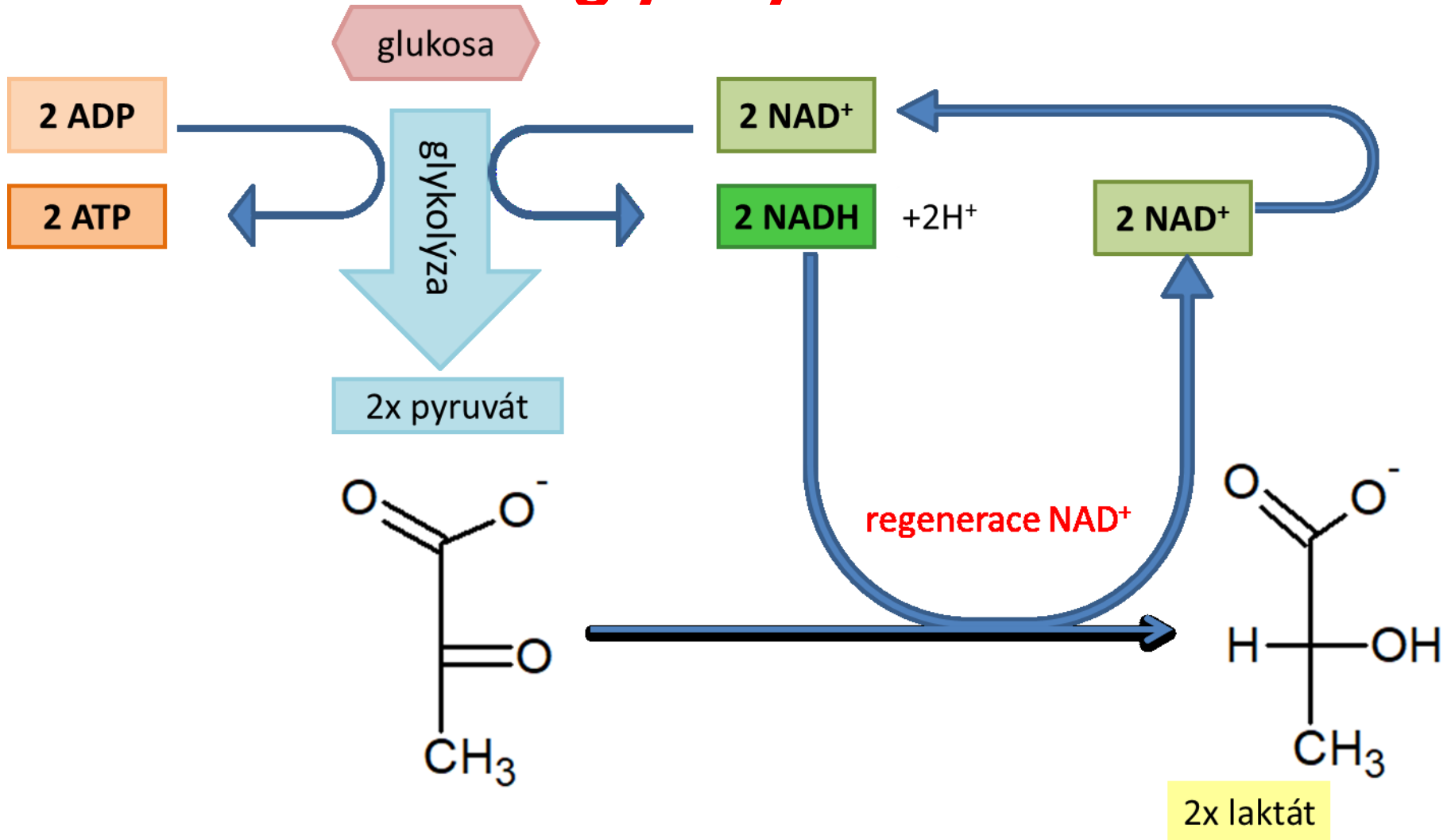
Vytváření ATP

1. substrátová fosforylace – anaerobní glykolýza

- společné s aerobní glykolýzou: **2 ATP, 2 NADH**
- **pyruvát** však nepokračuje do mitochondrie na dýchací řetězec, ale dochází ke vzniku produktů kvašení – **laktát** nebo **ethanol**
- Proč? → aby došlo k reoxidaci NADH!

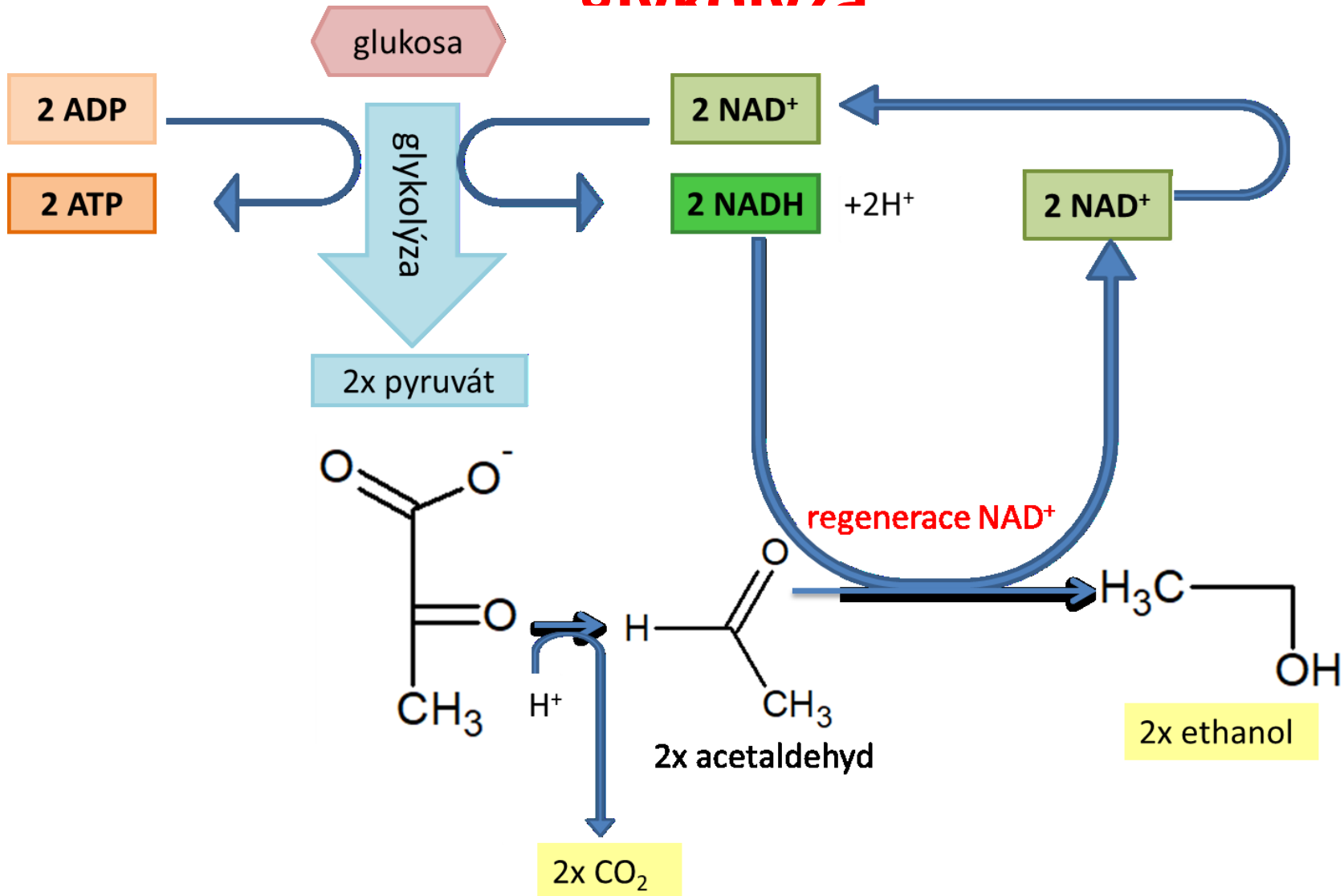
Vytváření ATP

1. substrátová fosforylace – anaerobní glykolýza



Vytváření ATP

1. substrátová fosforylace – anaerobní glykolýza



Vytváření ATP

přenos pyruvátu do Krebsova cyklu

- **pyruvát** a **mastné kyseliny** či některé **AMK** po částečném rozložení z původních hlavních zdrojů energie (cukry, tuky, bílkoviny) se dostávají do **mitochondrie**
- v mitochondriální matrix je **pyruvát** komplexem enzymů (pyruvátdehydrogenázový komplex) přeměněn na **acetyl-CoA** za vzniku jedné molekuly $\text{NADH} + \text{H}^+$
- **oxidace mastných** kyselin také probíhá enzymaticky v mitochondriích za vzniku molekuly **acetyl-CoA**, jedné molekuly NADH a jedné molekuly FADH_2

I. FÁZE

polysacharidy

bílkoviny

trávení

monosacharidy

mastné



aminokyseliny

II. FÁZE

rozklad za vzniku
acetyl-CoA

acetyl-CoA

NH₃

III. FÁZE

citrátový cyklus

[H]

CO₂

ADP + P_i

O₂

dýchací
řetězec

ATP + H₂O

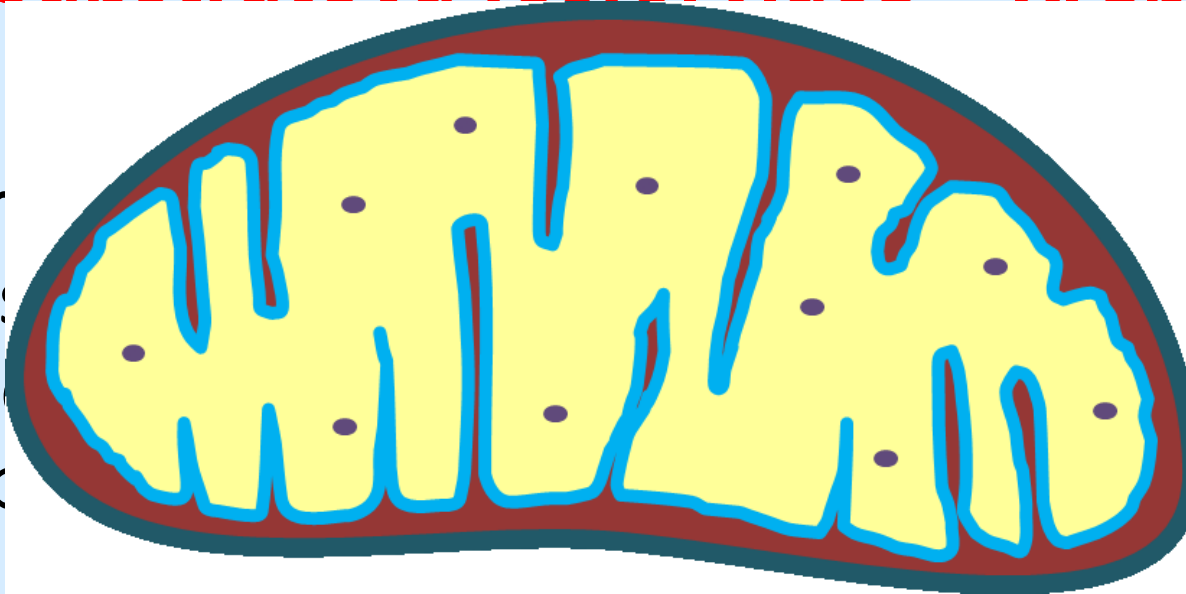
odpadní produkty

H₂O

Vytváření ATP

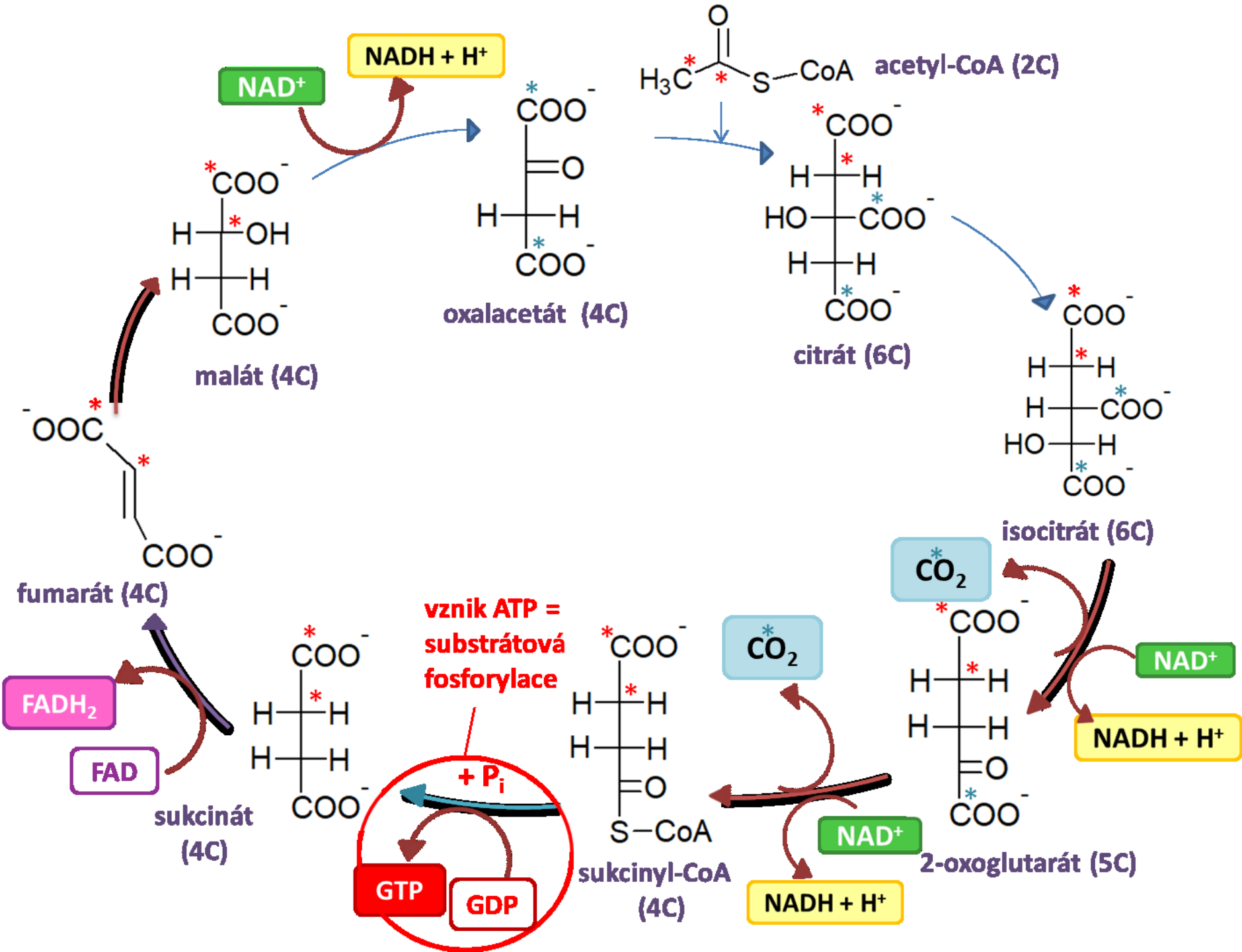
1. substrátová fosforylace – Krebsův

- v citr
- Krebs
- mito
- vstup



nové,

- vznikají přitom také redukované koenzymy **NADH** a **FADH₂**, které přenášejí atomy vodíku do dýchacího řetězce za účelem sloučení s kyslíkem a vzniku energie využité k syntéze ATP



Vytváření ATP

1. substrátová fosforylace – Krebsův cyklus

Sumární rovnice citrátového cyklu je následující:

- $3 \text{ NAD}^+ + \text{FAD} + \text{GDP} + \text{P}_i + \text{acetyl-CoA} \rightarrow$
 $3 \text{ NADH} + \text{FADH}_2 + \text{GTP} + \text{CoA} + 2 \text{ CO}_2$
- ATP a GTP jsou energeticky ekvivalentní a může docházet k přechodu:
$$\text{GTP} + \text{ADP} \rightarrow \text{GDP} + \text{ATP} \quad \Delta G^{\circ} = 0$$

Procvičování

Jakým způsobem se přenáší Na^+ a K^+ ionty na neuronech?

Proč se při práci Na^+ , K^+ ATPázy přenáší 3 Na^+ /2 K^+ ?

Jakou funkci umožňuje SGLT kanál?

Co je to metabolismus? Na jaké dva proudy ho dělíme? Jaký je mezi nimi vztah?

Co je substrátová fosforylace a v jakých pochodech probíhá?

Celková energetická bilance oxidace glukózy – zisk citrátového cyklu

Celková energetická bilance citrátového cyklu (včetně oxidace aktivních vodíků v dýchacím řetězci):

- **9 jednotek ATP** ze 3 molekul $\text{NADH} + \text{H}^+$,
 - **2 jednotky ATP** z 1 molekuly FADH_2
 - **1 jednotka ATP** vzniklá při substrátové fosforylaci (napsat na tabuli)
- **12 jednotek ATP** na 1 molekulu acetyl-CoA =
24 jednotek ATP na molekulu glukosy

Celková energetická bilance oxidace glukózy – zisk glykolýzy a převodu pyruvátu na acetyl-CoA

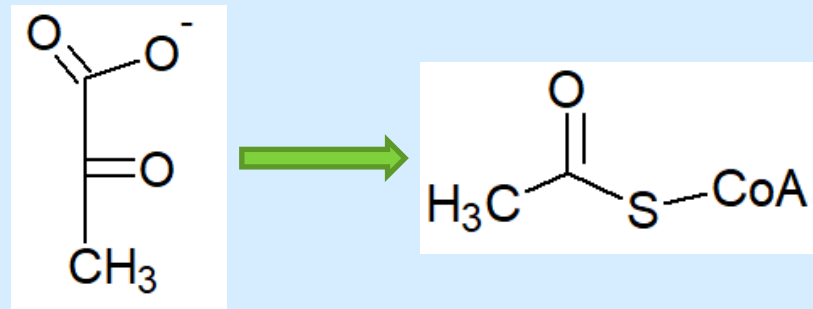
- energetickou bilanci glykolýzy = **2 ATP + 2 NADH (2x3 ATP)**
- převod pyruvátu na acetyl-CoA (**2x 1NADH = 2x3 ATP**)

zopakovat, co kde probíhá

- suma sumárum

38 molekul ATP (24 + 8 + 6)

- někdy se udává hodnota 36 – 38 molekul ATP → záleží na způsobu přemístění 2 molekul NADH z glykolýzy do mitochondrie

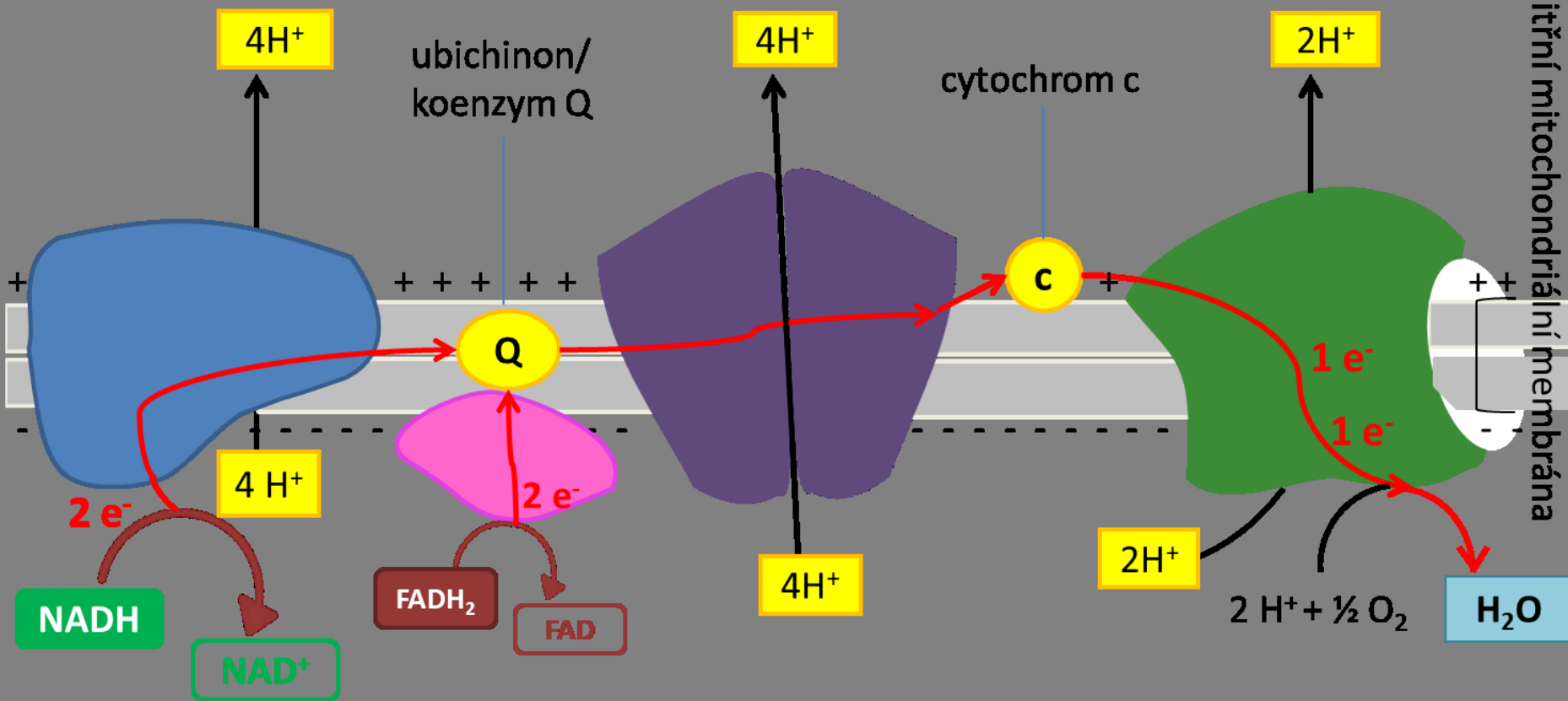


Vytváření ATP

2. proton-motivní síla - oxidativní fosforylace

- elektrontransportní řetězec, známý také jako dýchací řetězec, je umístěn **na vnitřní membráně mitochondrií**
- jde o soubor proteinů, které se podílí na přenosu **elektronů** z redukovaných kofaktorů (NADH, FADH₂) vzniklých při glykolýze, oxidaci mastných kyselin a citrátovém cyklu
- konečným příjemcem elektronů je u aerobních organismů molekulový **kyslík** (kvůli své vysoké afinitě k elektronům)

MEZIMEMBRÁNOVÝ PROSTOR



vnitřní mitochondriální membrána

komplex I
NADH-
dehydrogenáza

komplex II
sukcinát
dehydrogenáza

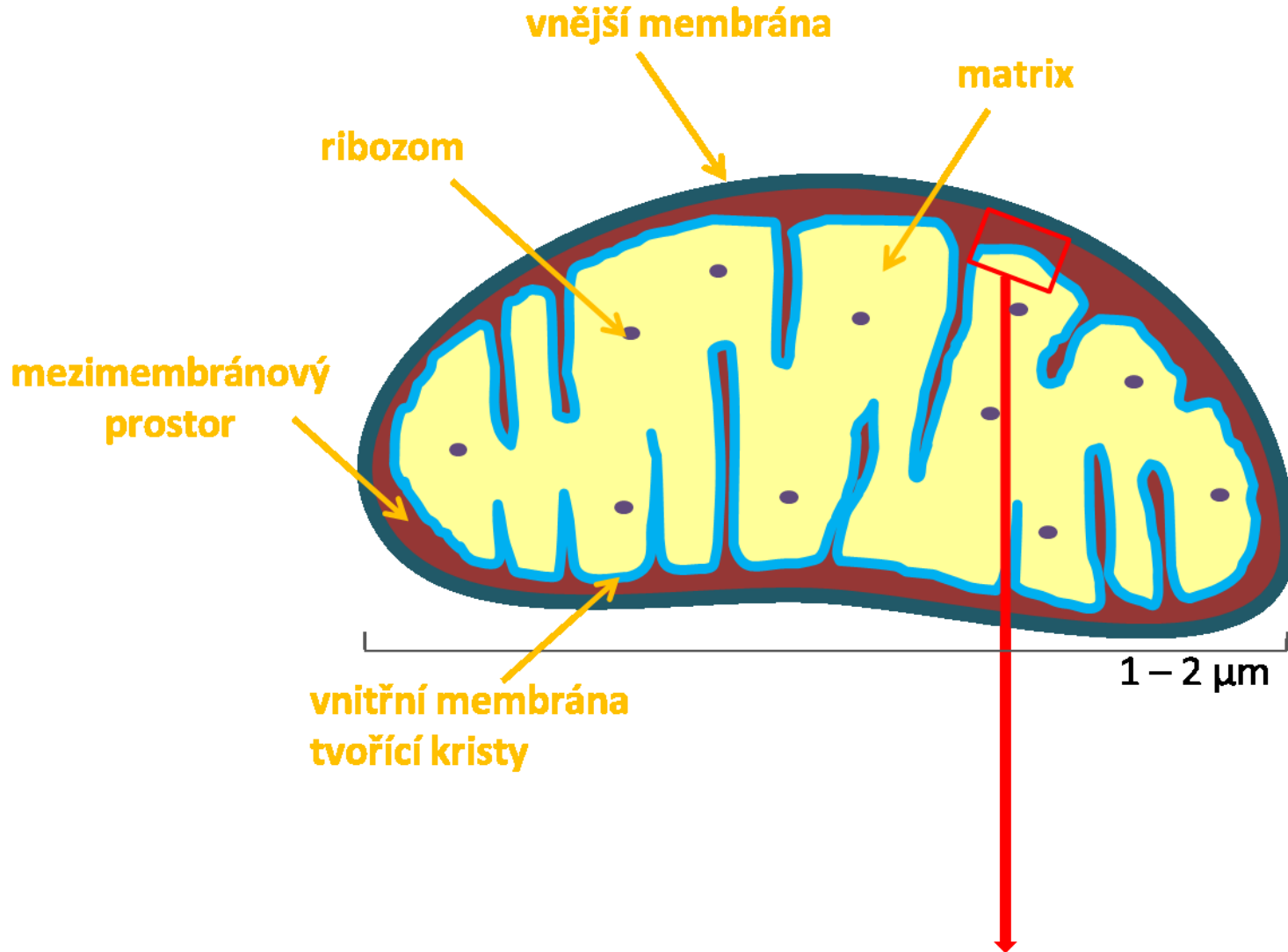
komplex III
cytochrom b - c₁

komplex IV
cytochromoxidáza

MATRIX

Vytváření ATP

2. proton-motivní síla - oxidativní fosforylace



Vytváření ATP

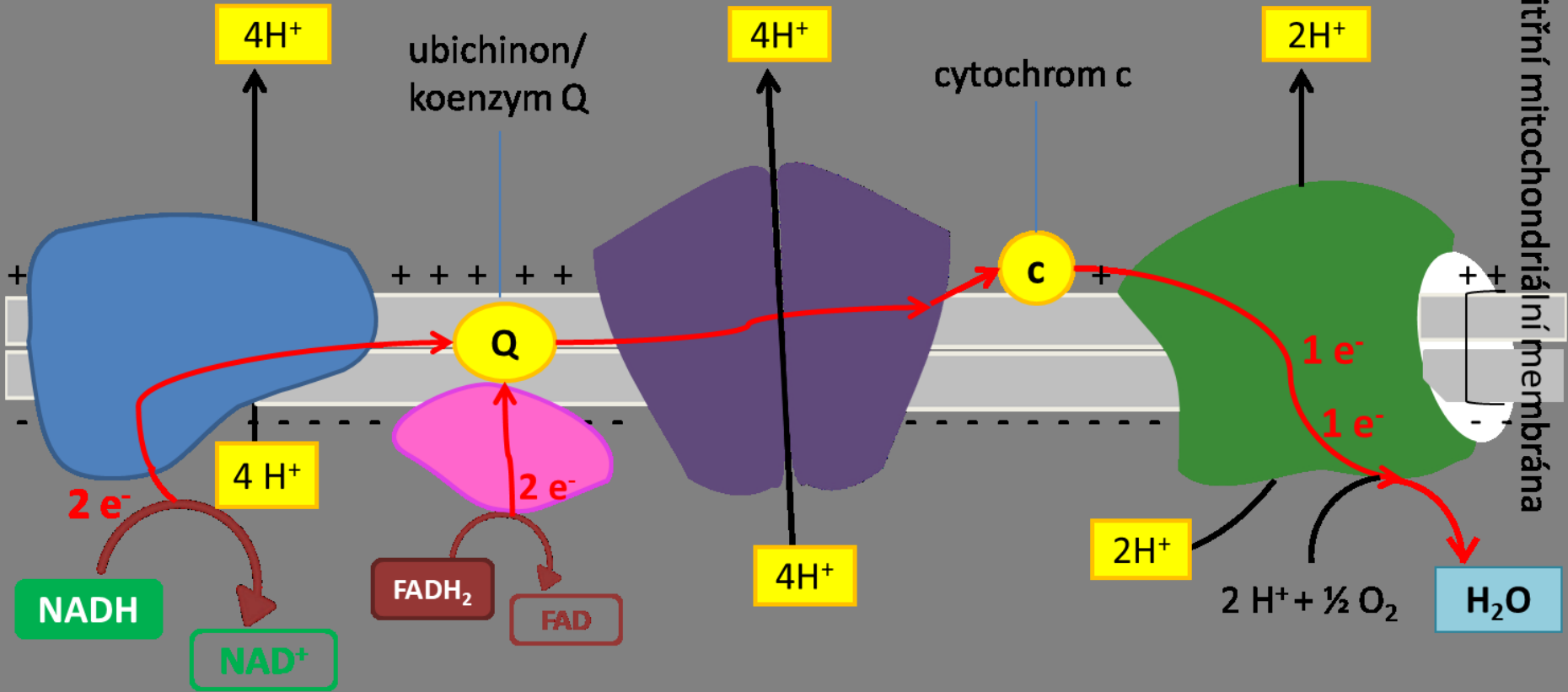
2. proton-motivní síla - oxidativní fosforylace

- energie uvolněná při průchodu elektronů elektrontransportním řetězcem (exergonickými redoxními reakcemi) se využívá **k přečerpání protonů z matrix mitochondrie do mezimembránového prostoru** a vytváří tam strmý elektrochemický gradient protonů
- **ten lze následně použít k syntéze ATP**
 - celkově tyto procesy nazýváme jako oxidativní fosforylaci

Struktura elektrontransportního řetězce

MEZIMEMBRÁNOVÝ PROSTOR

vnitřní mitochondriální membrána



komplex I
NADH-
dehydrogenáza

komplex II
sukcinát
dehydrogenáza

komplex III
cytochrom b – c₁

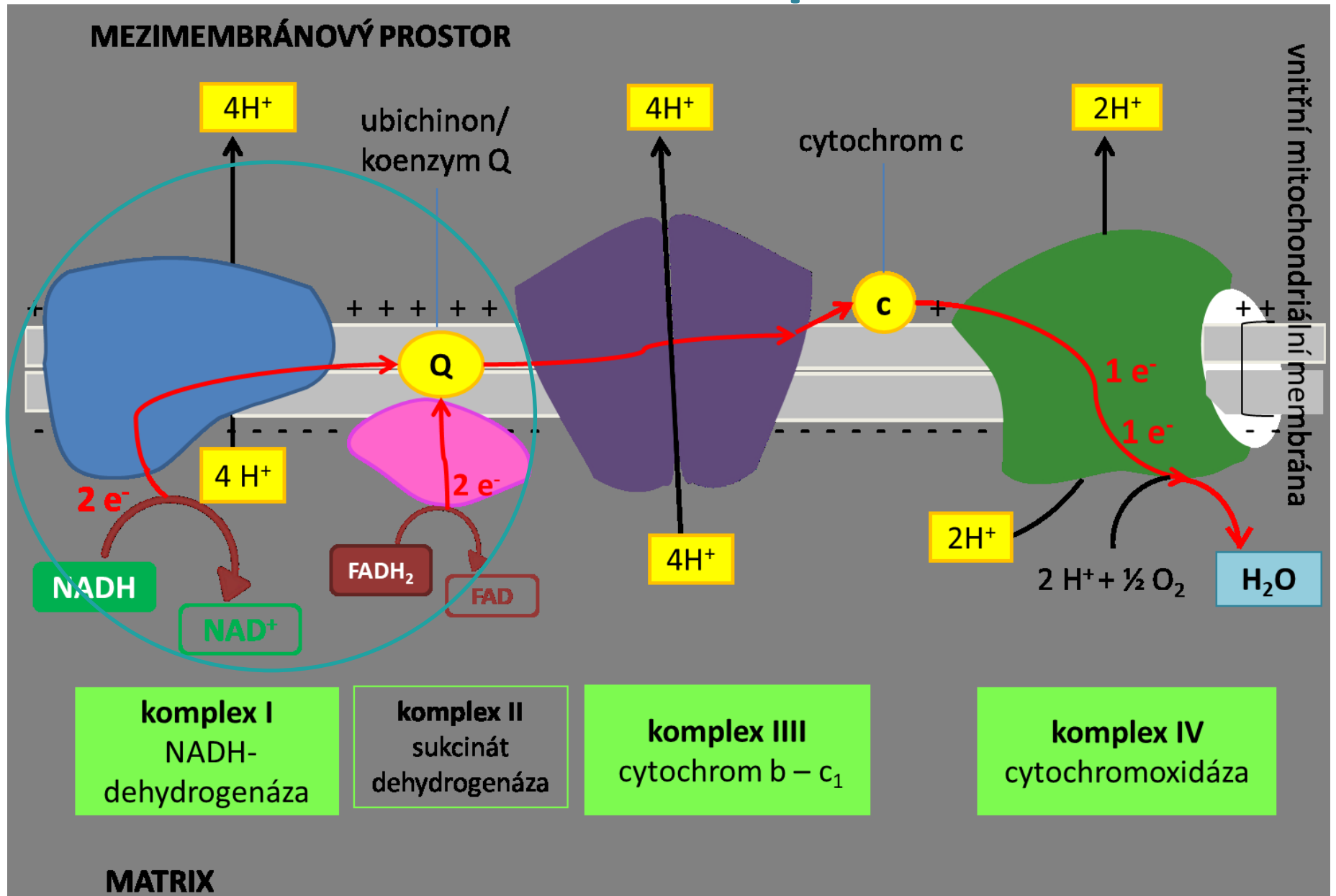
komplex IV
cytochromoxidáza

MATRIX

Struktura elektrontransportního řetězce

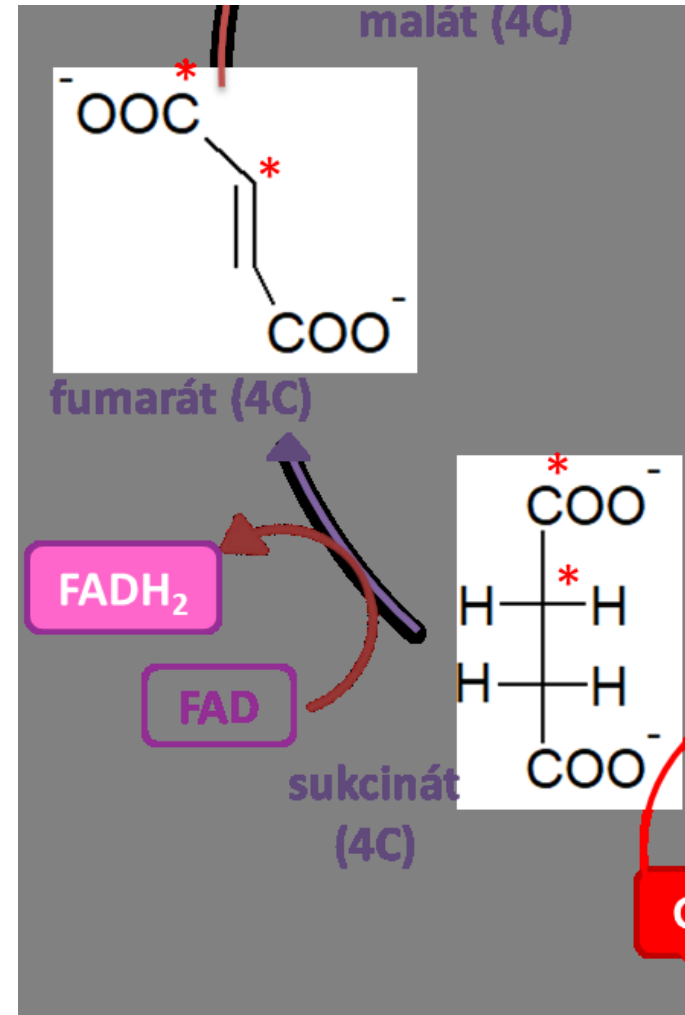
- přečerpávání protonů zvyšuje jejich koncentraci v mezimembránovém prostoru = nabití vnější strany membrány kladně, vnitřní strana nabitá záporně
- **výsledkem je strmý elektrochemický gradient a zisk energie při převodu protonů zpět do matrix mitochondrie**

Struktura elektrontransportního řetězce



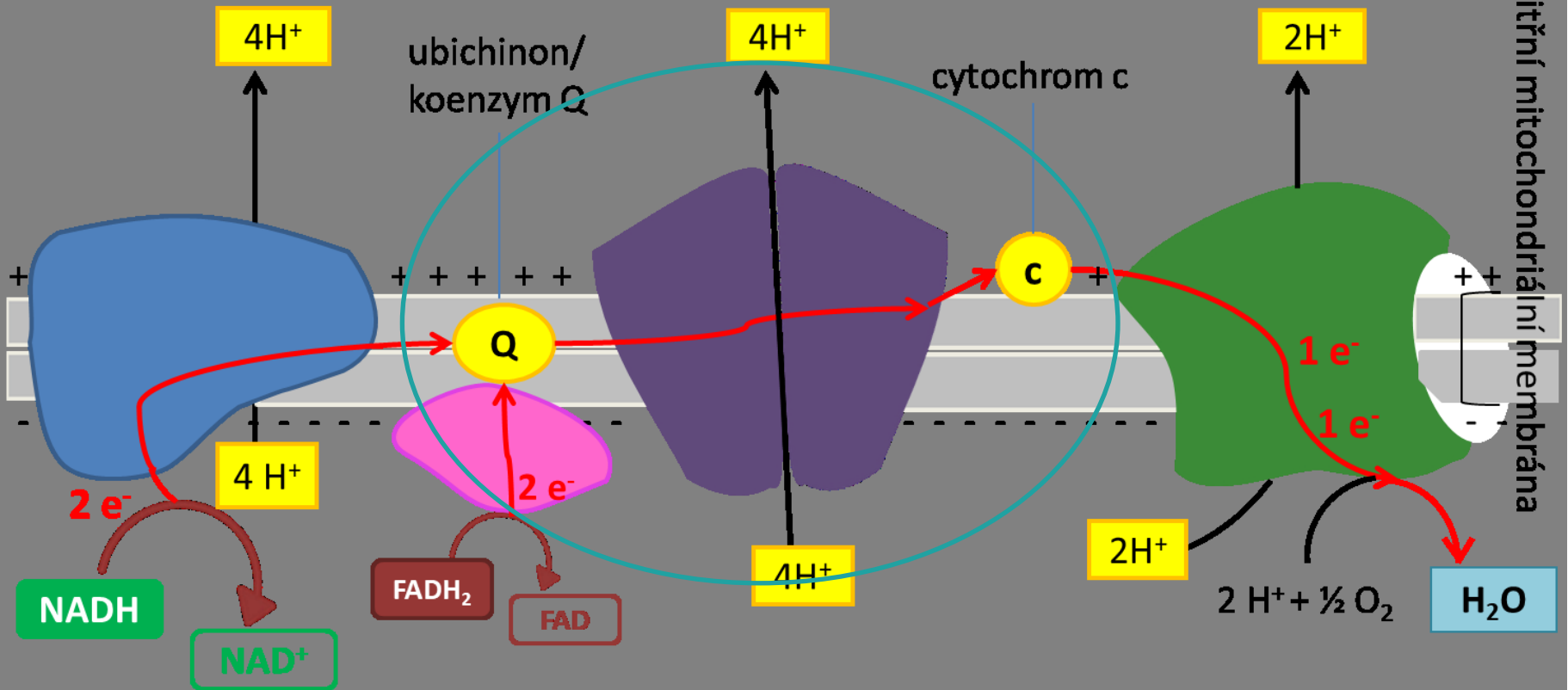
Struktura elektrontransportního řetězce

- úkolem **komplexu I (NADH-dehydrogenázy)** je **reoxidace NADH** ubichinonem/koenzymem Q
- **komplex II (sukcinátdehydrogenáza)** je součástí citrátového cyklu, váže uvolněné vodíky pomocí své prostetické skupiny FAD a spolu s elektrony je předává na ubichinon do dýchacího řetězce = **reoxidace FADH₂**
- jak se nazývá chemická reakce přeměny sukcinátu na fumarát?



Struktura elektrontransportního řetězce

MEZIMEMBRÁNOVÝ PROSTOR



komplex I
NADH-
dehydrogenáza

komplex II
sukcinát
dehydrogenáza

komplex III
cytochrom b – c₁

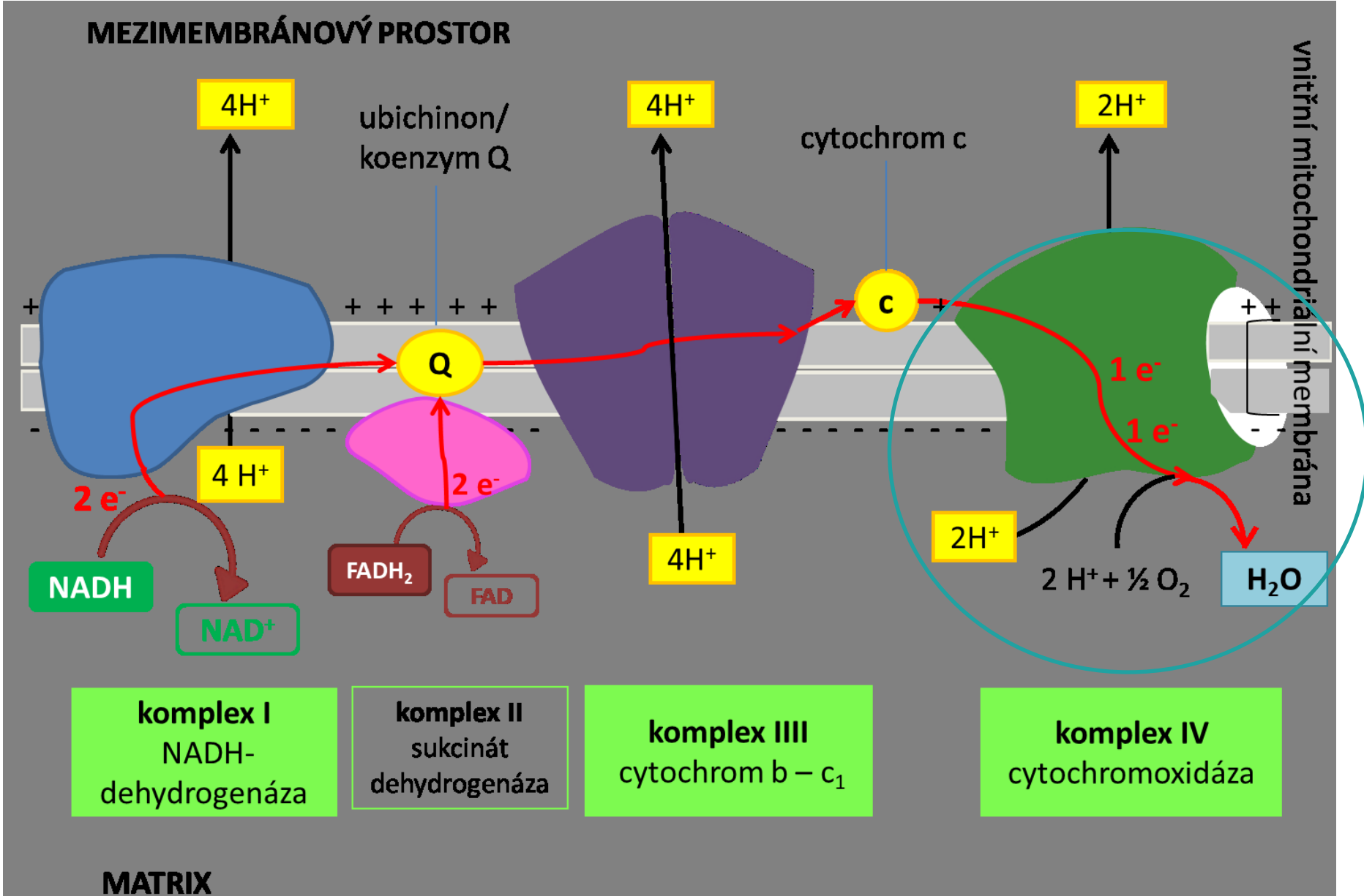
komplex IV
cytochromoxidáza

MATRIX

Struktura elektrontransportního řetězce

- **koenzym Q** je, jak už bylo zmíněno, mobilní přenašeč, který předává elektrony prostřednictvím **komplexu III (komplex cytochromu b – c₁)** na druhý mobilní přenašeč – cytochrom c
- **komplex III** zajišťuje převod **2 elektronového** transportu (z CoQH₂) na **1 elektronový** pomocí **tzv. Q-cyklu**, protože druhý mobilní přenašeč **cytochrom c** má pouze jedno redoxní centrum

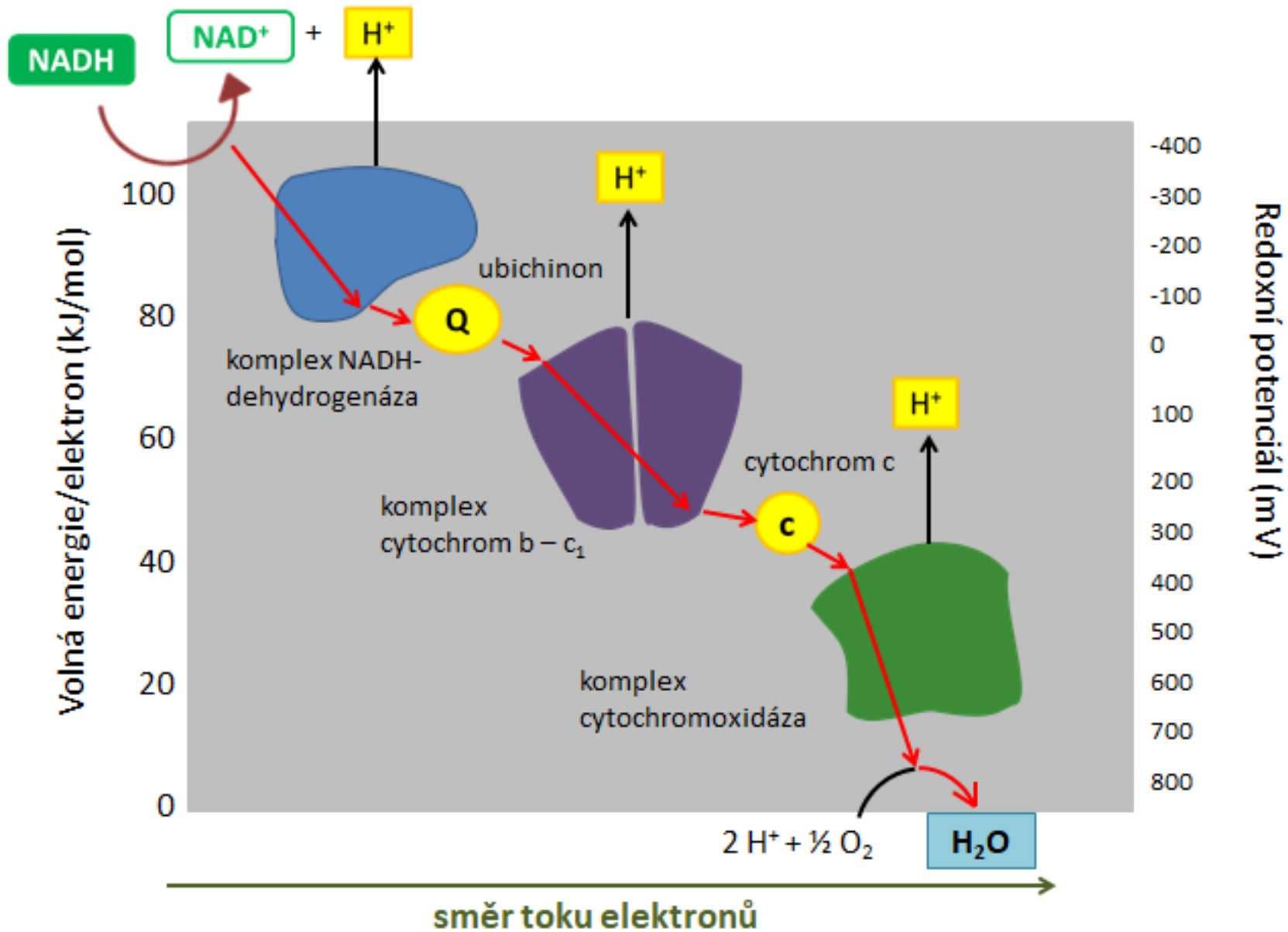
Struktura elektrontransportního řetězce



Struktura elektrontransportního řetězce

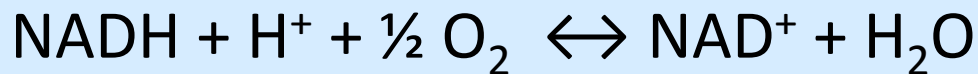
- poslední **komplex IV (komplex cytochromoxidázy)** katalyzuje **jednoelektronovou oxidaci 4 cytochromů c** a redukci jedné molekuly O_2 za vzniku vody

Snadnost průchodu elektronů směrem ke kyslíku



Průchod elektronů membránou

- snadnost průchodu elektronů směrem ke kyslíku zajišťuje **stoupající redoxní potenciál = zvyšující se elektronová afinita**
- tento potenciál se využívá k **přečerpání protonů**
- čerpání protonů je zprostředkováno **allosterickými změnami konformace proteinu díky energii, která vzniká při transportu elektronů** (exergonické redoxní reakce)



= (0,815 V + 0,315 V) = 1,130 V – lze převést na energii potřebnou na konformaci

Vytváření ATP

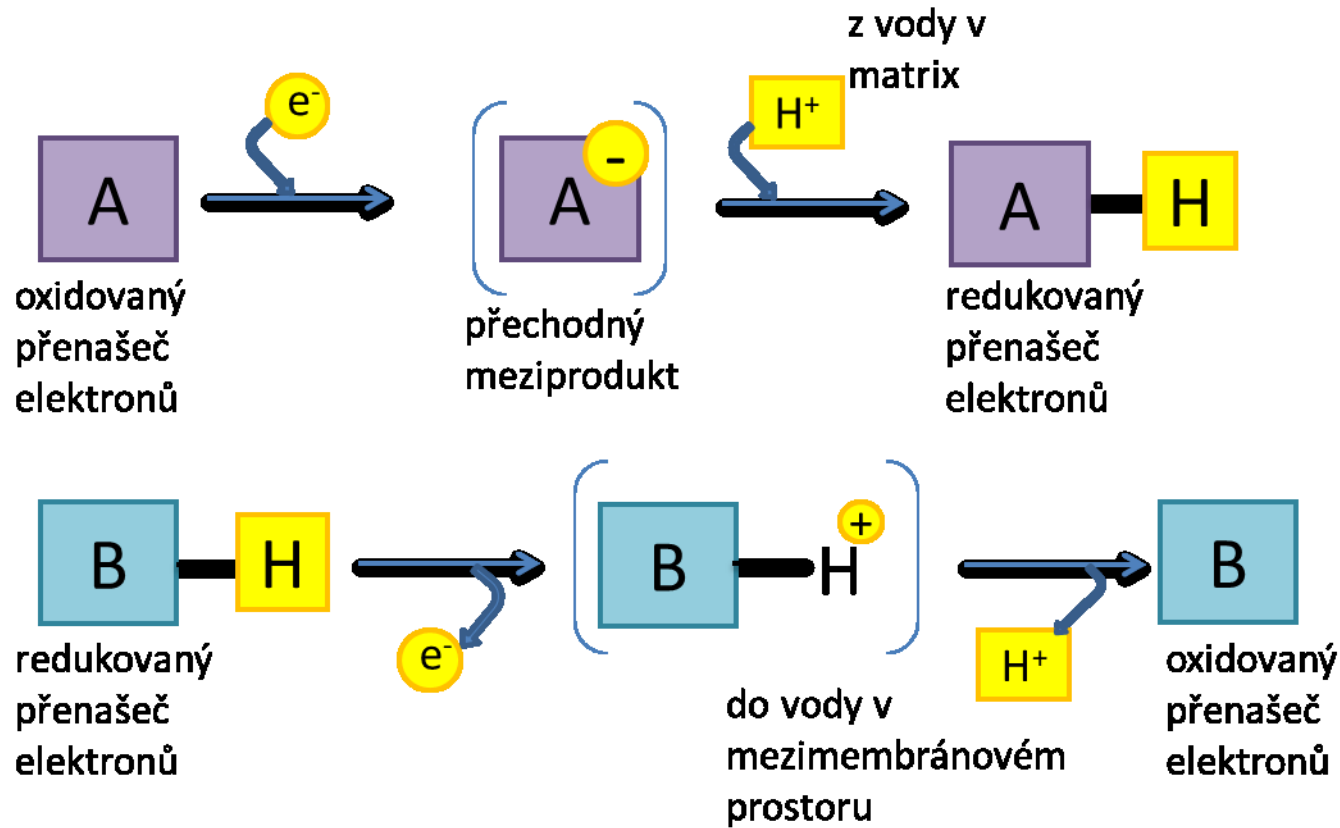
2. proton-motivní síla - oxidativní fosforylace

Proč nelze předávat elektrony z NADH přímo na kyslík za vzniku vody?

Došlo by k uvolnění velkého množství energie ve formě tepla a reakce by probíhala téměř výbušnou silou. Proto buňky tento proces uskutečňují po částech postupně přes řadu elektronových přenašečů v elektrontransportním řetězci, kde elektrony postupně ztrácejí svoji energii.

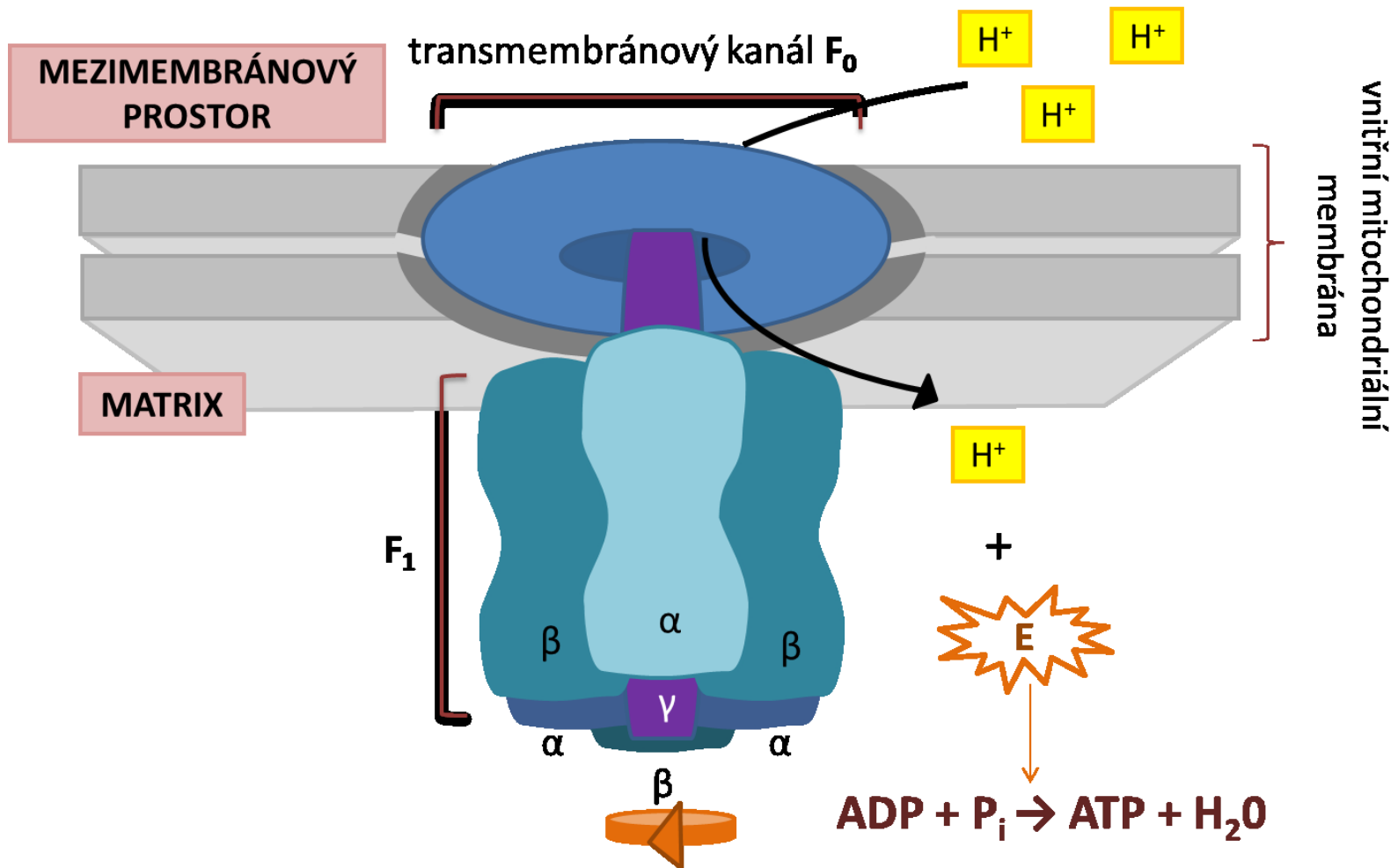
Vytváření ATP

2. proton-motivní síla - oxidativní fosforylace



ATPáza – finální krok

- závěrečným krokem syntézy ATP v rámci membránové fosforylace je využití energie gradientu elektrochemického potenciálu protonů




ATPáza – finální krok

ATPáza se skládá především z 2 nekovalentně spojených částí:

- transmembránového kanálu (**F₀**) přenášejícího pasivně protony
- oligomerní hlavy (**F₁**), která zajišťuje vlastní reakci $ADP + P_i \rightarrow ATP + H_2O$
- obě tyto části zaujímají vůči membráně pevnou pozici
- pohyblivá je podjednotka **γ** , která se otáčí (na jednu otočku připadá syntéza 3 molekul ATP)
- právě pohyb podjednotky **γ** je vyvolán exergonickým pasivním transportem protonů

Tvorba ATP v rostlinách

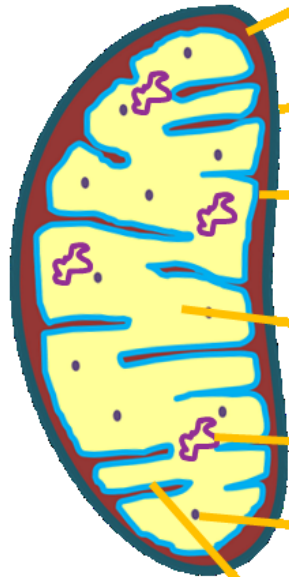
- rostliny jako fotoautotrofové využívají jako zdroj energie světlo 
- **světelná energie** využitá při fotosyntéze je přeměna do **energie chemických vazeb** organických molekul – sacharidů, tuků

Tvorba ATP v rostlinách

MITOCHONDRIE

CHLOROPLAST

2µm



mezimembránový
prostor

vnější
membrána

vnitřní
membrána

matrix

DNA

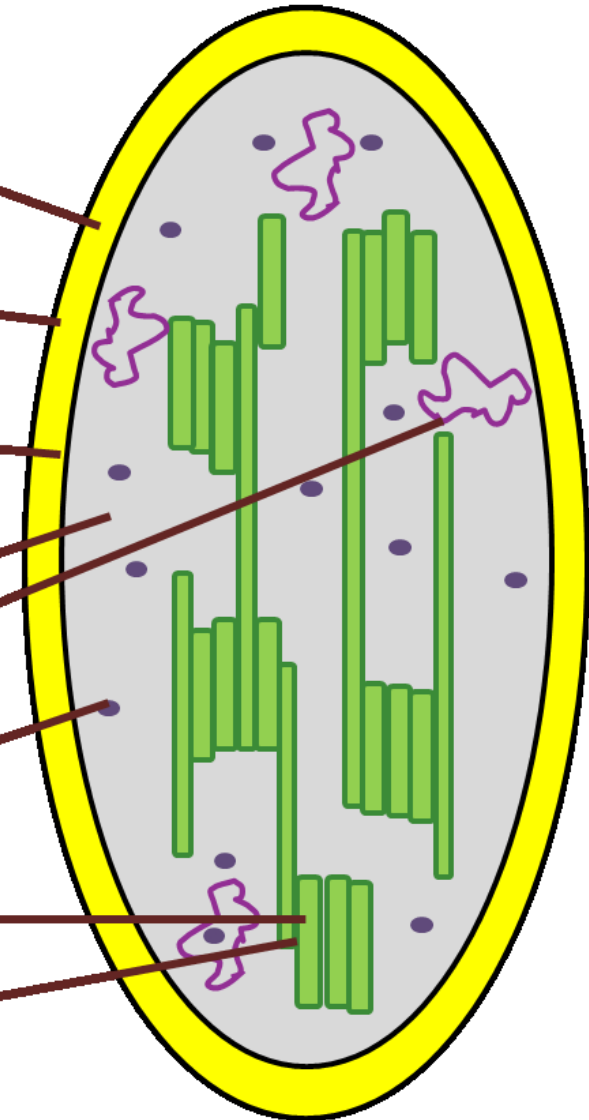
ribozomy

vnitřní prostor
thylakoidů - lumen

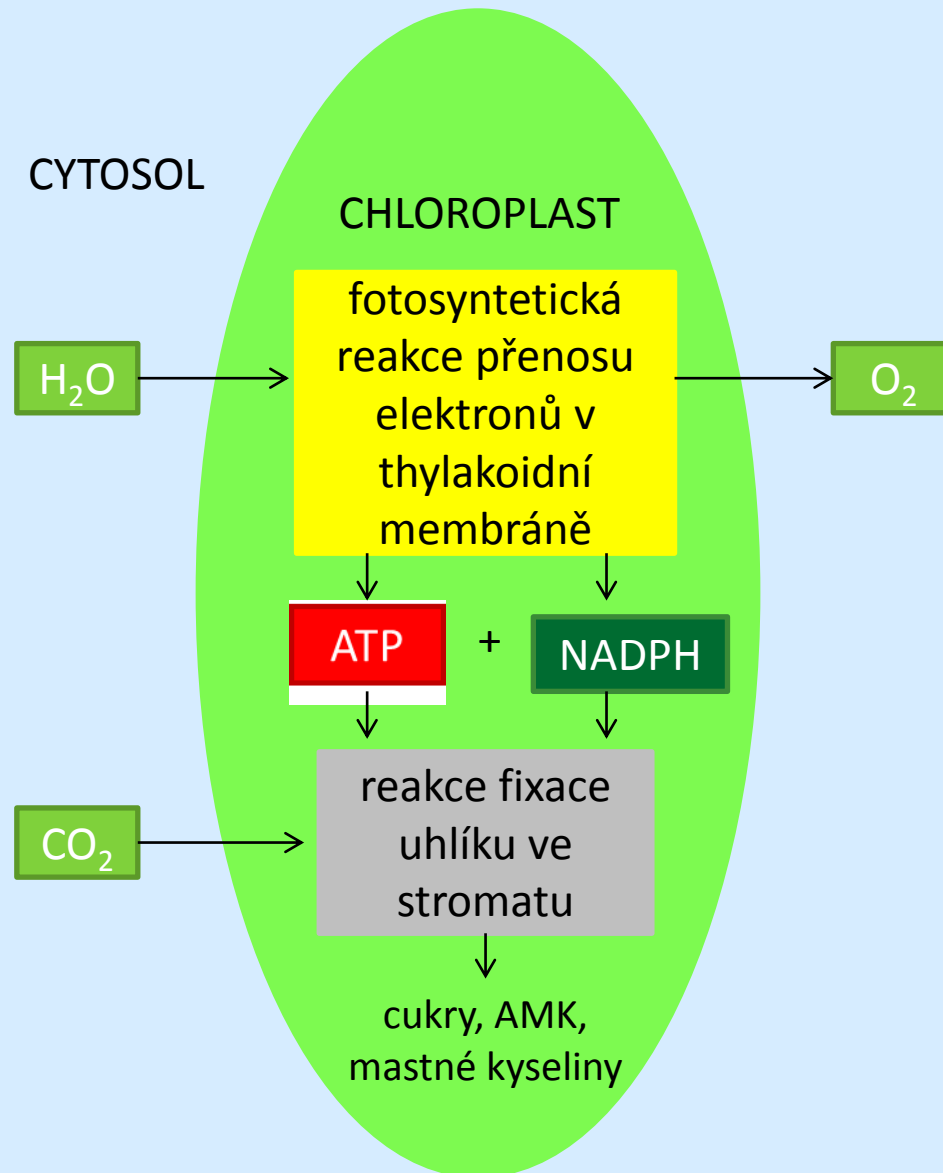
thylakoidy

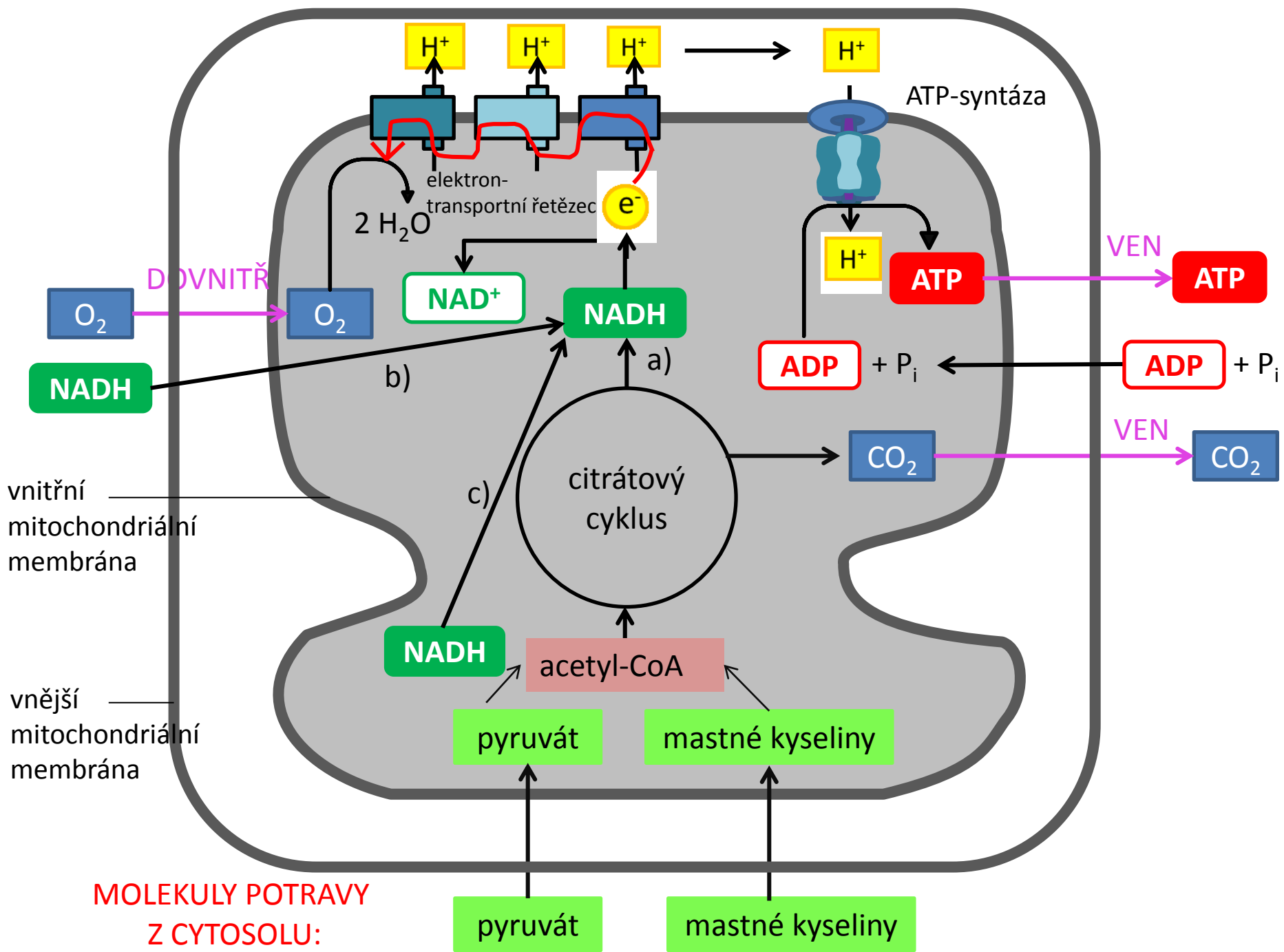
kristy mitochondrie

stroma



Tvorba ATP v rostlinách





MOLEKULY POTRAVY
Z CYTOSOLU:

pyruvát

mastné kyseliny

NADH

acetyl-CoA

pyruvát

mastné kyseliny

citrátový
cyklus

NADH

NAD⁺

O₂

O₂

2 H₂O

e⁻

H⁺

H⁺

H⁺

H⁺

ATP-syntáza

ATP

ATP

ADP + P_i

ADP + P_i

CO₂

CO₂

vnitřní
mitochondriální
membrána

vnější
mitochondriální
membrána

elektron-
transportní řetězec

DOVNITŘ

VEN

VEN

b)

a)

c)

