

# C5720 Biochemie

## 24\_Fotosyntéza

# Obsah

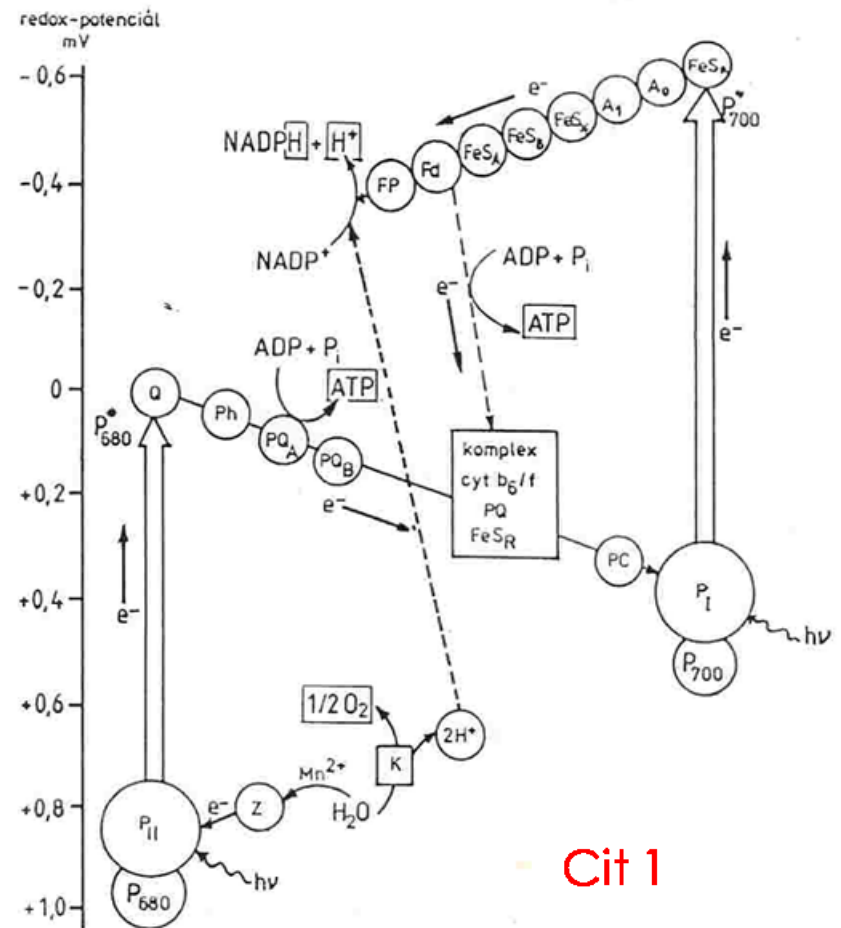
- Fotosyntéza, světelná fáze. Chlorofyly, struktura fotosyntetického centra. Komponenty přenosu elektronů (cytochromy, chinony, plastocyanin, ferredoxin), FS-2, FS-1, mechanismus syntézy ATP. Rovnice světelné fáze a její bilance.
- Temná fáze fotosyntézy (Calvinův cyklus), RUBISCO, mechanismus fixace CO<sub>2</sub>.
- Typy fotosyntézujících organismů, další způsoby zachytu světla, chemotrofní asimilace C<sub>1</sub>.
- Ekologický a technologický význam fotosyntézy, perspektivy.

# Obecně

- Sumárně  $6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} = \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$
- Endergonický pochod – nelze provést jednoduše
  - Opačný směr – jednoduchý – energie jako teplo
  - Využití energie uvolněné oxidací – složité pochody
- 2 fáze fotosyntézy
  - Světelná – tvorba ATP a NADPH (redukční ekvivalenty) – vyžaduje světelnou (alternativně jinou) energii
  - Temná – fixace a redukce  $\text{CO}_2$  – využití ATP a NADPH – alternativní pochody

# Světelná fáze

- Světelná fáze
  - Tvorba NADPH a ATP
  - Fotosyntetický elektronový transport – acyklický a cyklický
  - Endergonický směr přenosu elektronů
  - Donorem je voda – vysoká hodnota  $E^0$  štěpicího enzymu
  - Světelná energie přeměněna na změnu  $E^0$  chlorofylu o ca 2x1 V



# Světelná fáze

## Komponenty fotosyntetického elektronového transportu

Komplexy fotosystémů I a II

- PSII a PSI s reakčními centry
- Primární  $e^-$  donory P680 a P700

(tvořeny Chl a), plastochinon

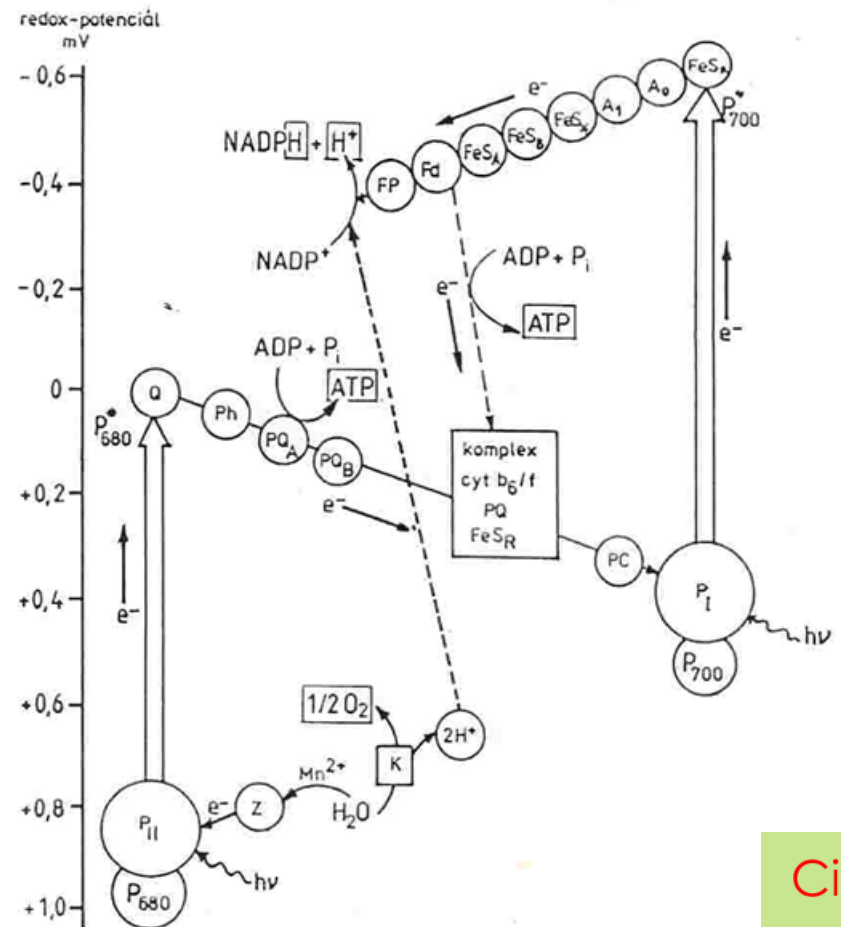
Komplex cyt  $b_6/f$  – translokace  $H^+$

Spojovací přenašeče PQ a PC

Centra redukce  $NADP^+$

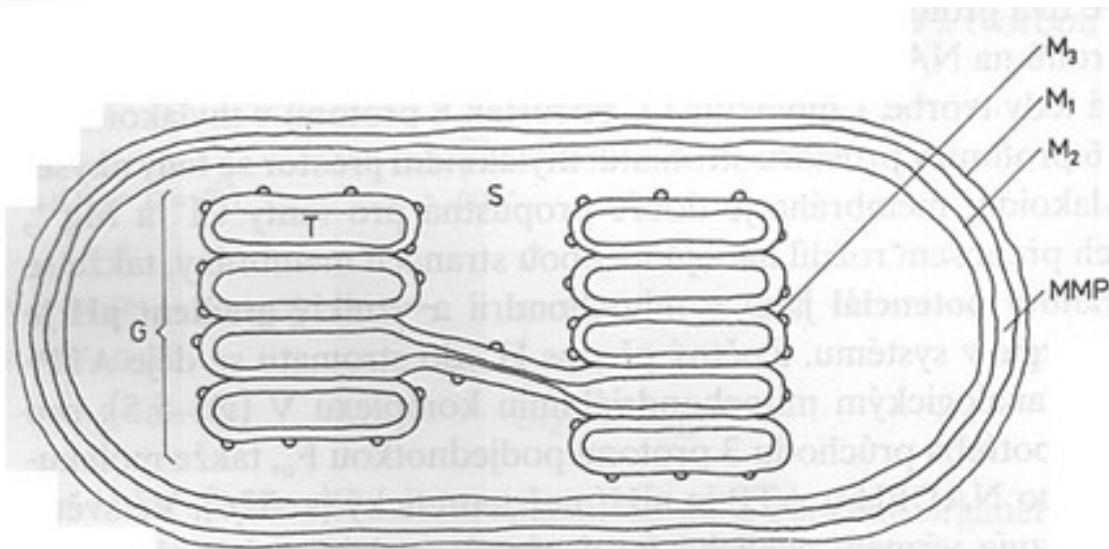
Feredoxin

$NADP^+$  reductasa (FMN)



Cit 1

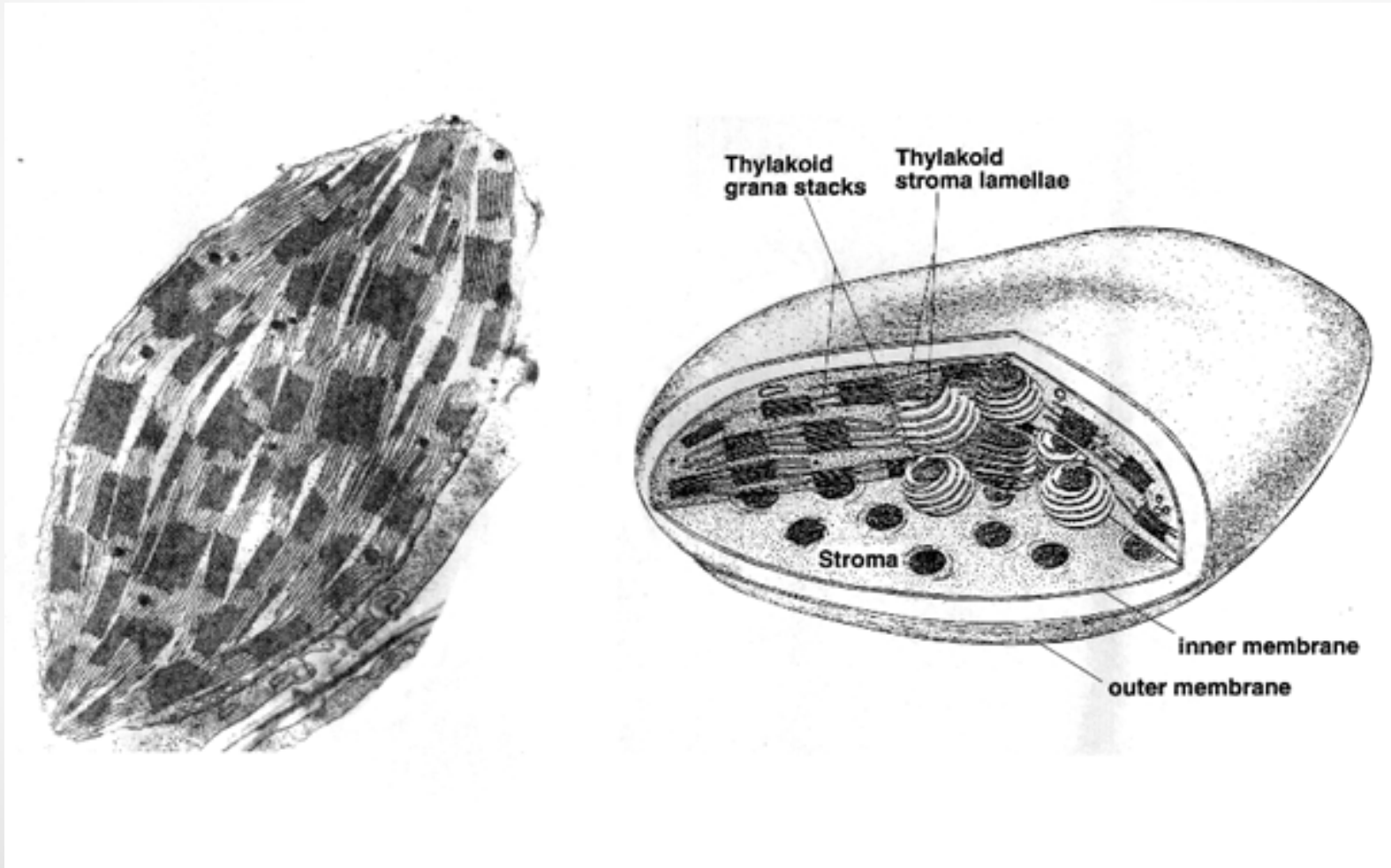
# Lokalizace systému přenašečů



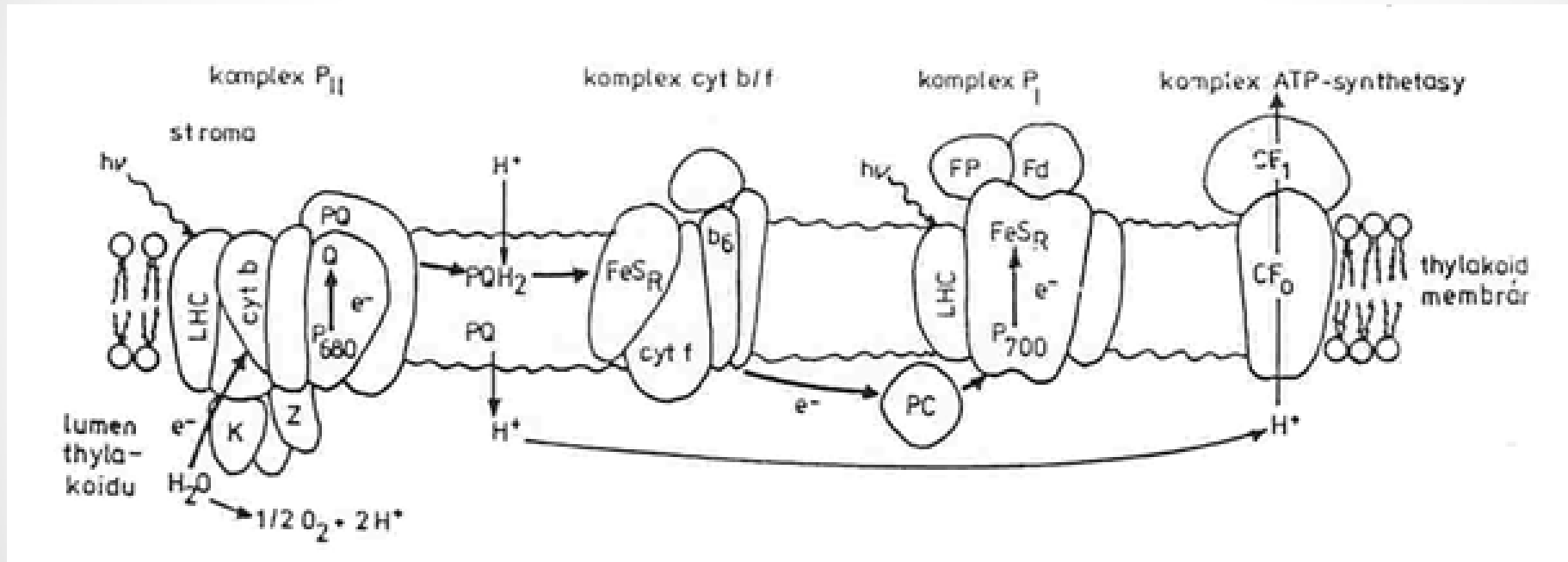
**Schematický řez chloroplastem**

(M<sub>1</sub> vnější membrána, M<sub>2</sub> vnitřní membrána, M<sub>3</sub> thylakoidní membrána, G grana, S stroma, T thylakoidní prostor, MMP mezimembránový prostor)

# Lokalizace systému přenašečů



# Struktura fotosyntetického řetězce transportu elektronů



- Translokace protonů
- Syntéza ATP
- Složení – komplexy PSII, cyt b<sub>6</sub>f, PSI, navazuje CF<sub>0</sub>CF<sub>1</sub> ATP syntetasa

Cit 1



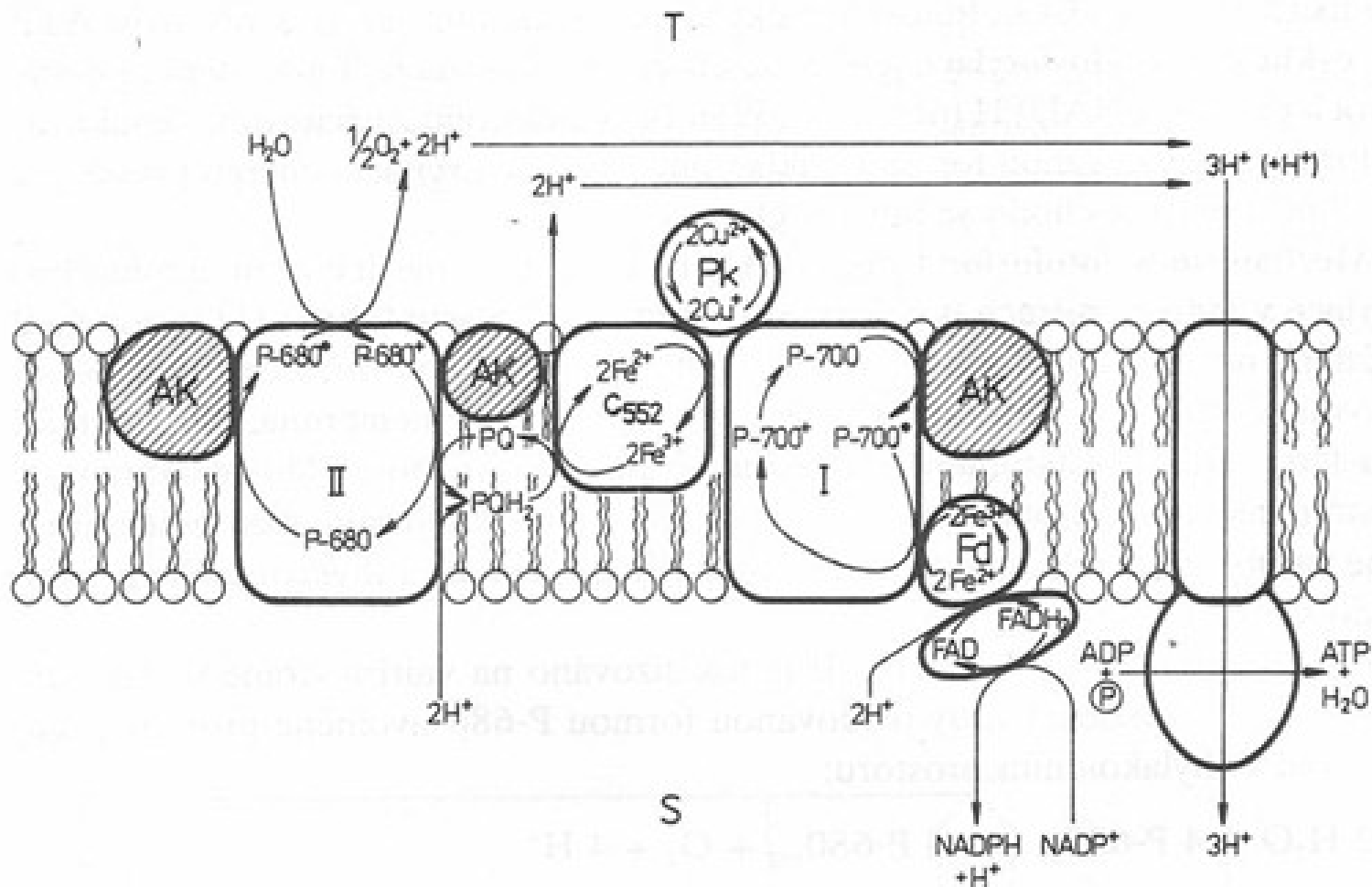

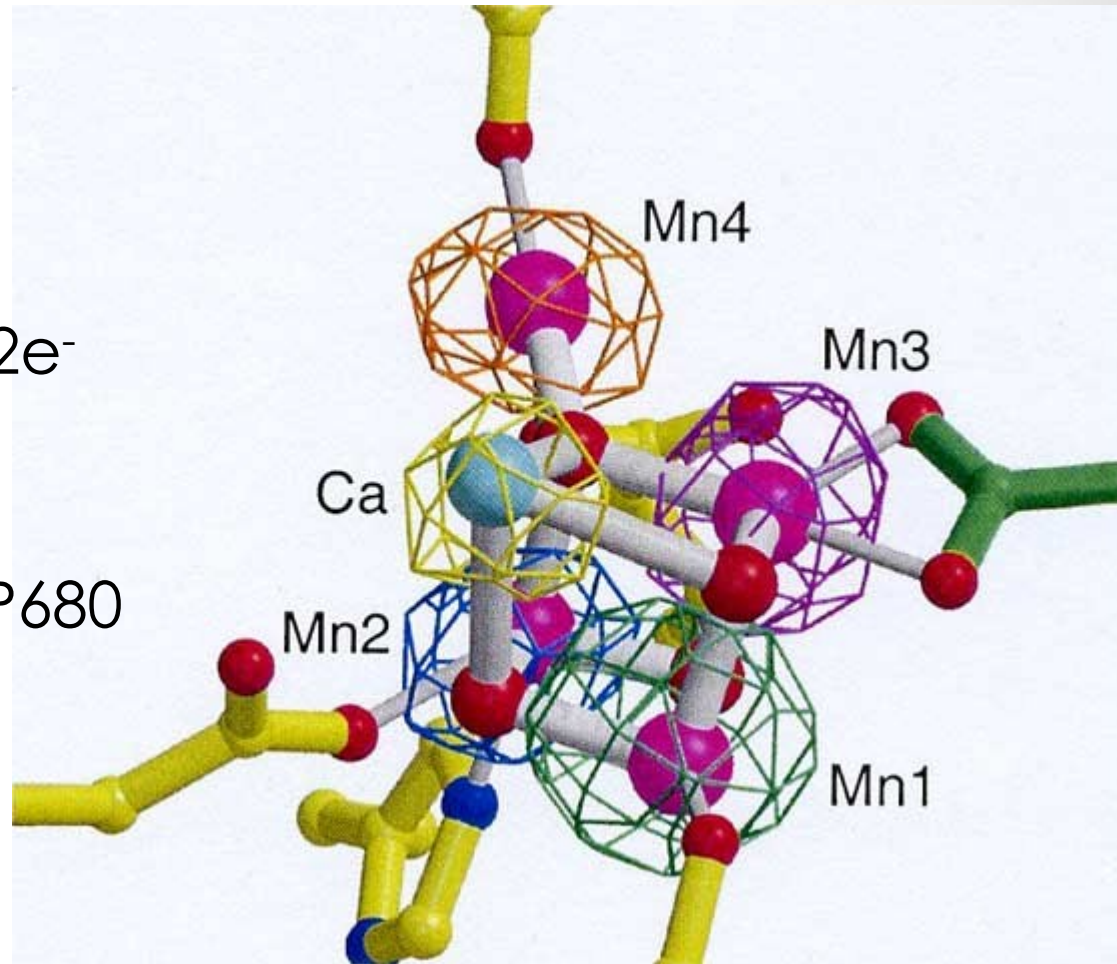


Schéma chemiosmotického mechanismu fotosforylace v thylakoidní membráně (T thylakoidní prostor, S stroma, AK anténové komplexy, I, II odpovídající fotosystémy, Fd ferredoxin, Pk plastocyanin, PQ plastochinon)

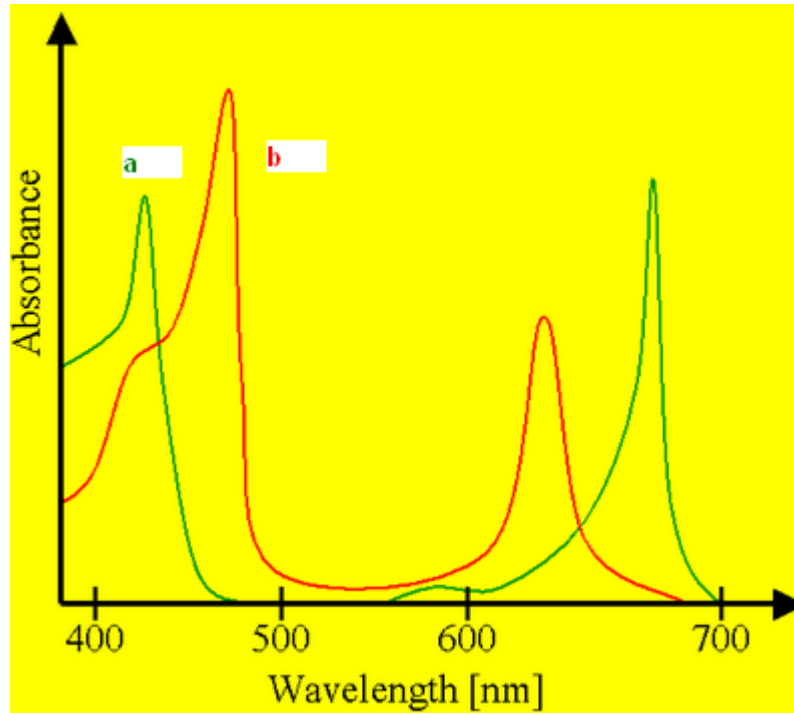
Cit 1

# Štěpení vody

- Není to fotolýza
  - Enzym bez světla
- $\text{H}_2\text{O} = \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$
- $E^{0'}$  ca +1 V
- $2\text{e}^-$  do reakčního centra PSII – redukce P680
- Aktivní centrum enzymu 

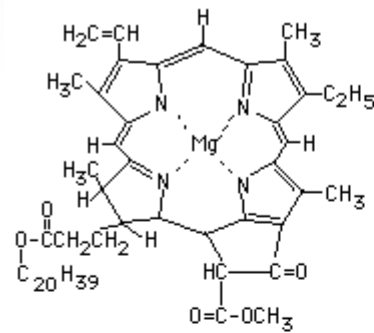


# Sběr světla

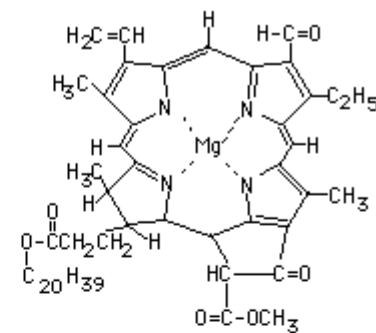


- Absorpční spektra chlorofylů
  - Nepokrývají celou oblast
  - Jediná molekula – malá plocha

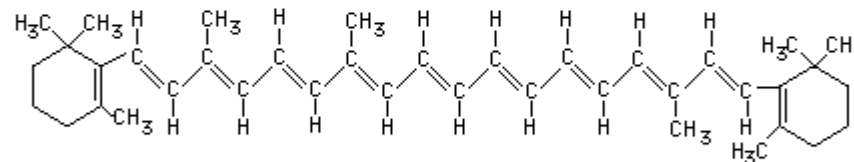
# Sběr světla



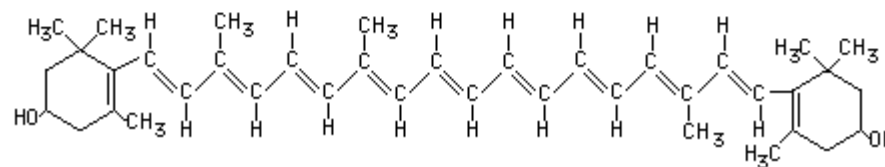
**Chlorophyll a**



**Chlorophyll b**



**β-Carotene**

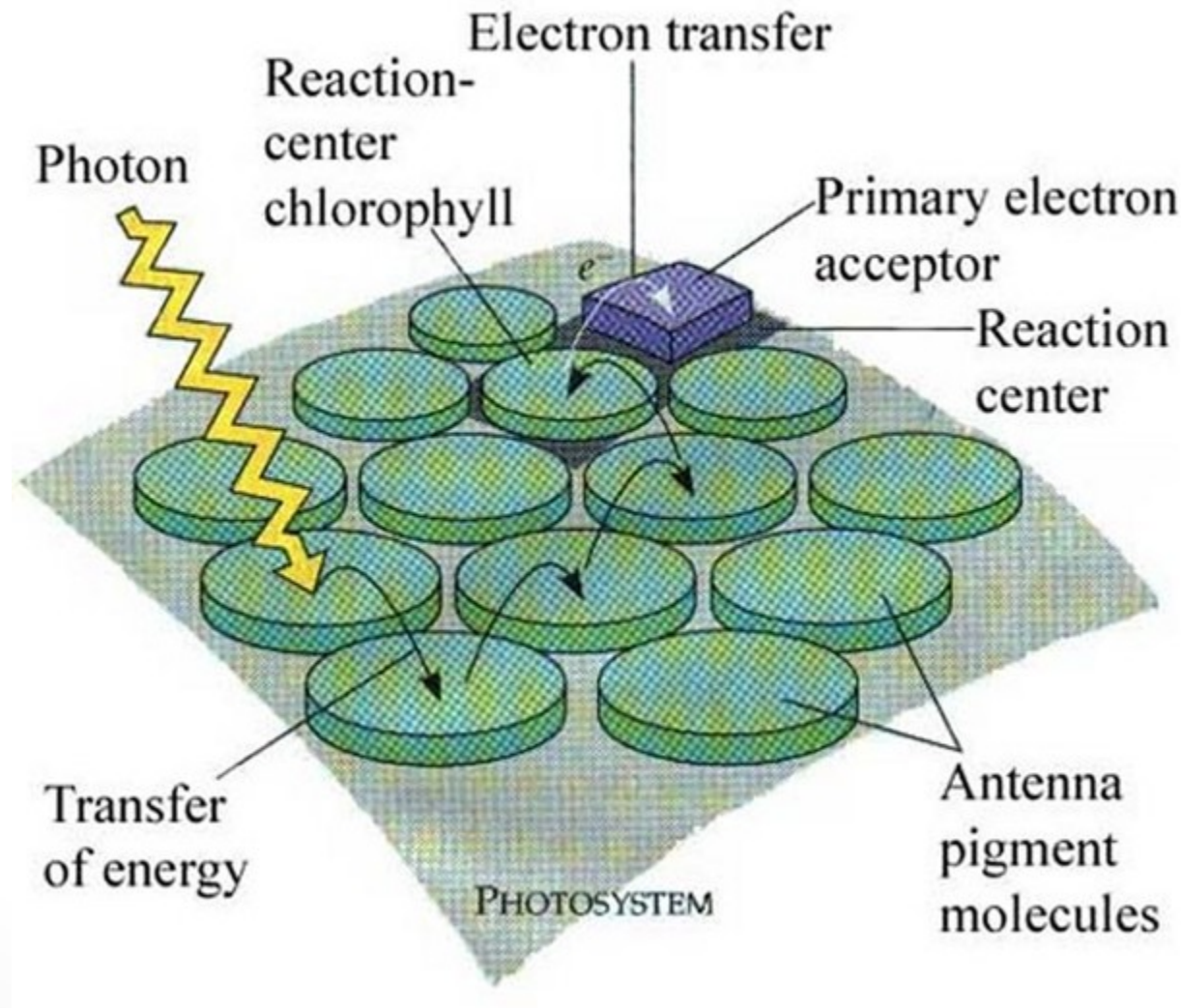


**Lutein**

- Pigmenty absorbující světlo
  - Pokrývají další oblasti spektra
  - Velké množství – efektivní záchyt

# Sběr světla

- Anténní systém
- Organizované pigmenty
- Jednosměrný přenos energie



# Sběr světla

Složení fotosystémů I a II

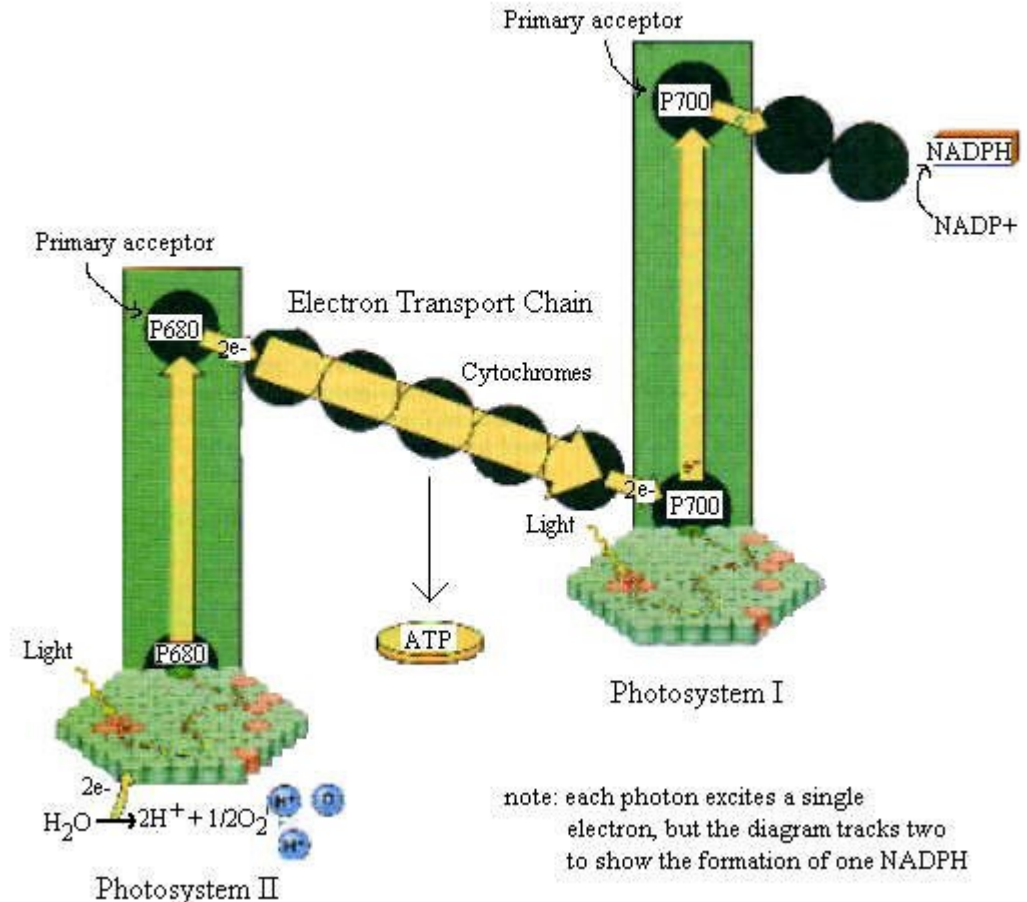
Látka	Přibližný počet molekul
<b>Fotosystém I</b>	
anténové chlorofyly	200
karotenoidy	50
reakční centrum P-700	1
cytochrom $c_{552}$	1
plastocyanin	1
cytochrom $b_{563}$	2
ferredoxin	2
ferredoxin-NAD <sup>+</sup> -reduktasa	1
<b>Fotosystém II</b>	
anténové chlorofyly	200
karotenoidy	50
reakční centrum P-680	1
plastoquinon	4
manganaté ionty	6
cytochrom $b_{559}$	2

- Anténní systém – pomocné pigmenty
  - Efektivní záchyt světelné energie
  - Odlišné u různých typů organismů – bakterie, sinice

Cit 1

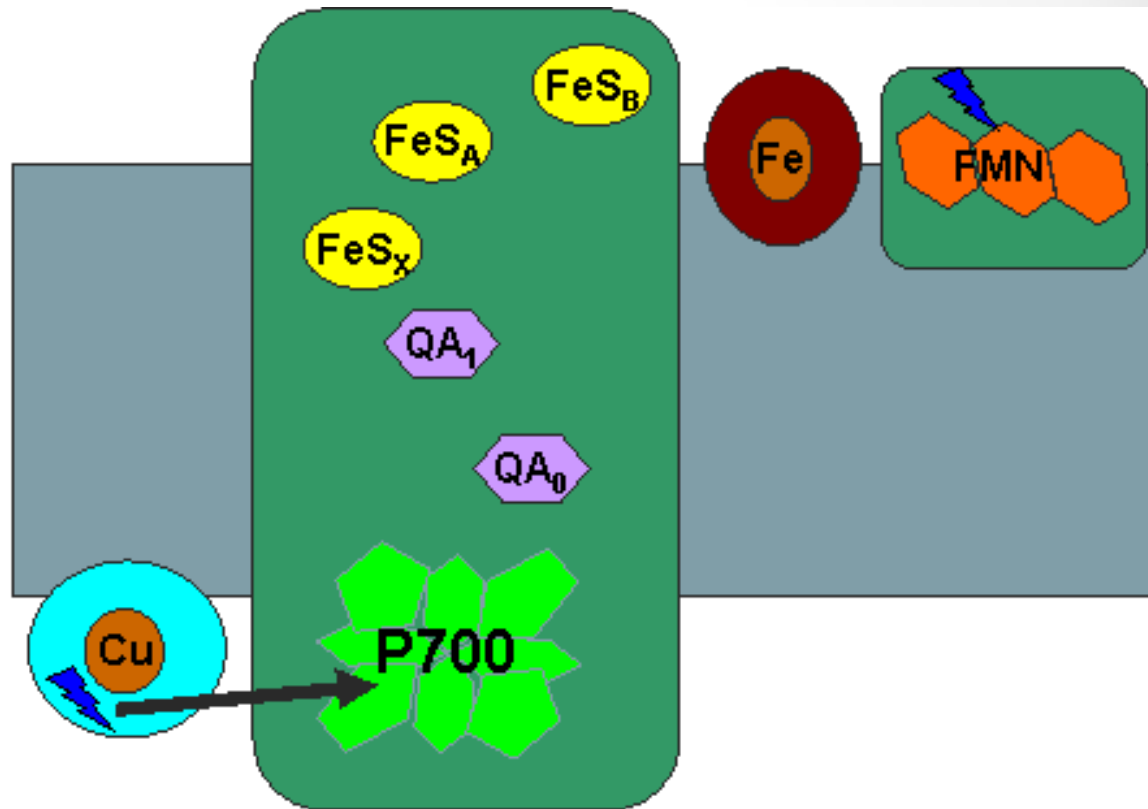
# Využití světelné energie

- Kvantifikace
  - 1 foton – 1 e<sup>-</sup>
- Redukce NADP<sup>+</sup>
  - 2x2 fotony
- Syntéza ATP
  - 1 při necyklickém transportu e<sup>-</sup> při redukci
  - Další cyklickým transportem e<sup>-</sup>
  - Potřeba více ATP než NADPH pro redukci CO<sub>2</sub>



# Redukce NADP<sup>+</sup>

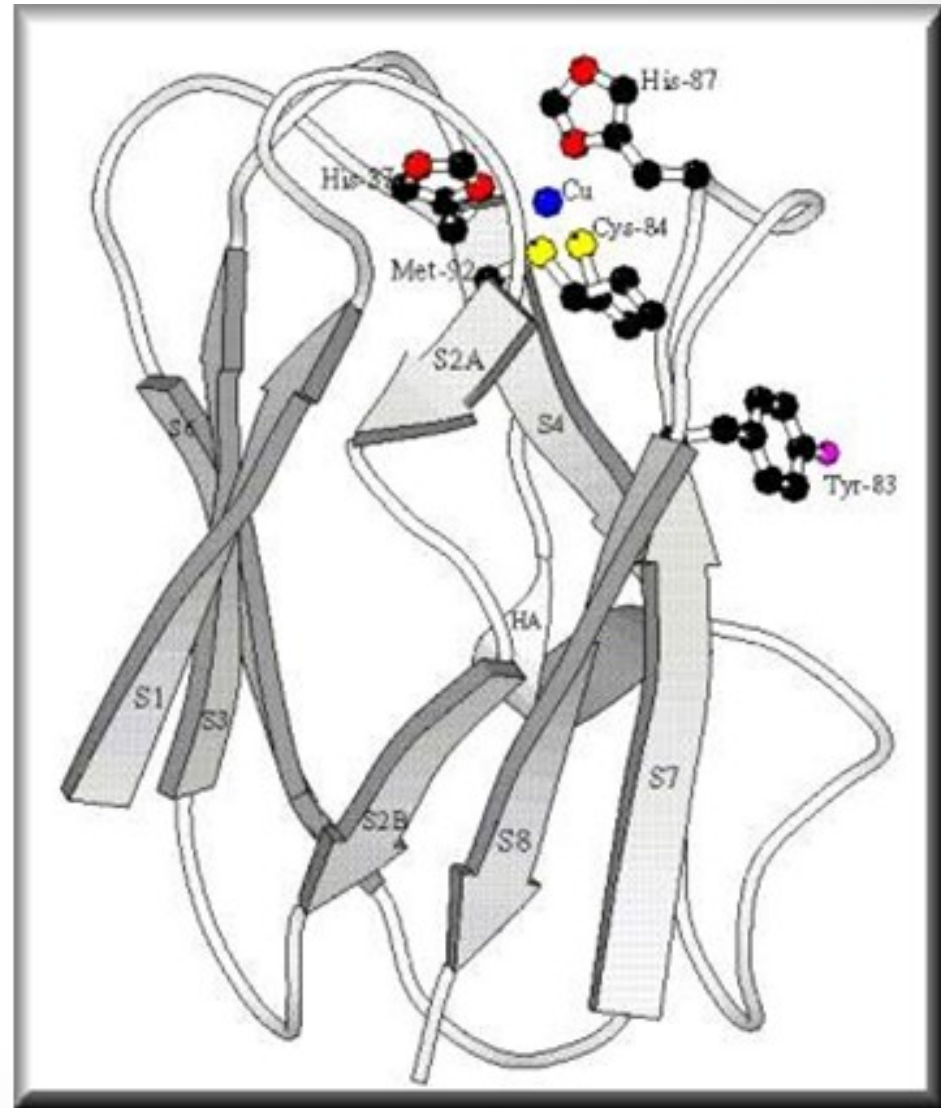
- Finální krok
- Redukce PSI plastocyaninem
- Účast kofaktorů
  - Q a FeS centra
- Ferredoxin (Fe)
- NADP<sup>+</sup> reduktasa
  - Kofaktor FMN



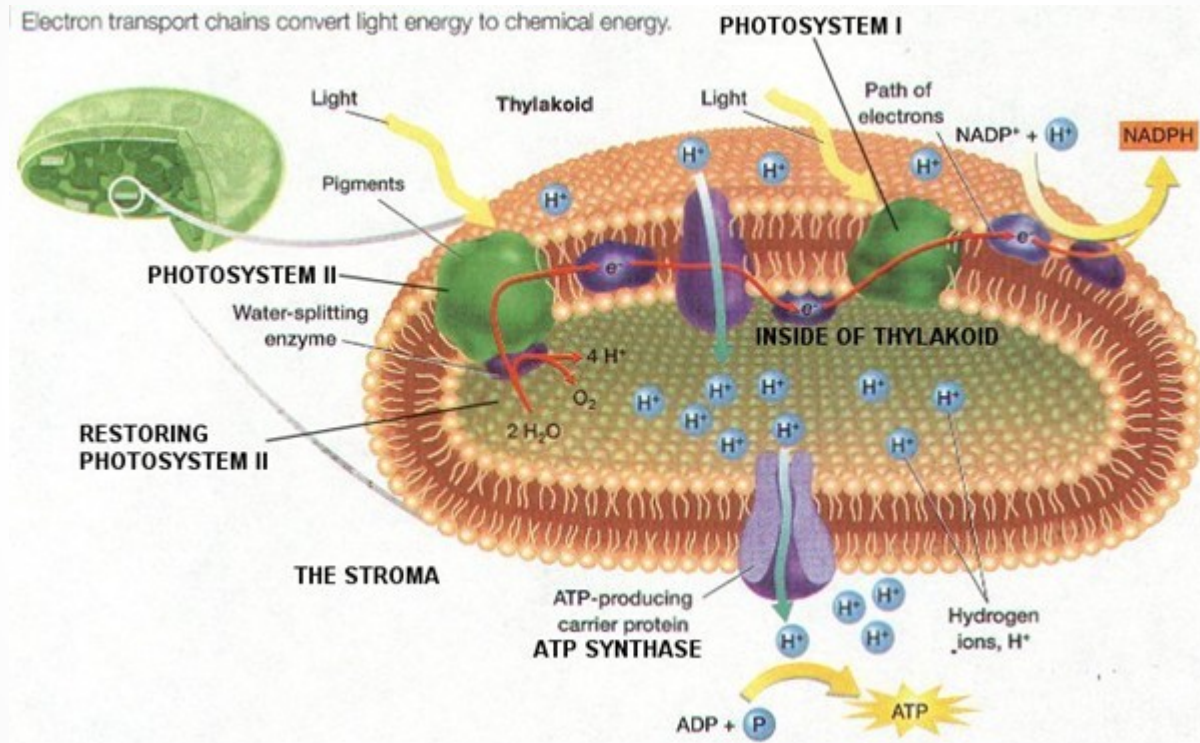


# Plastocyanin

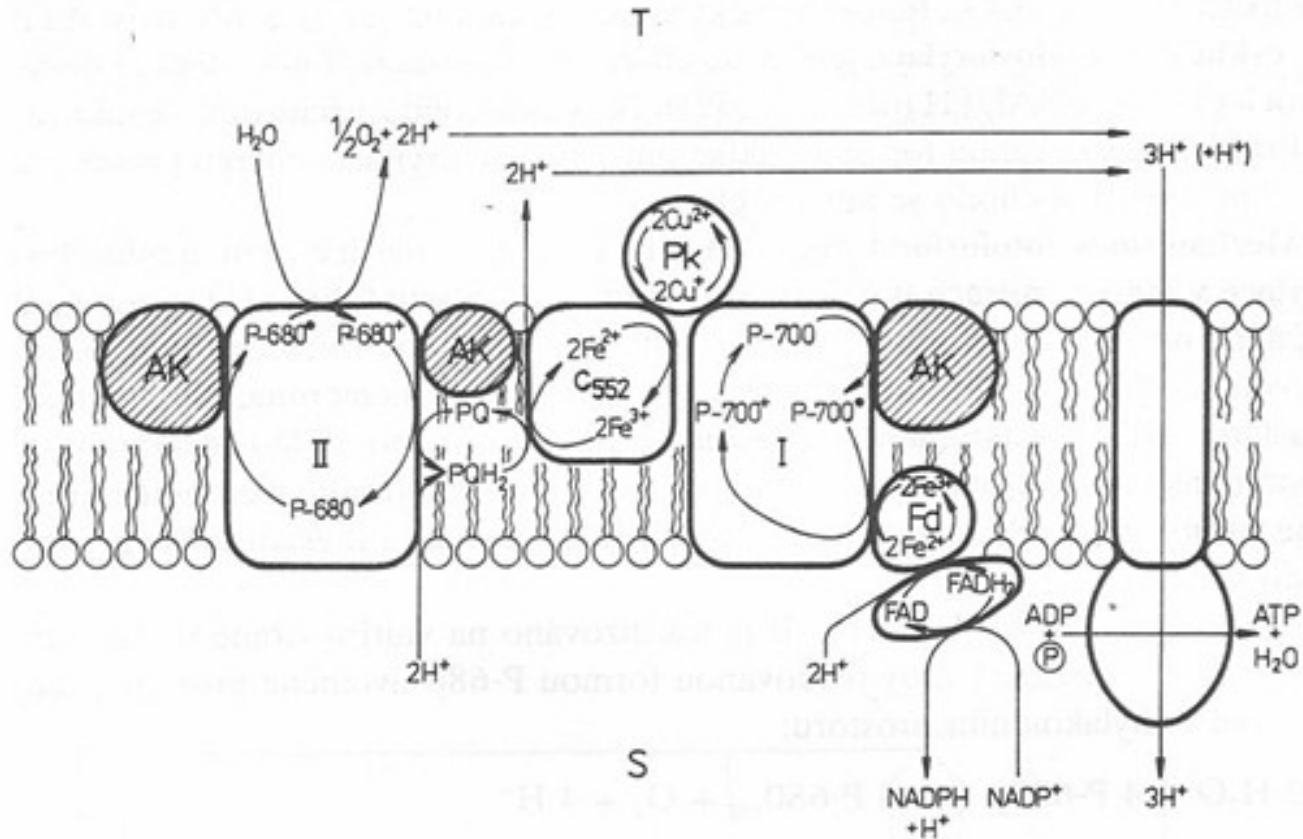
- Kuproprotein
- $E^0 = 370 \text{ mV}$ , pro  $\text{Cu(II)/Cu(I)} = 158 \text{ mV}$  modulace bílkovinou
- Funkcí podobný cyt c



# Tvorba ATP



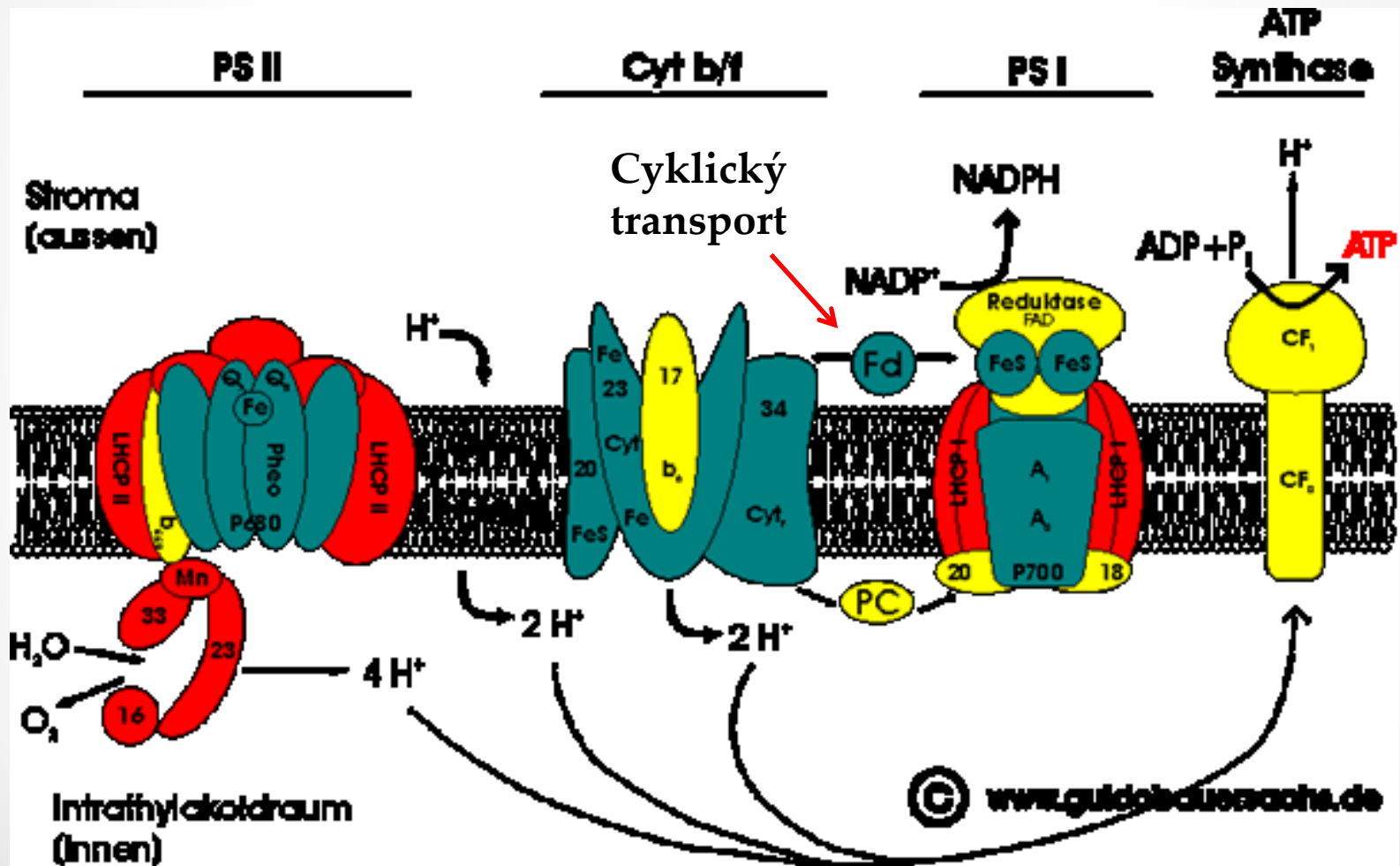
- Mechanismus jako u oxidační fosforylace



**Schéma chemiosmotického mechanismu fotosforylace v thylakoidní membráně**  
 (T thylakoidní prostor, S stroma, AK anténové komplexy, I, II odpovídající fotosystémy, Fd ferredoxin, Pc plastocyanin, PQ plastochinon)

Cit 1

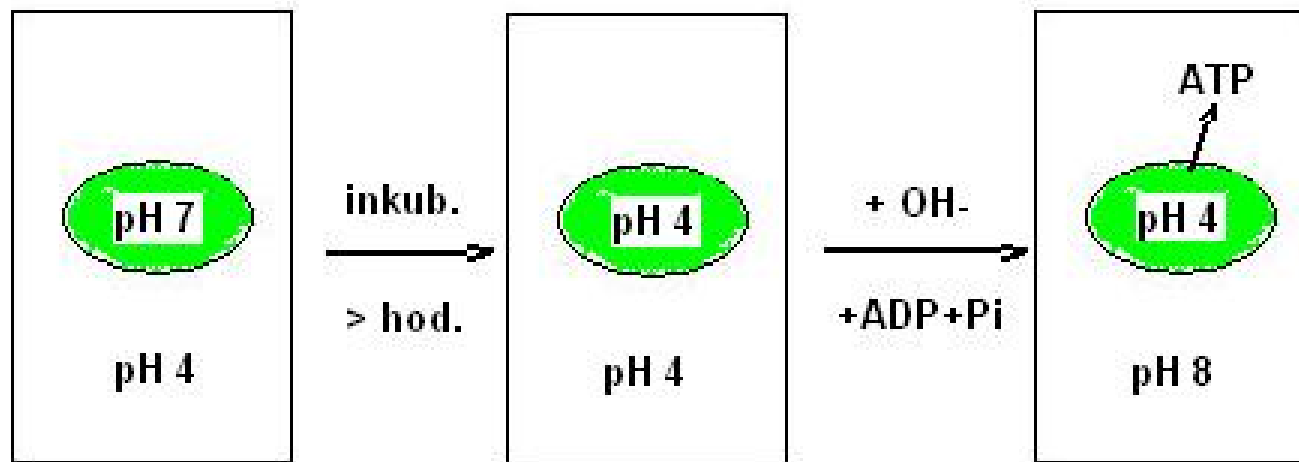
# Struktura a funkce PS řetězce přenosu elektronů



# Bilance přenosu $e^-$

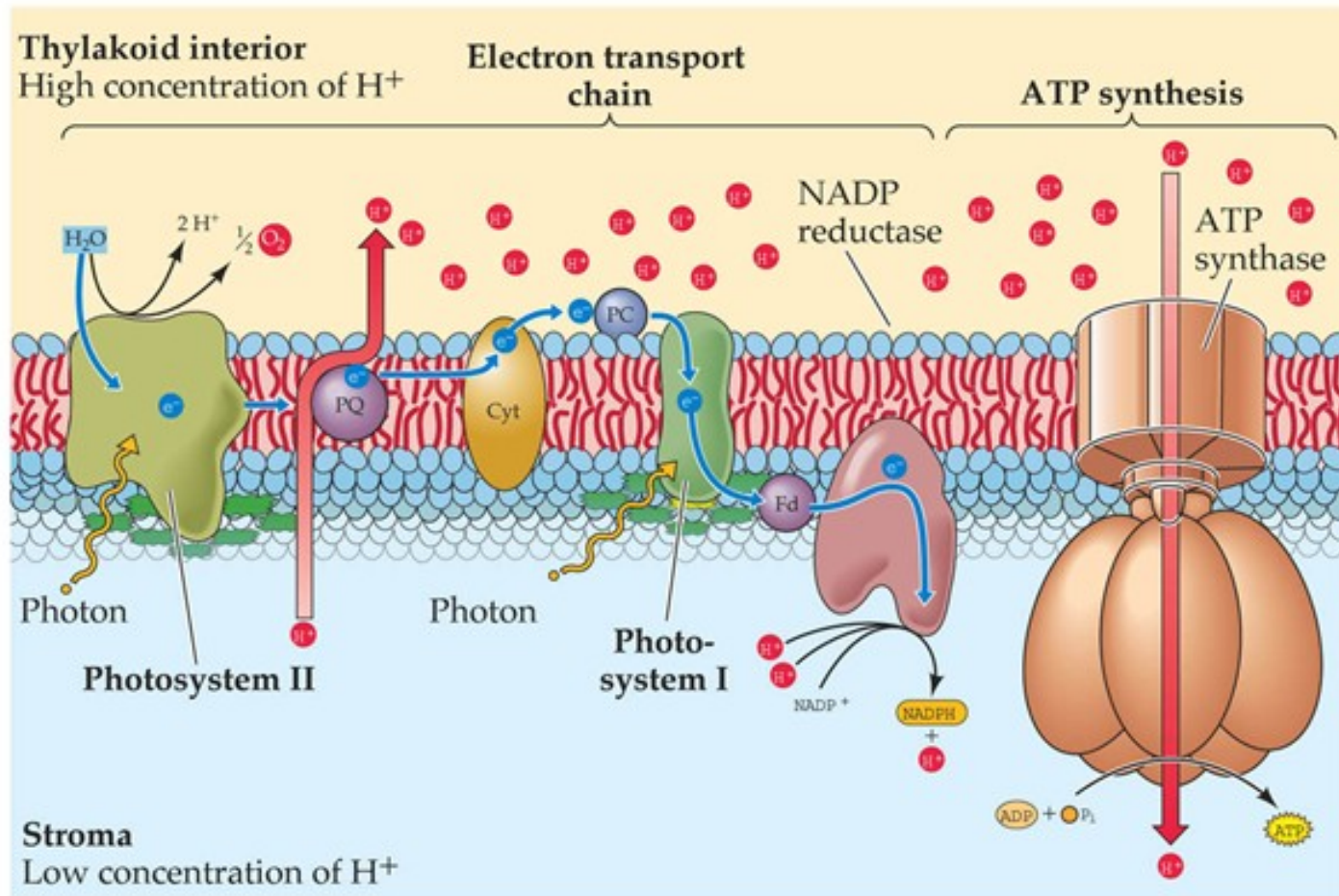
- $2 \text{H}_2\text{O} = \text{O}_2 + 4 \text{H}^+$  (do lumen) +  $4 e^-$
- $2 \text{H}^+$  (ze stroma) +  $4 e^- + 2 \text{NADP}^+ = 2 \text{NADPH}$
- Potřeba 8 fotonů
  - Experimentálně 8 – 10 na 1 uvolněnou  $\text{O}_2$
- 8  $\text{H}^+$  translokováno do lumen přes bf komplex
- Celkem 12 – tj. stačí na syntézu 4 ATP
- Protonmotivní síla téměř zcela záležitostí  $\Delta\text{pH}$ 
  - Díky propustnosti membrány pro  $\text{Mg}^{2+}$  a  $\text{Cl}^-$  je  $\Delta\Psi$  blízka 0

# Umělý systém syntézy ATP



- Experimentální průkaz tvorby ATP na konto  $\Delta H^+$
- První potvrzení chemiosmotické teorie – tylakoidy

# Sumární schema světelné fáze



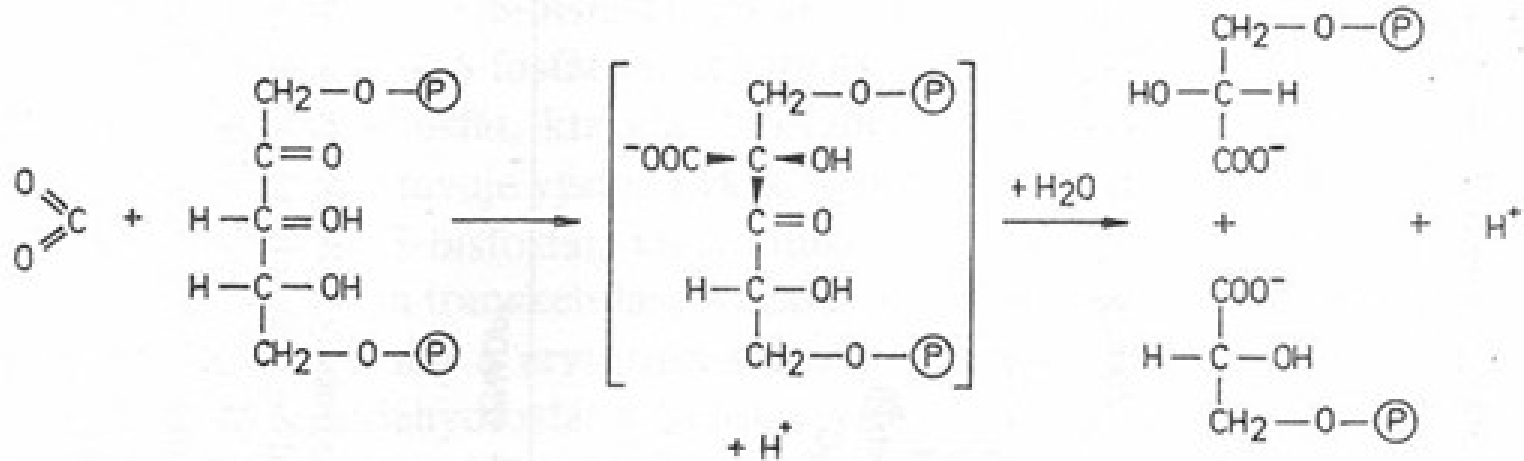
LIFE: THE SCIENCE OF BIOLOGY, Seventh Edition, Figure 8.11 Chloroplasts Form ATP Chemiosmotically  
© 2004 Sinauer Associates, Inc. and W. H. Freeman & Co.

# Temná fáze

- Fixace a asimilace  $\text{CO}_2$ 
  - Akceptor Ru-1,5-bisP
  - RUBISCO – ribulosabifosfát karboxylasa oxygenasa
- Redukce – form.  $\text{CO}_2 + 4[\text{H}] = \text{HCOH} + \text{H}_2\text{O}$ 
  - Vznik GAP
  - Vyžaduje NADPH a ATP
  - Obrat glykolytické reakce GAPDH
- Regenerace akceptoru  $\text{CO}_2$ 
  - GAPDH – fruktosa-1,6-bisfosfát
  - Obrat pentosového cyklu
  - Transaldolace a transketolace
  - $6 \text{CO}_2 + 6 \text{C}_5 = 6 \text{C}_6$
  - $5 \text{C}_6 = 6 \text{C}_5$  – další spotřeba ATP



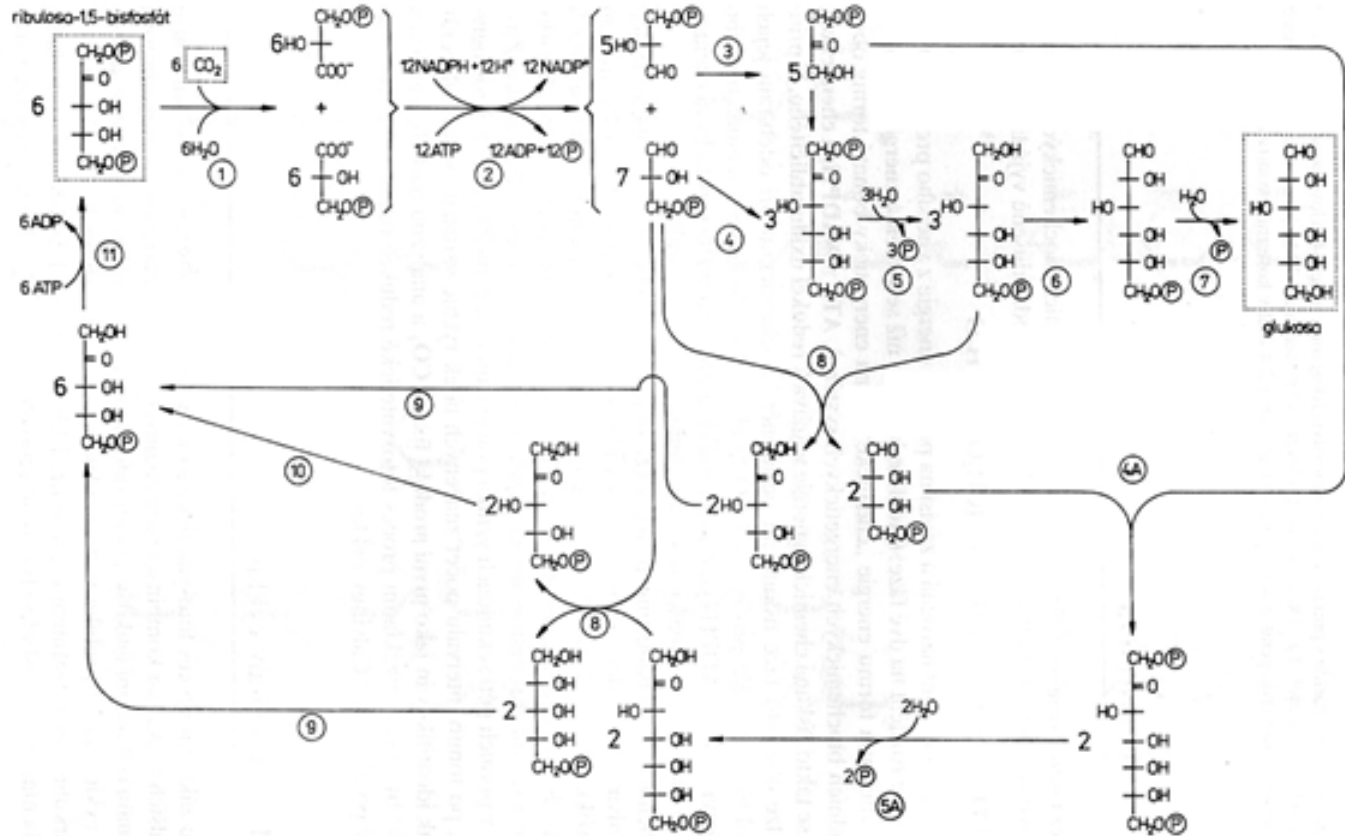
# Fixace CO<sub>2</sub>



Cit 1

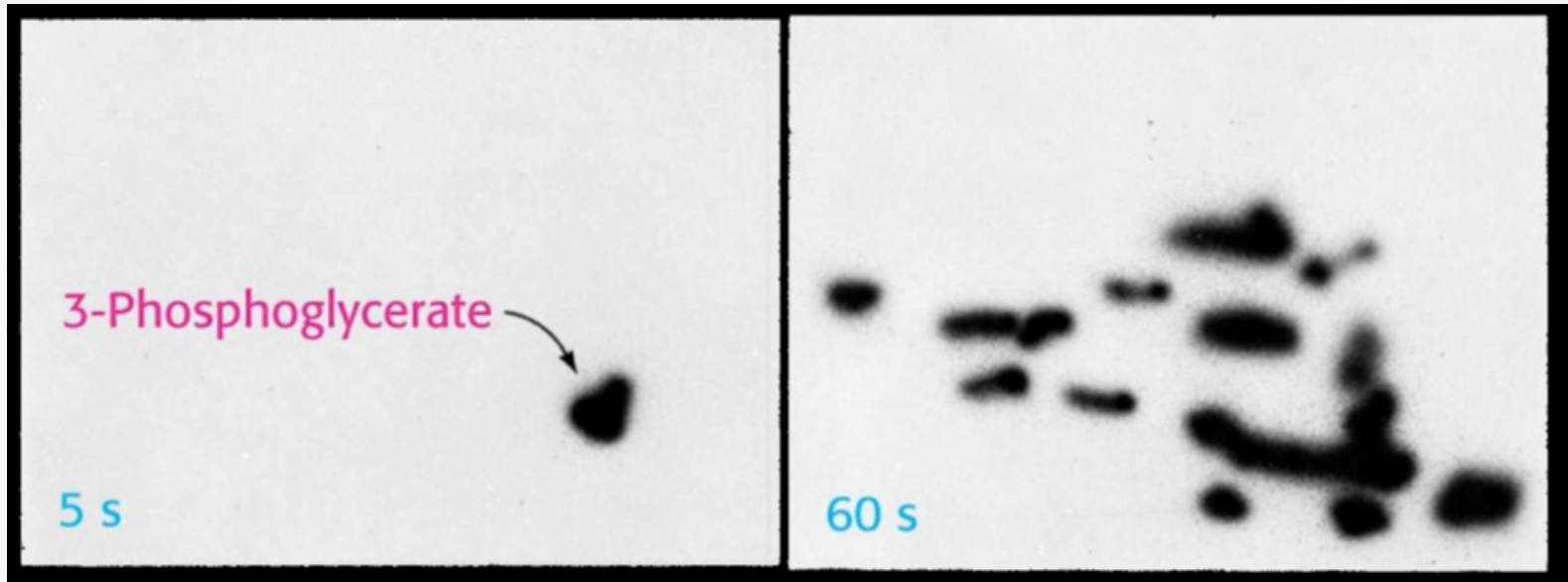
- Ribulosabisfosfát karboxylasa oxygenasa
  - Alternativně reaguje s O<sub>2</sub> - vzniká P-glykolát – disipace energie
  - Nejvíce syntetizovaná bílkovina v biosféře

# Calvinův cyklus



- Redukce 3PG a regenerace Ru1-1,5-bis P

# Calvinův cyklus

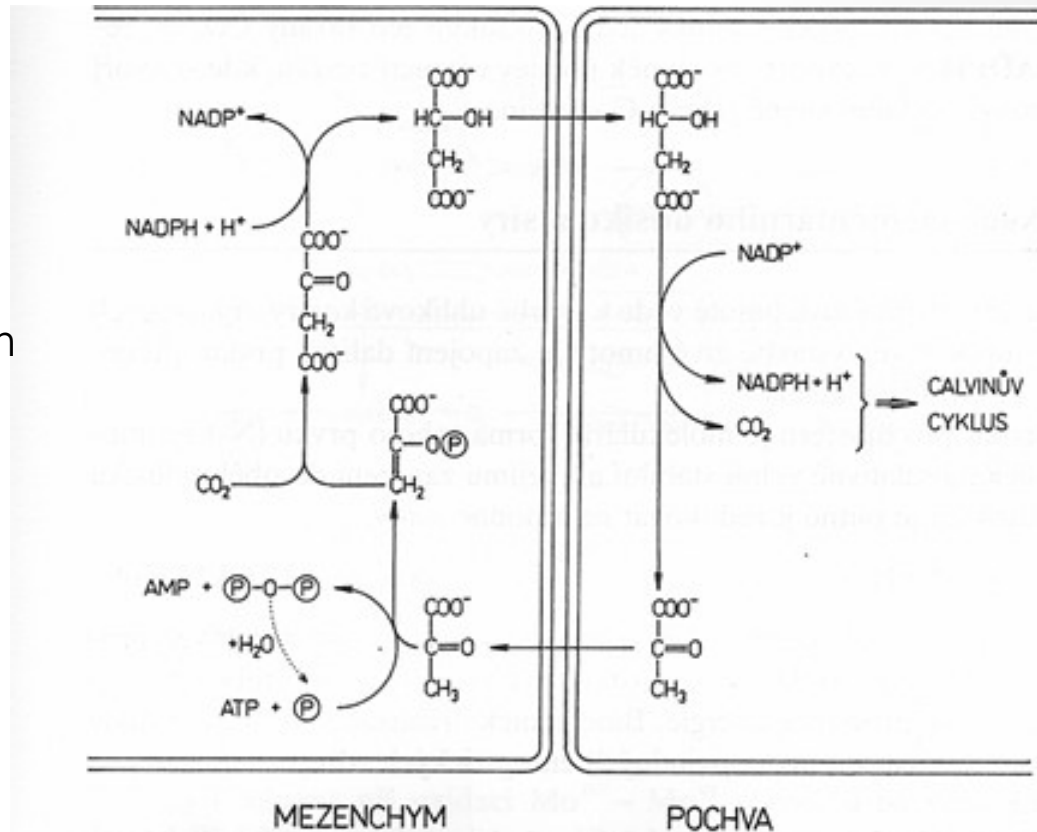


- Studován pomocí papírové chromatografie  $^{14}\text{C}$ -metabolitů (špenát, *Chlorella*)
  - Melvin Calvin, James Bassham, Andrew Benson
  - UCB, NC 1961



# C4 mechanismus

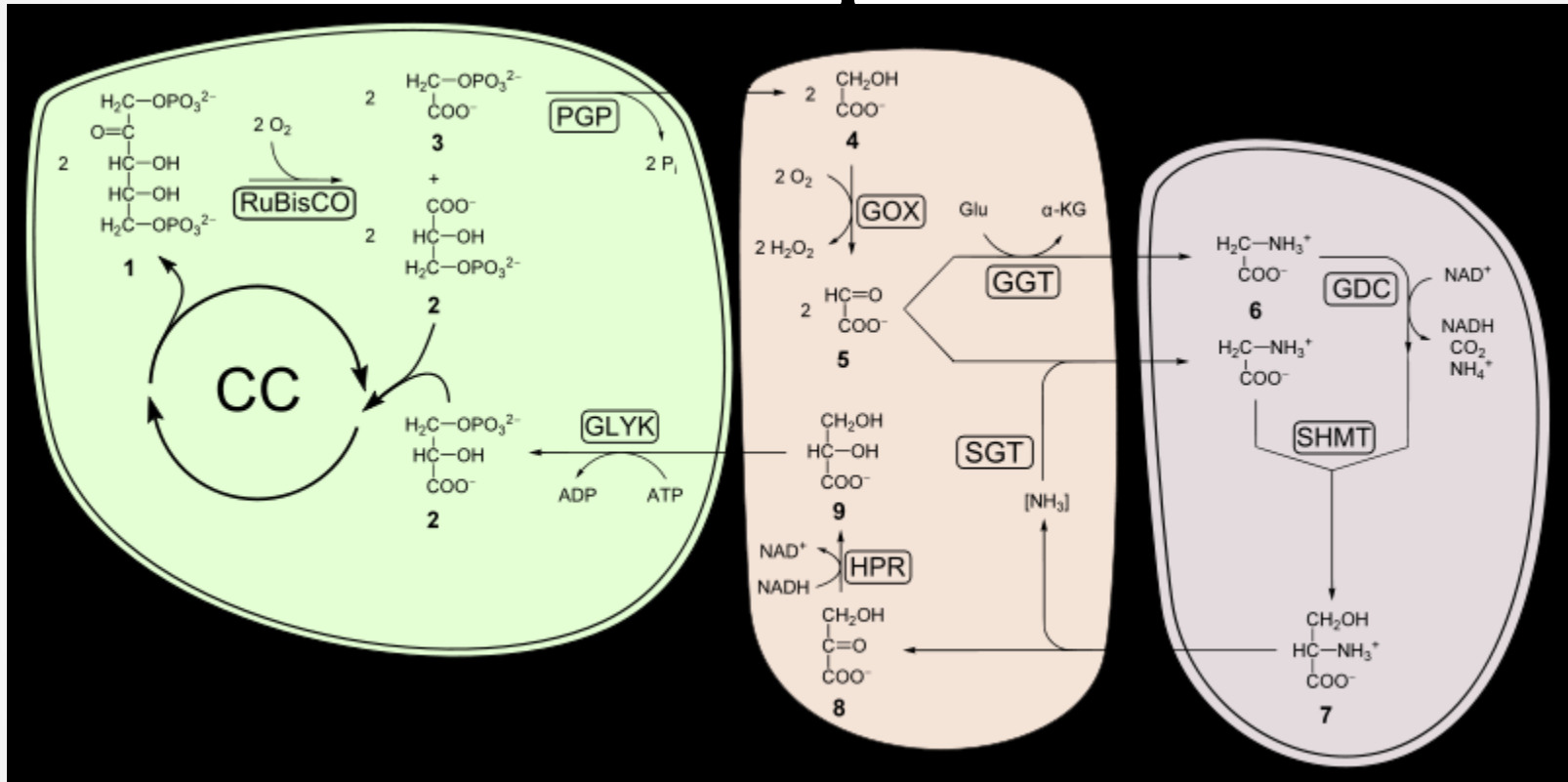
- Pomocný pochod záchytu  $\text{CO}_2$ 
  - C4 rostliny v oblastech s vysokým slunečním svitem
  - Efektivnější záchyt  $\text{CO}_2$
  - Probíhá v noci při uzavřených průduchách
    - omezení ztráty vody
  - Tvorba C4 metabolitů
    - malát, oxalacetát



Obr. 145 Schéma fixace  $\text{CO}_2$  u (malátových)  $\text{C}_4$ -rostlin

Cit 1

# Fotorespirace



- Nedostatek  $\text{CO}_2$

