

# Reforma a rozvoj výuky Biofyziky pro potřeby 21. století

Číslo výzvy: **IPo - Oblast 2.2 (výzva 15)**

Reg. č. projektu: **CZ.1.07/2.2.00/15.0215**



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

# *Světlosběrné systémy fotosyntetických organismů*

Tomáš Polívka

Ústav fyzikální biologie  
Jihočeská univerzita

NO. 4865 January 26, 1963

N A T U R E

355

## TRANSFER OF ENERGY FROM BACTERIOCHLOROPHYLL TO A REACTION CENTRE DURING BACTERIAL PHOTOSYNTHESIS

By W. J. VREDENBERG and DR. L. N. M. DUYSSENS

Biophysical Laboratory, State University, Nieuwsteeg 18, Leyden

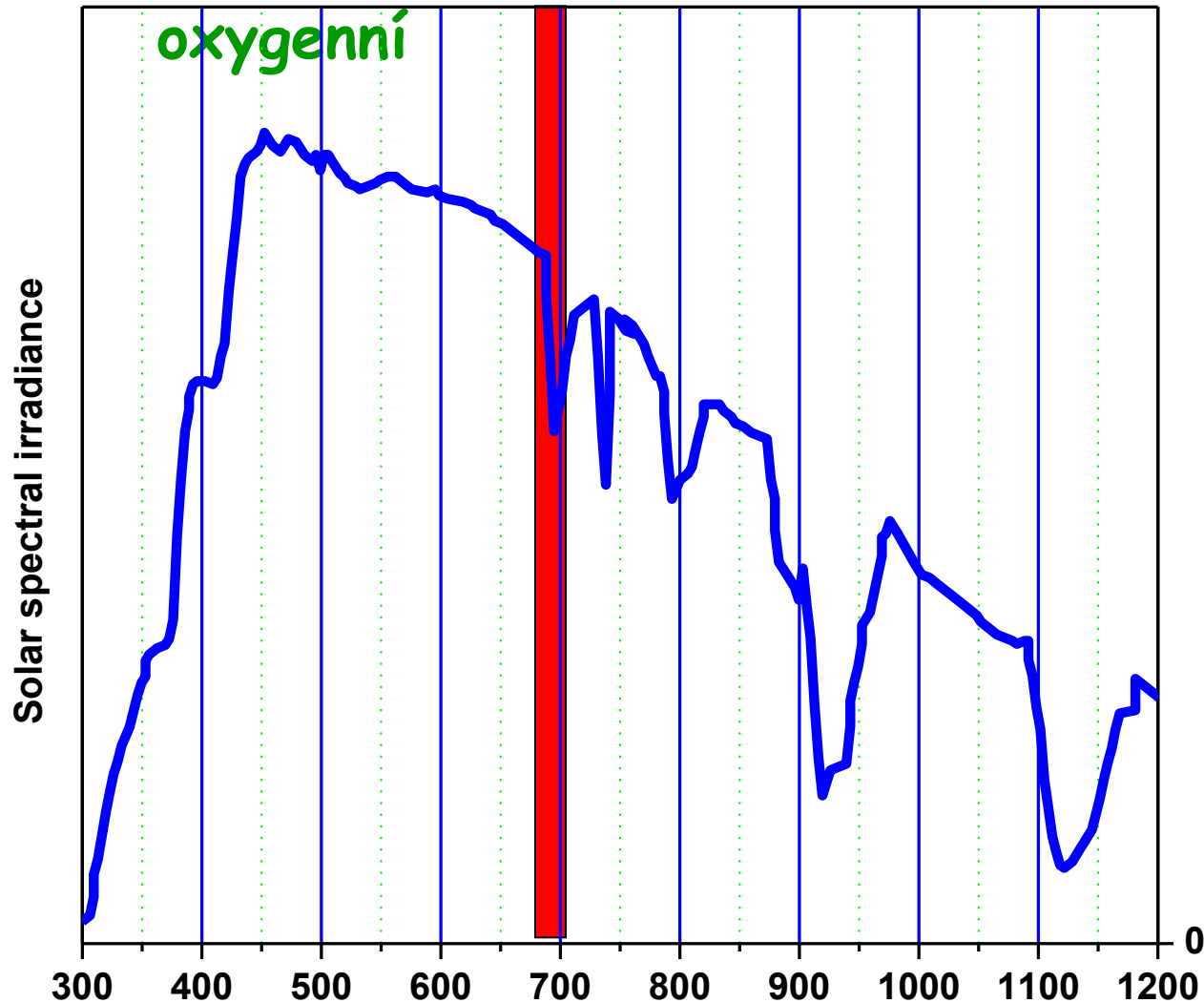
# *Světlosběrný systém = anténa*



Cover photo from  
Ph.D. Thesis by  
M. Visser

# *Spektrum slunečního záření*

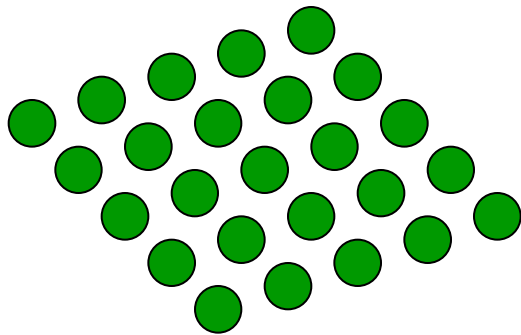
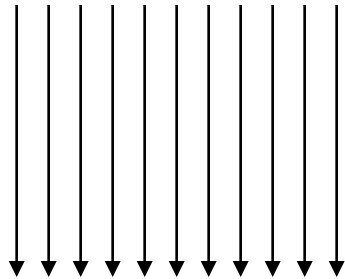
$$0.2\text{--}2 \text{ mE m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 10^{20}\text{--}10^{21} \text{ fotonů m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



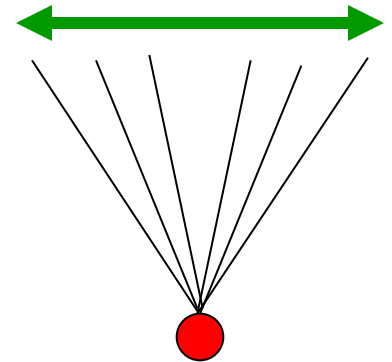
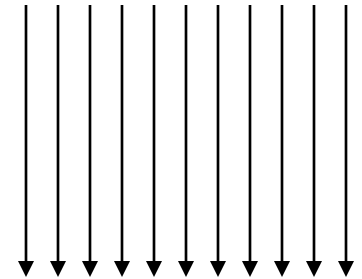
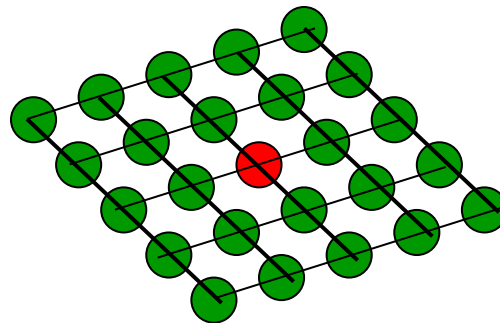
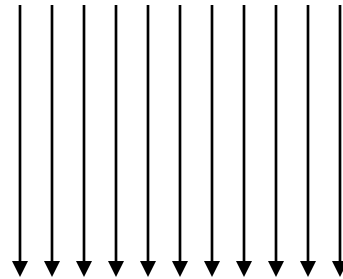
# *Proč antény?*

$$0.2-2 \text{ mE m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 10^{20}-10^{21} \text{ fotonů m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Účinný průřez molekuly chlorofylu:  $\sim 1 \text{ Å}^2$

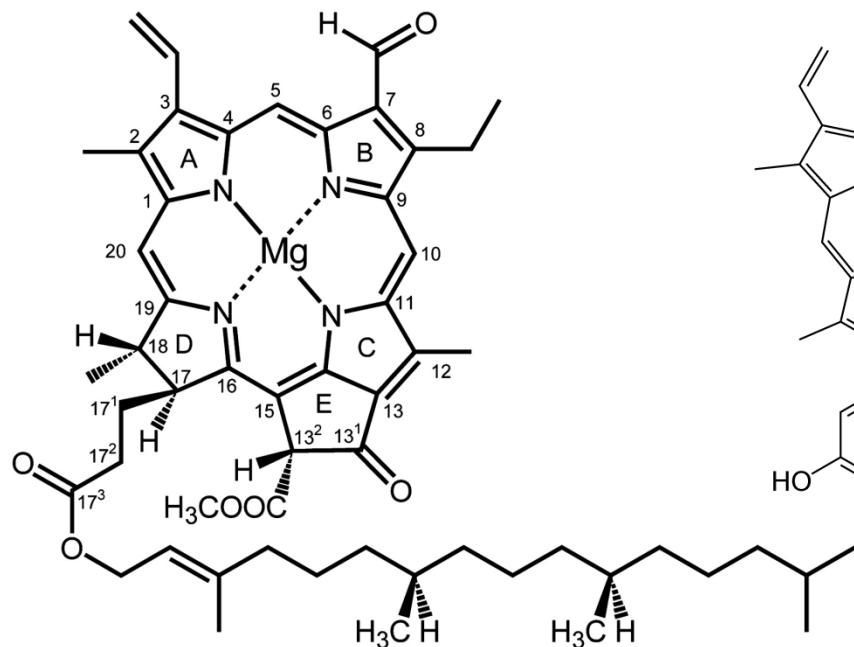


$1-10 \text{ fotonů Chl}^{-1} \text{ s}^{-1}$

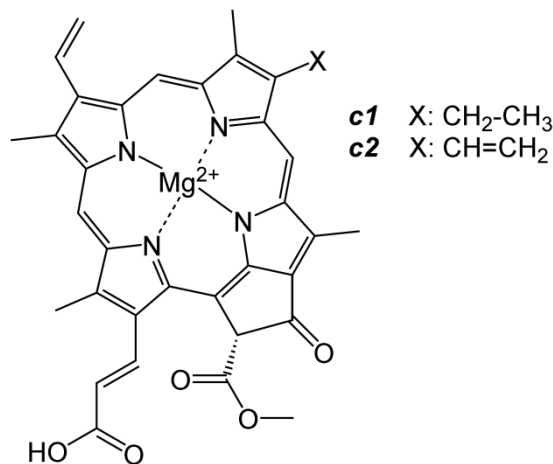


Zvýšení intenzity až  $10^2-10^6$

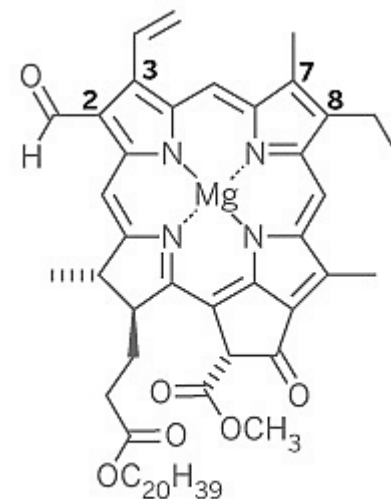
# Chlorofyly



**Chlorofyl a,b,d**



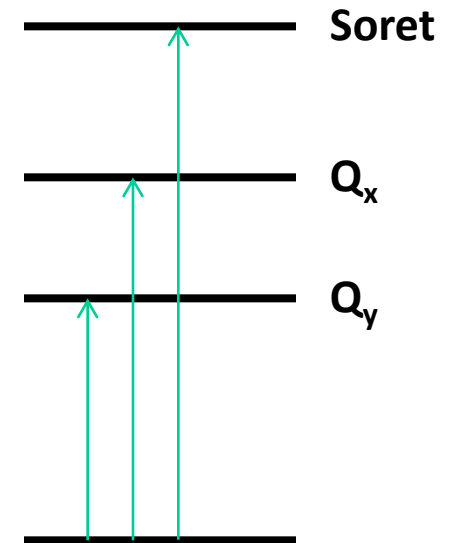
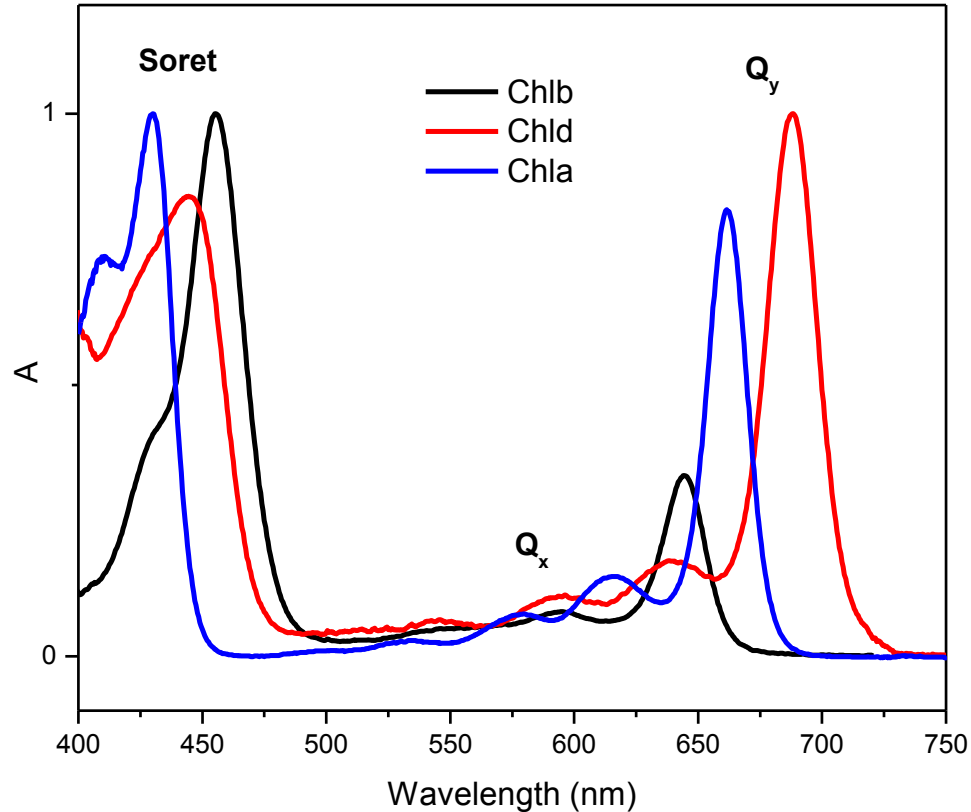
**Chlorofyl c**



**Chlorophyll f**

	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Chlorophyll c1	Chlorophyll c2	Chlorophyll d	Chlorophyll f
Molecular formula	C <sub>55</sub> H <sub>72</sub> O <sub>5</sub> N <sub>4</sub> Mg	C <sub>55</sub> H <sub>70</sub> O <sub>6</sub> N <sub>4</sub> Mg	C <sub>35</sub> H <sub>30</sub> O <sub>5</sub> N <sub>4</sub> Mg	C <sub>35</sub> H <sub>28</sub> O <sub>5</sub> N <sub>4</sub> Mg	C <sub>54</sub> H <sub>70</sub> O <sub>6</sub> N <sub>4</sub> Mg	C <sub>55</sub> H <sub>70</sub> O <sub>6</sub> N <sub>4</sub> Mg
C2 group	-CH <sub>3</sub>	-CH <sub>3</sub>	-CH <sub>3</sub>	-CH <sub>3</sub>	-CH <sub>3</sub>	-CHO
C3 group	-CH=CH <sub>2</sub>	-CH=CH <sub>2</sub>	-CH=CH <sub>2</sub>	-CH=CH <sub>2</sub>	-CHO	-CH=CH <sub>2</sub>
C7 group	-CH <sub>3</sub>	-CHO	-CH <sub>3</sub>	-CH <sub>3</sub>	-CH <sub>3</sub>	-CH <sub>3</sub>
C8 group	-CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	-CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	-CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	-CH=CH <sub>2</sub>	-CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	-CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>
C17 group	-CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COO-Phytol	-CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COO-Phytol	-CH=CHCOOH	-CH=CHCOOH	-CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COO-Phytol	-CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COO-Phytol
C17-C18 bond	Single (chlorin)	Single (chlorin)	Double (porphyrin)	Double (porphyrin)	Single (chlorin)	Single (chlorin)
Occurrence	Universal	Mostly plants	Various algae	Various algae	Cyanobacteria	Cyanobacteria

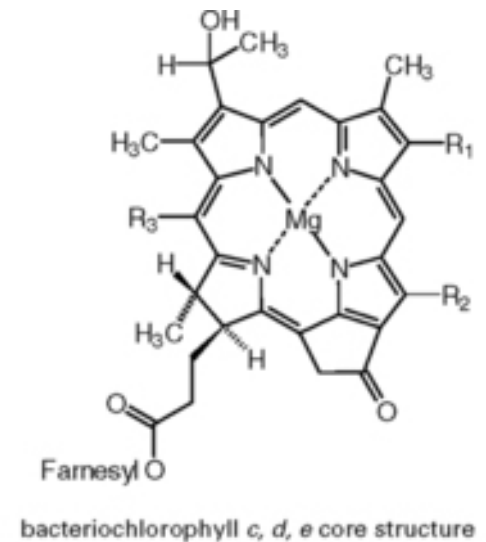
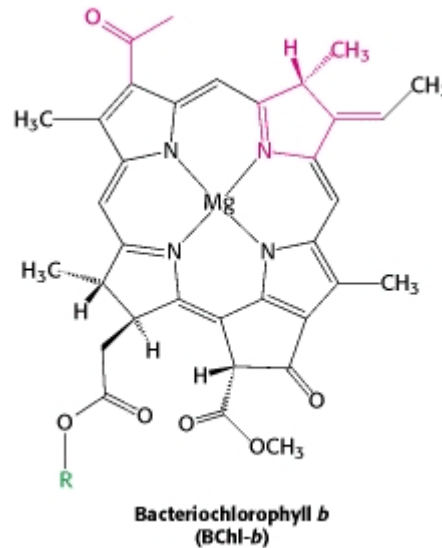
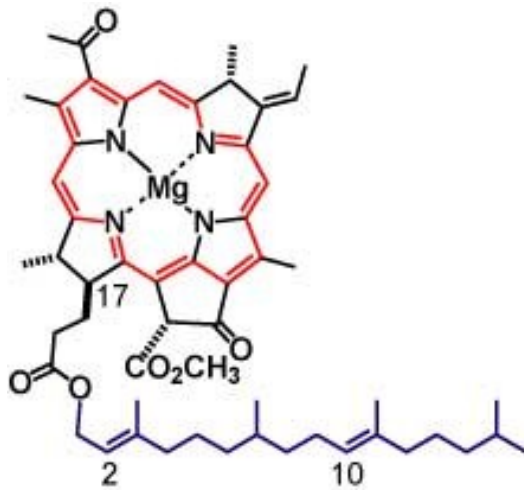
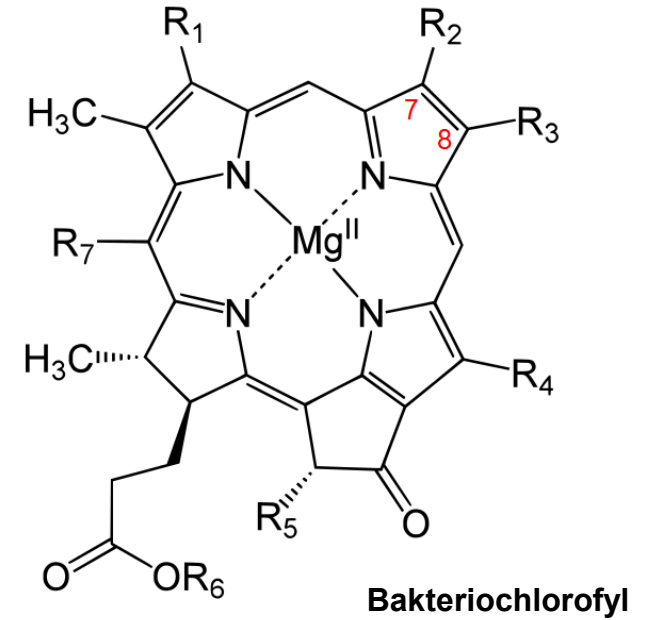
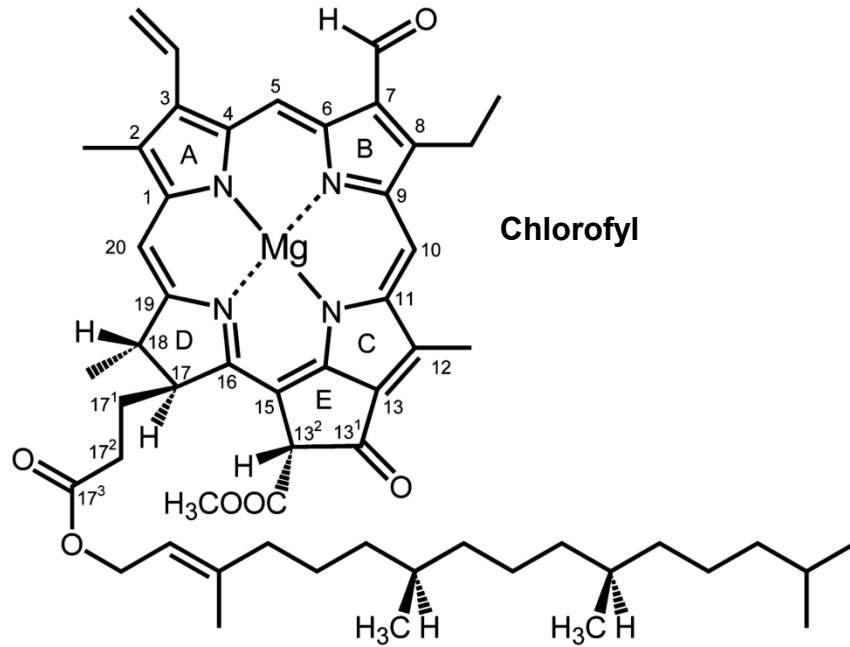
# *Spektroskopie chlorofylů*



**Intenzita absorpčních pásů je dána dipólovým momentem přechodu**

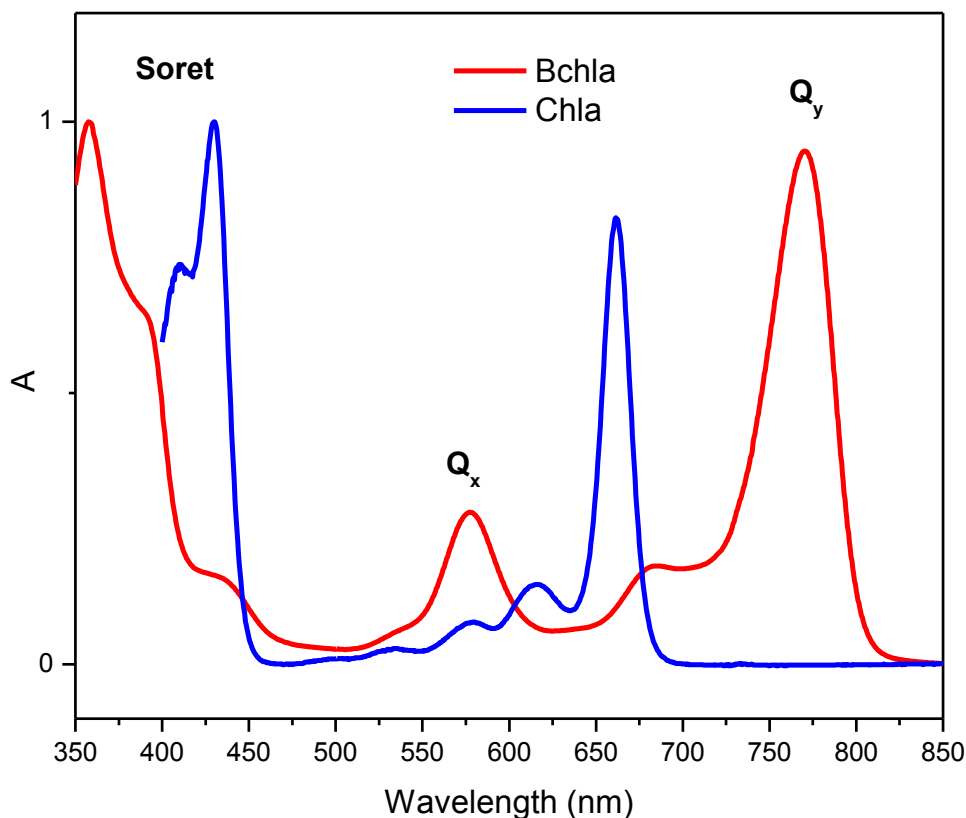
**Polohy absorpčních pásů dány interakcí s prostředím**

# Bakteriochlorofyly





# Spektroskopie bakteriochlorofylů

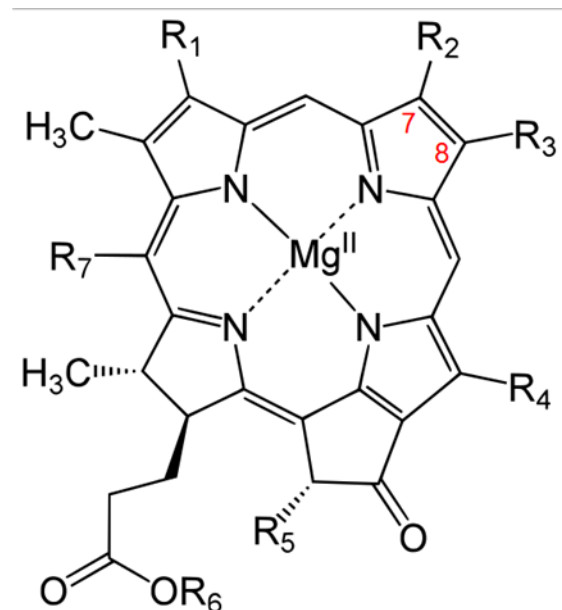


	Q <sub>y</sub>	Soret
BChl-a	770	365
BChl-b	795	375
BChl-c	665	435
BChl-d	655	425
BChl-e	655	470
BChl-g	765	365

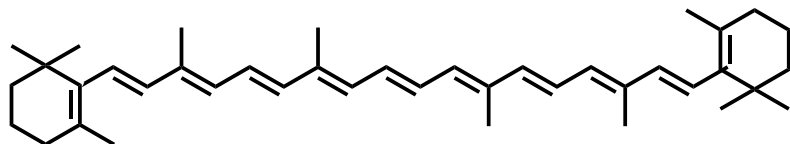
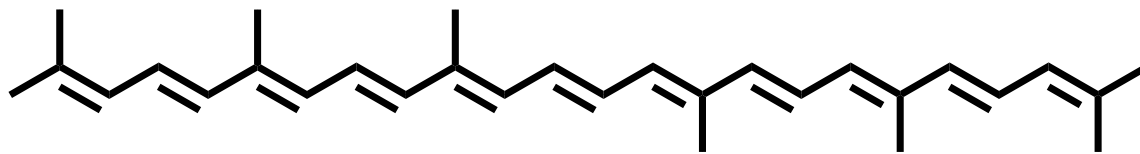
**Dvě skupiny:**

**a, b, g obsahují C-C vazbu mezi uhlíky 7 a 8**

**c, d, e obsahují C=C vazbu mezi uhlíky 7 a 8**



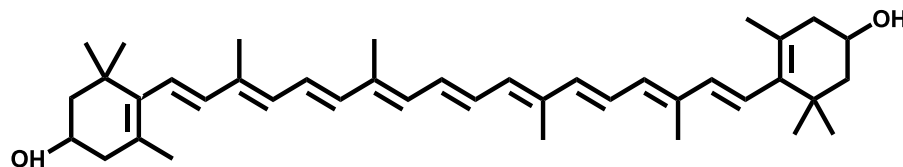
# Karotenoidy



**$\beta$ -carotene**

*Izolován v roce 1831*

**Karoteny (uhlovodíky)**



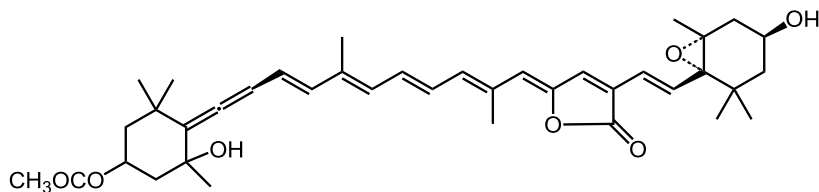
**Zeaxanthin**

*Izolován v roce 1837*

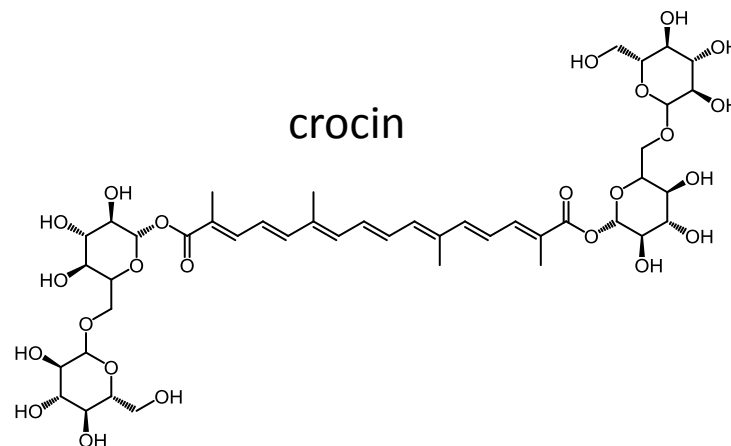
**Xantofyly (obsahují kyslík)**

Značná variabilita, dosud popsáno přibližně 1000 různých karotenoidů

**peridinin**



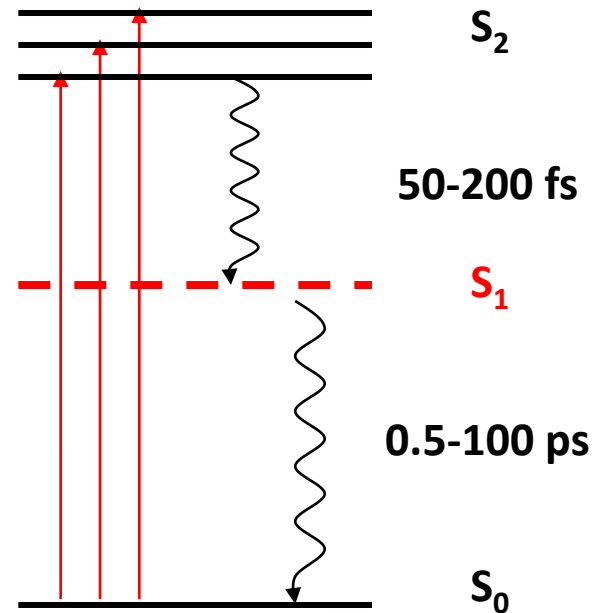
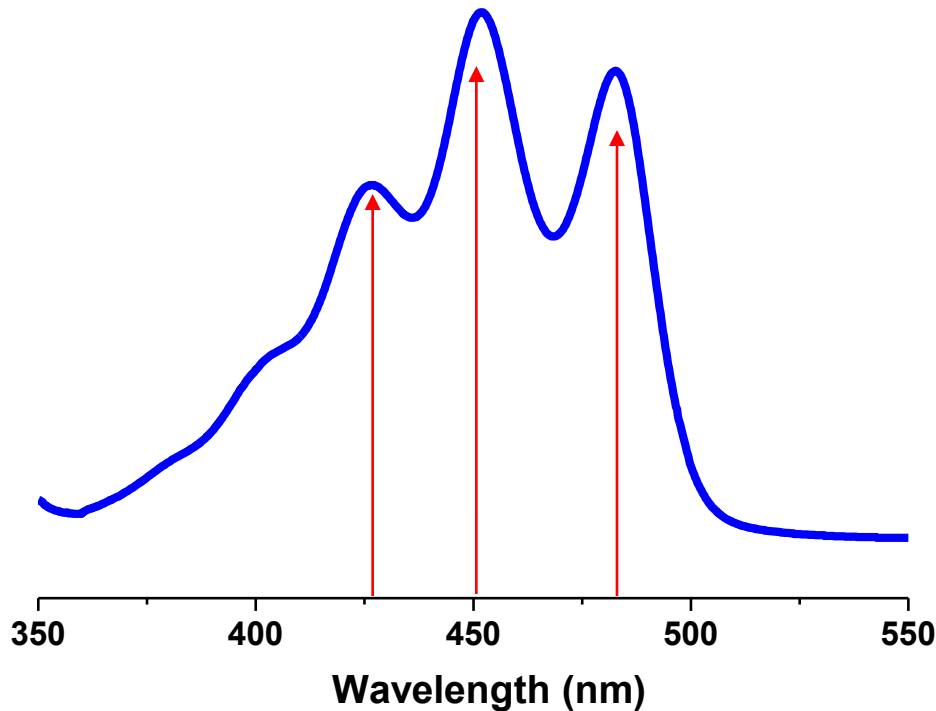
**crocin**



**Syntetizovány pouze rostlinami a mikroorganismy, celková produkce  $\sim 10^8$  tun ročně**

Moran & Jarvik, Science 2010 – mšice se syntézou karotenoidů!

# *Spektroskopie karotenoidů*

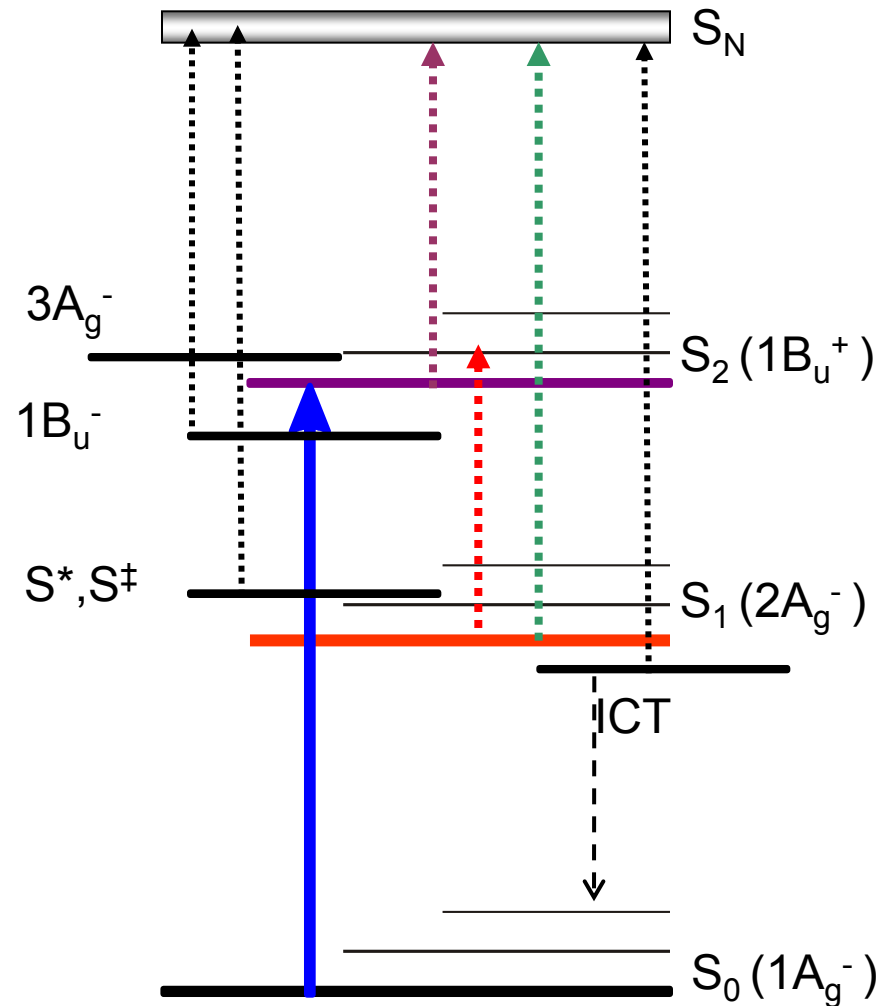
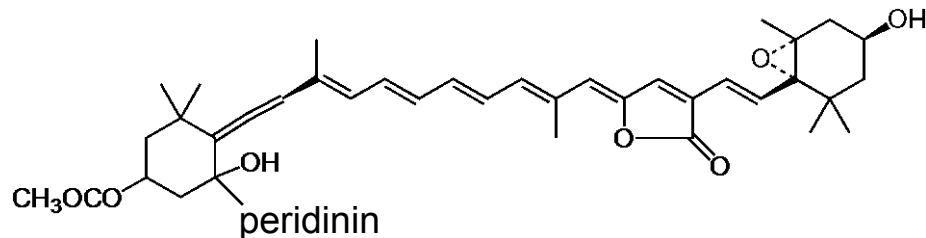
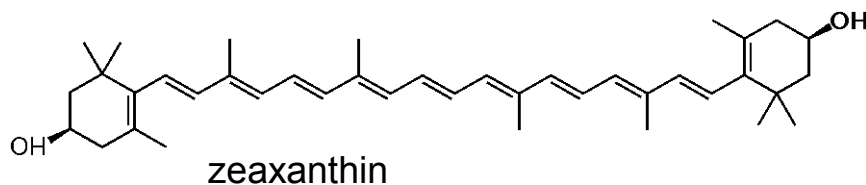
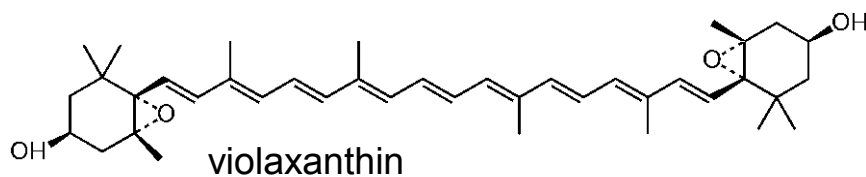
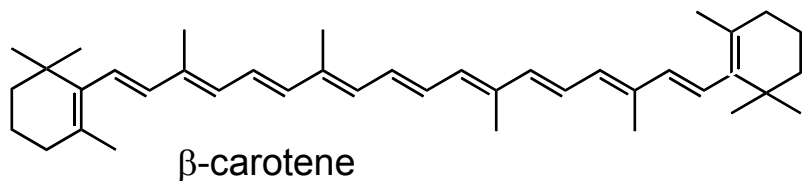
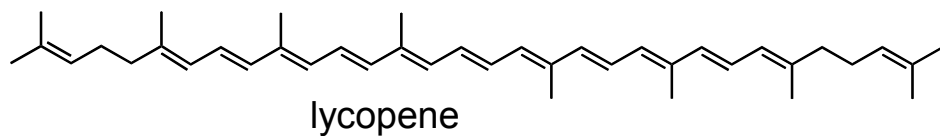


Přírodní barviva, silně absorbují v modro-zelené oblasti spektra

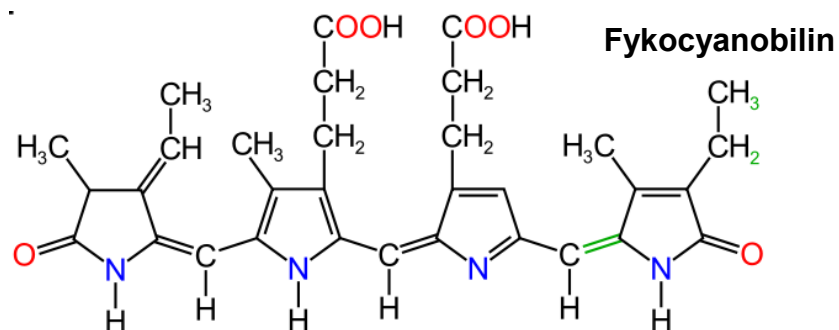
Na rozdíl od jiných barviv, nemají téměř žádnou emisi ( $\Phi < 10^{-4}$ )

Zakázaný excitovaný stav ležící níže než absorbující energetický stav  
Schulten & Karplus, Chem. Phys. Lett. 1972, 14, 305.

# Excitované stavy karotenoidů



# Fykobiliny

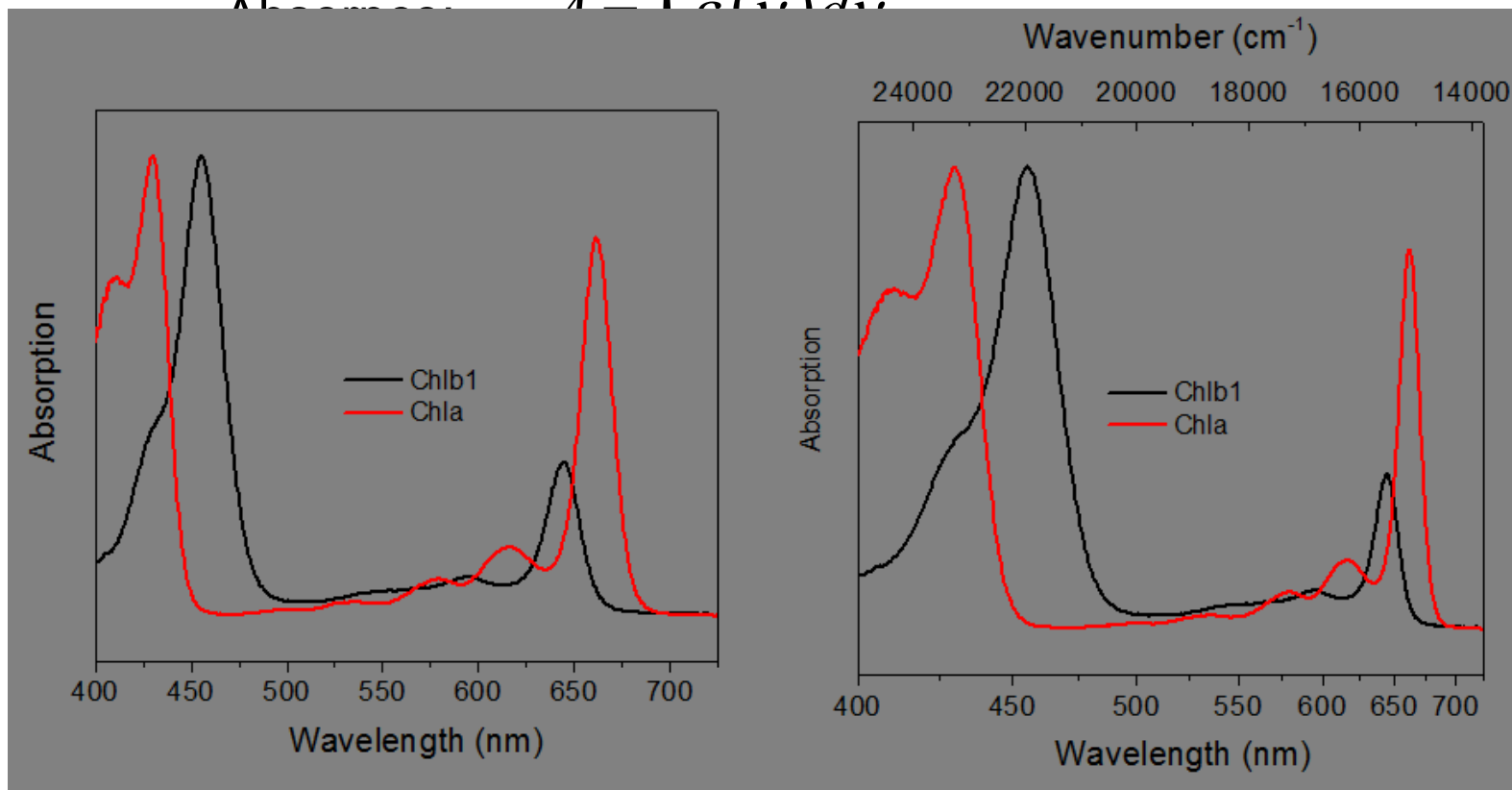


# Absorpční pásy

Lambert-Beerův zákon  $A(\lambda) = \log \frac{I_0}{I} = \log \frac{1}{T} = C\varepsilon(\lambda)l$

$I_0$  – intenzita před vzorkem,  $I$  – intenzita za vzorkem,  
 $l$  – optická dráha ve vzorku,  $C$  – koncentrace,  $\varepsilon$  – extinkční koeficient

$$A = \int \varepsilon(\nu) d\nu$$



# Absorpce, síla oscilátoru a dipólový moment přechodu

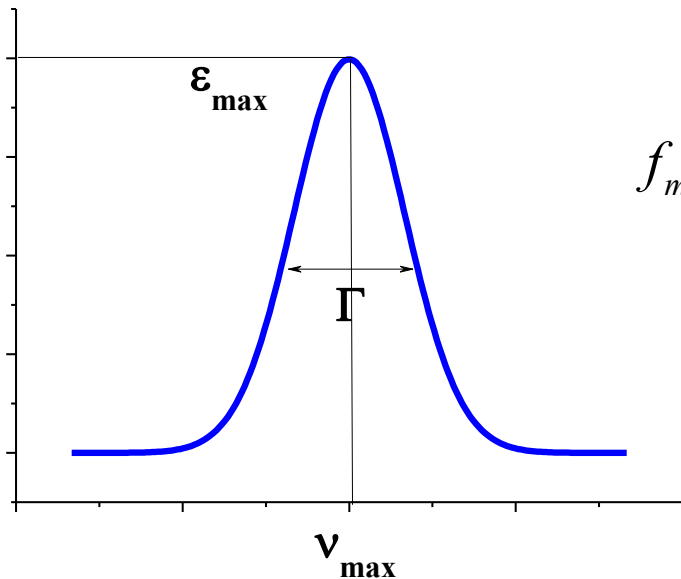
Síla oscilátoru přechodu m-n: 
$$f_{mn} = \frac{4\varepsilon_0 m_e c^2 \ln 10}{N_A e^2} \cdot A = 4.319 \times 10^{-9} \text{ M.cm}^2 A$$

Pro Gaussovský absorpční pás pološířky  $\Gamma$  s extinkčním koeficientem v maximu  $\varepsilon_{\max}$  platí

$$f_{mn} = 4.319 \times 10^{-9} \frac{\pi \varepsilon_{\max} \Gamma}{2} = 6.784 \times 10^{-9} \varepsilon_{\max} \Gamma$$

Souvislost síly oscilátoru s dipólovým momentem přechodu:

$$f_{mn} = 4.702 \times 10^{-7} \nu_{mn} |\mu_{mn}|^2$$



**Užitečný vztah**  
(výpočet dipólového momentu  
z absorpčního spektra)

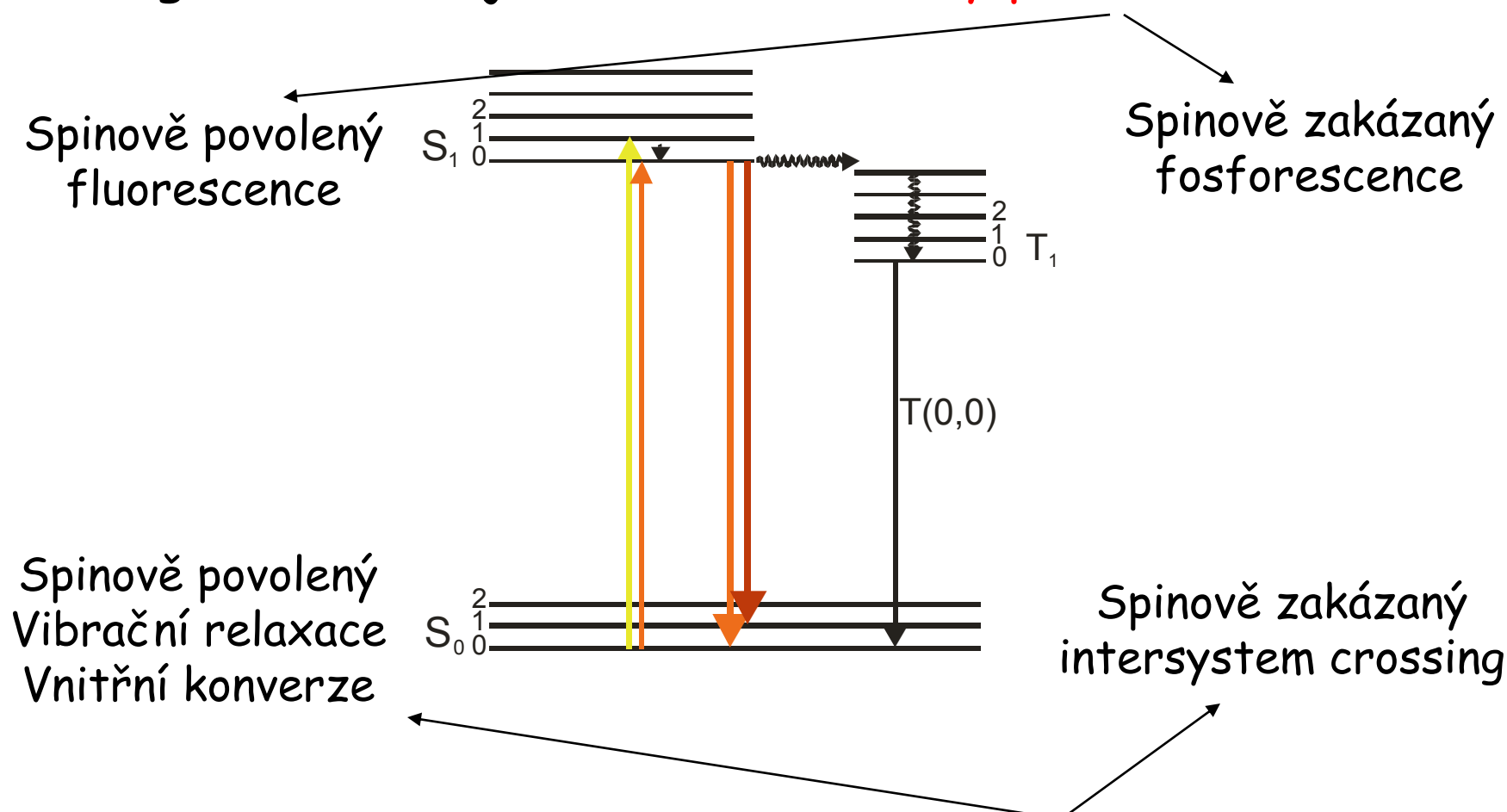
$$\mu[D] = 0.12 \sqrt{\frac{\varepsilon_{\max} \Gamma}{\nu_{\max}}}$$

Jednotky:  $\mu$  – Debye,  $\varepsilon_{\max}$  –  $\text{M}^{-1}.\text{cm}^{-1}$ ,  $\Gamma, \nu_{\max}$  –  $\text{cm}^{-1}$

# Typy přechodů

Zářivé vs. nezářivé

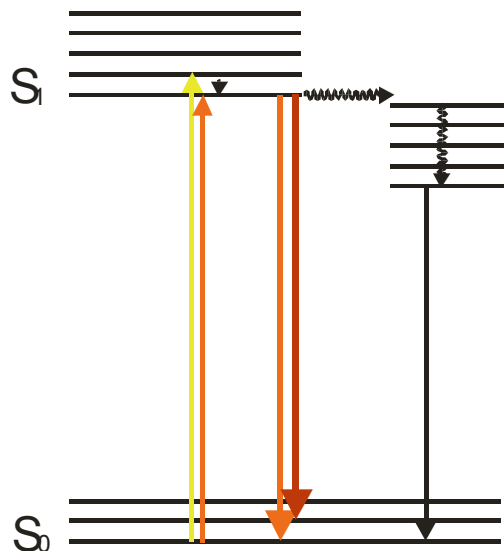
Energie uvolněná jako foton  $\Rightarrow$  **zářivý přechod**



Energie disipována do prostředí  $\Rightarrow$  **nezářivé přechody**

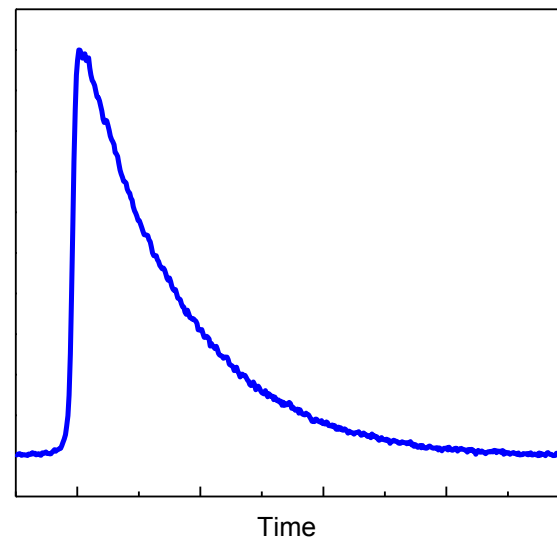


# Doby života excitovaných stavů



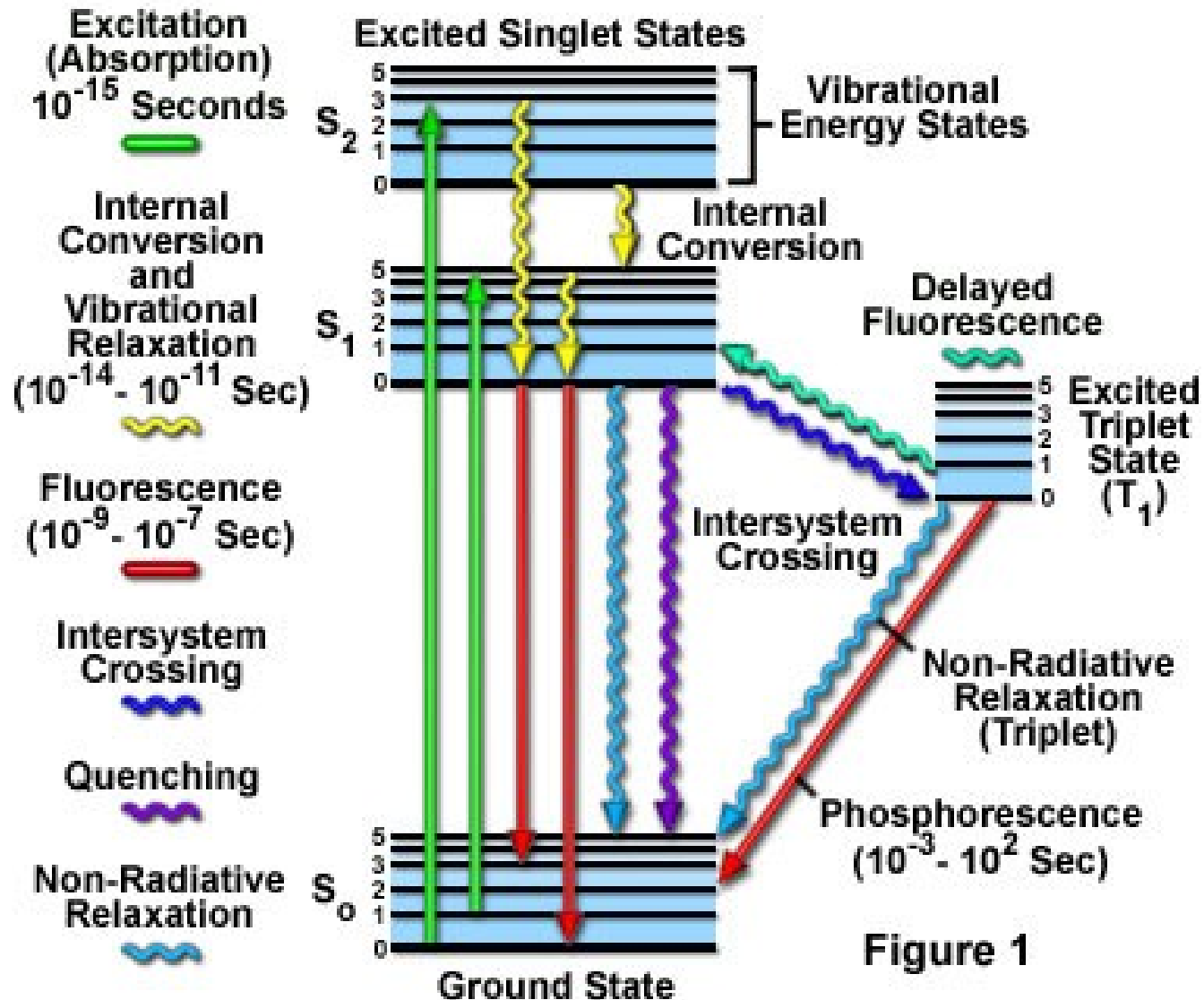
$$-\frac{d}{dt}[A^*] = k_r[A^*]$$

$$[A^*] = [A^*]_{t=0} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

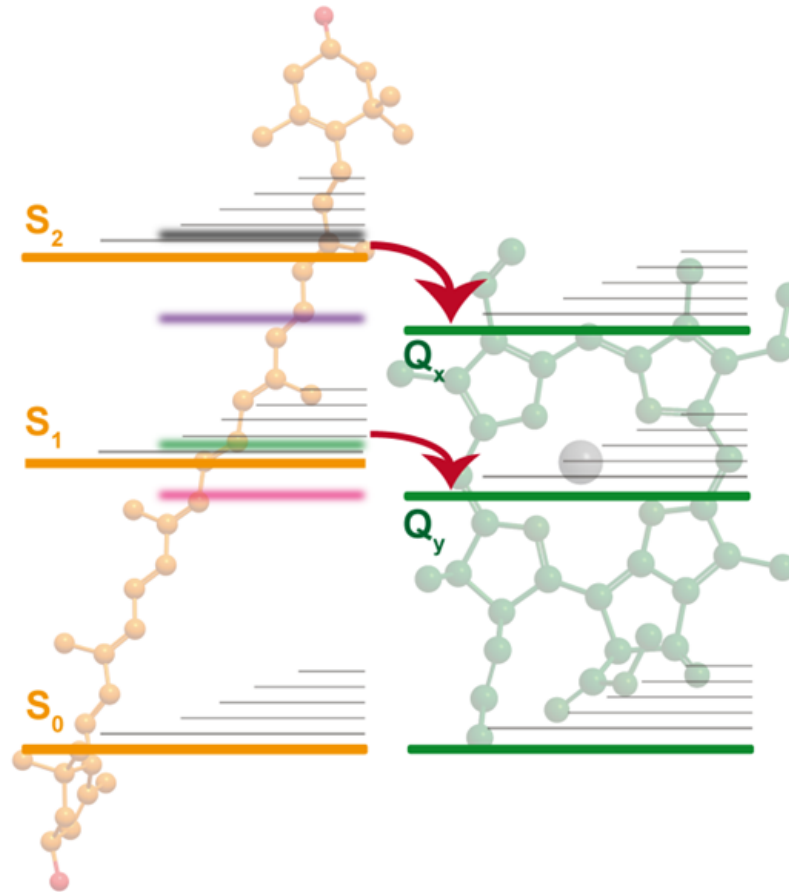


Transition	Process	Rate Constant	Timescale (Seconds)
$S(0) \Rightarrow S(1) \text{ or } S(n)$	Absorption (Excitation)	Instantaneous	$10^{-15}$
$S(n) \Rightarrow S(1)$	Internal Conversion	$k(\text{ic})$	$10^{-14}$ to $10^{-10}$
$S(1) \Rightarrow S(1)$	Vibrational Relaxation	$k(\text{vr})$	$10^{-12}$ to $10^{-10}$
$S(1) \Rightarrow S(0)$	Fluorescence	$k(\text{f})$ or $\Gamma$	$10^{-9}$ to $10^{-7}$
$S(1) \Rightarrow T(1)$	Intersystem Crossing	$k(\text{pT})$	$10^{-10}$ to $10^{-8}$
$S(1) \Rightarrow S(0)$	Non-Radiative Relaxation Quenching	$k(\text{nr}), k(\text{q})$	$10^{-7}$ to $10^{-5}$
$T(1) \Rightarrow S(0)$	Phosphorescence	$k(\text{p})$	$10^{-3}$ to 100
$T(1) \Rightarrow S(0)$	Non-Radiative Relaxation Quenching	$k(\text{nr}), k(\text{qT})$	$10^{-3}$ to 100

## Jablonski Energy Diagram



# Přenos energie



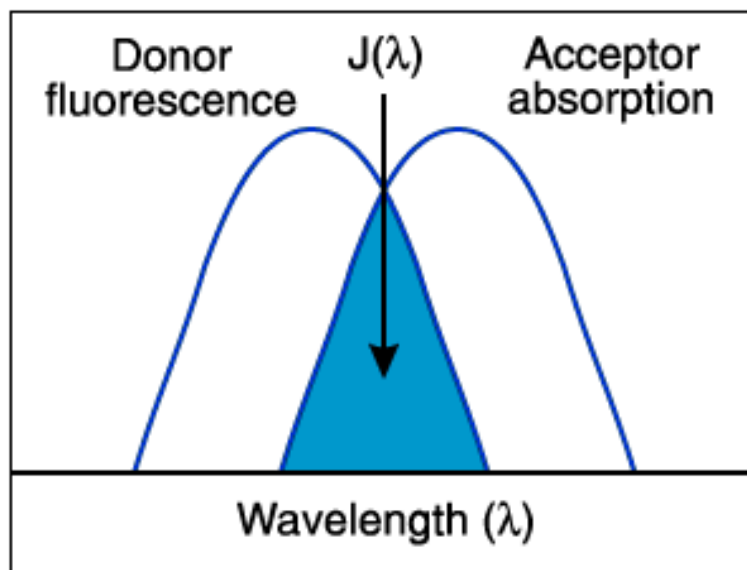
**Excitovaný stav určitého pigmentu (donor) předá energii jinému pigmentu (akceptor)**

**Car-Chl, Chl-Chl, Chl-Car, Phyco-Chl**

**Energie excitovaného stavu akceptoru musí být menší (nebo maximálně stejná) než energie donoru**

# Překryvový integrál

**Emisní spektrum donoru se musí překrývat s absorpčním spektrem akceptoru (zákon zachování energie)**



$$J(\nu) = \frac{\int F_D(\nu) \varepsilon_A(\nu) d\nu}{\int F_D(\nu) \nu^4 d\nu} \qquad J(\lambda) = \frac{\int F_D(\lambda) \varepsilon_A(\lambda) \lambda^4 d\nu}{\int F_D(\lambda) d\nu}$$

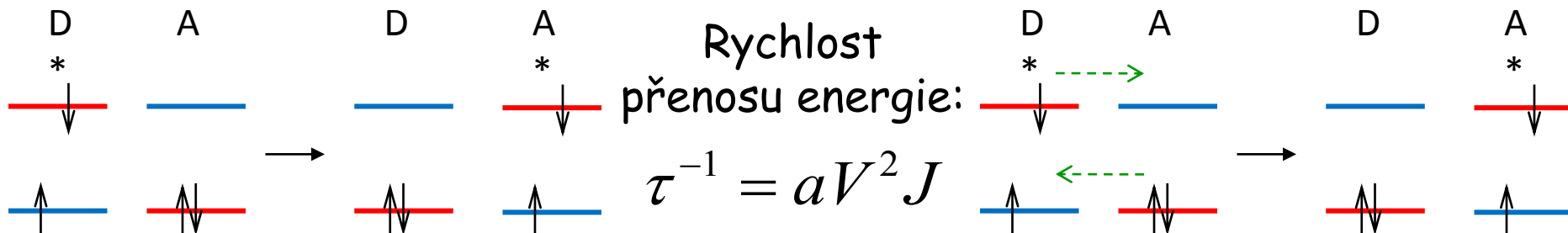
**Förster**

Dipólová (Coulombická) interakce

# *Mechanismy přenosu energie*

**Dexter**

Výměna elektronů



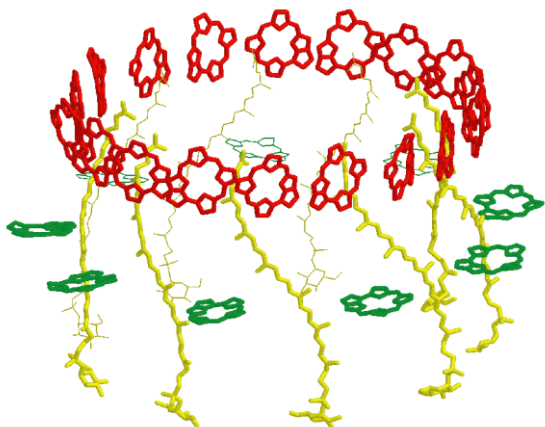
$$V_F = c \frac{\mu_D \mu_A \chi}{R^3}$$

Střední vzdálenosti (10-100 Å)  
Střední velikosti dipólů  
Beze změny spinu

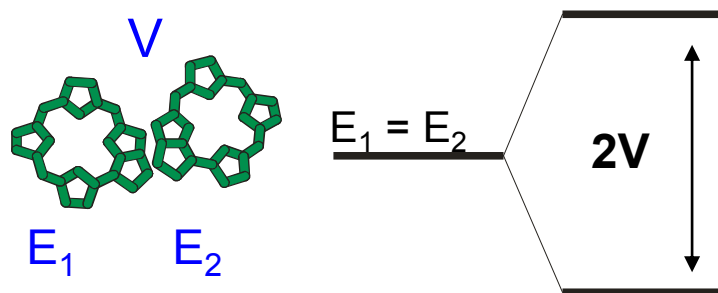
V - interakční člen  
J - překryvový integrál  
R - vzdálenost donor-akceptor  
 $\chi$  - orientační faktor  
L - souvisí s překryvem orbitalů

$$V_D \approx e^{-R/2L}$$

Malé vzdálenosti (<10 Å)  
Malé dipóly  
Změna spinu



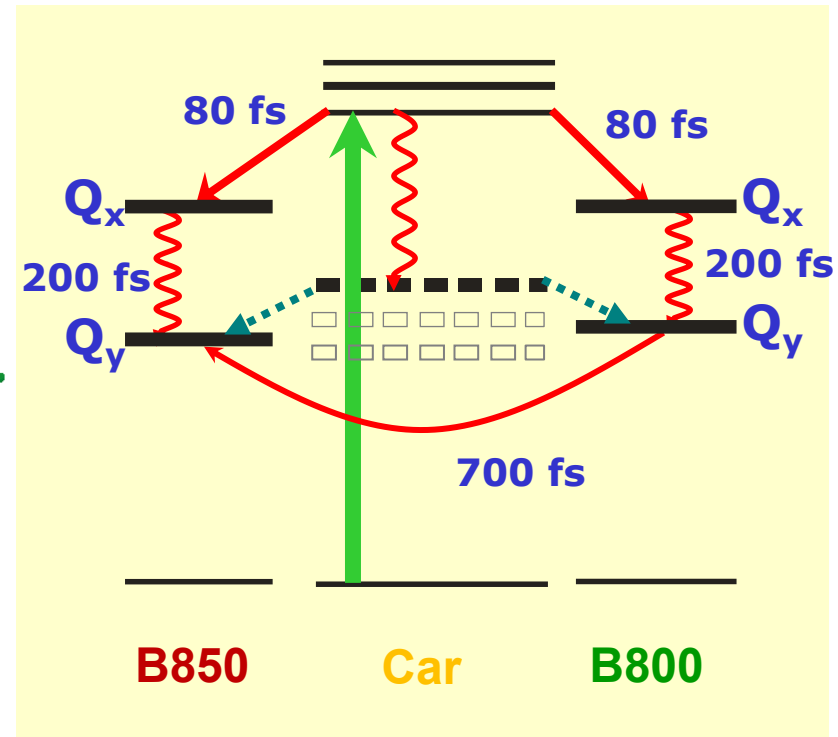
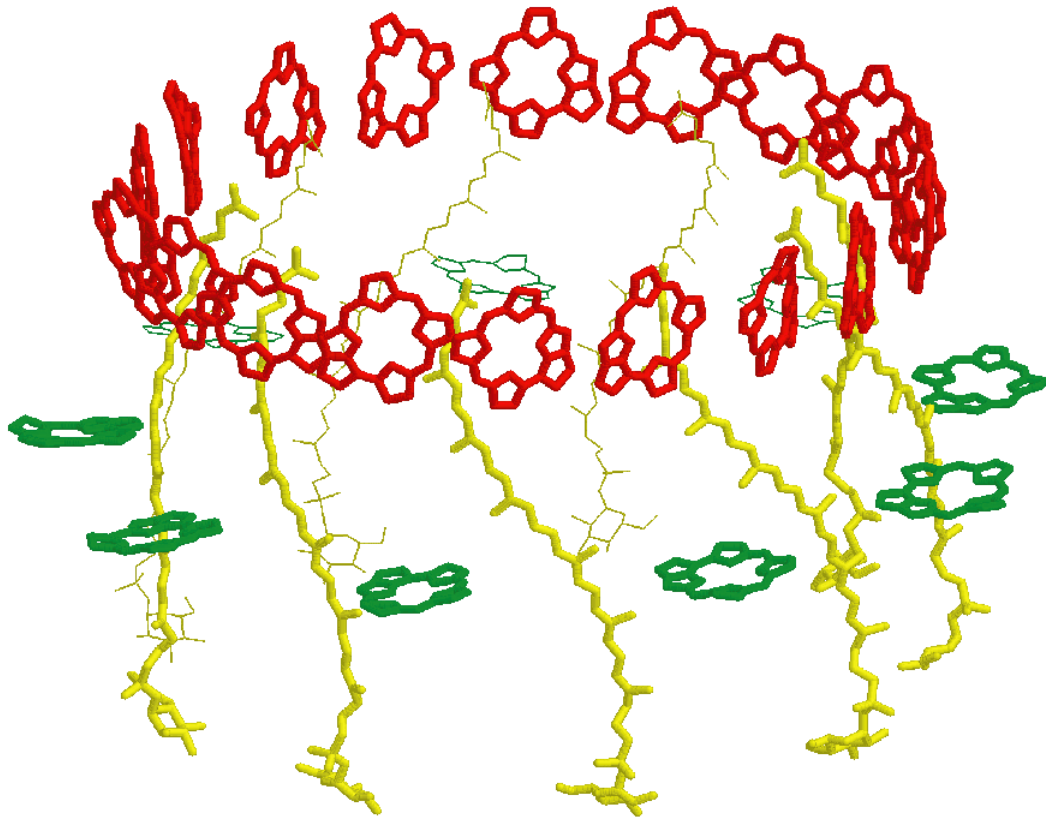
**Excitonová interakce:**



Malé vzdálenosti, Velké dipóly

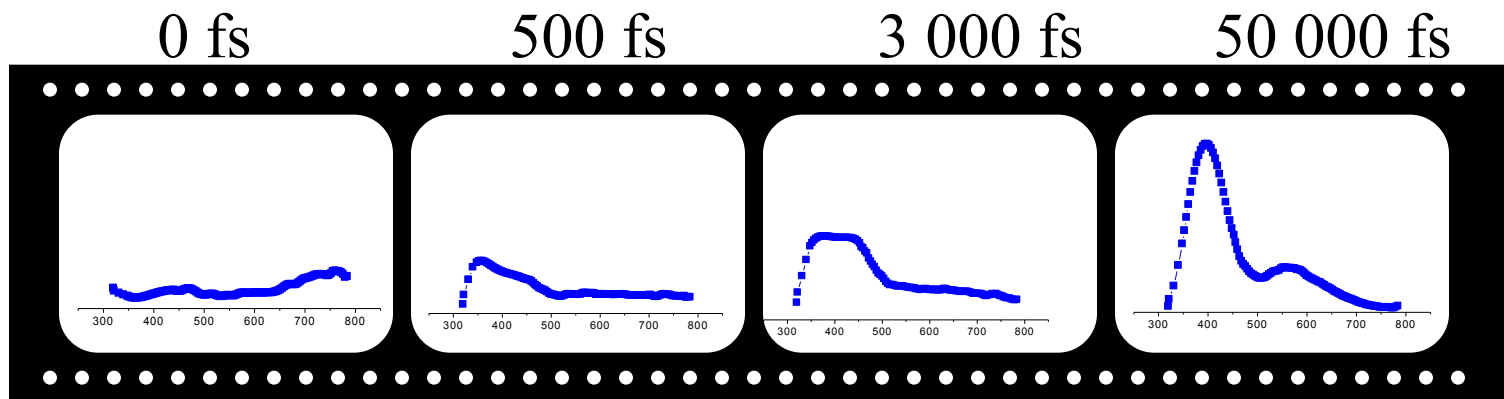
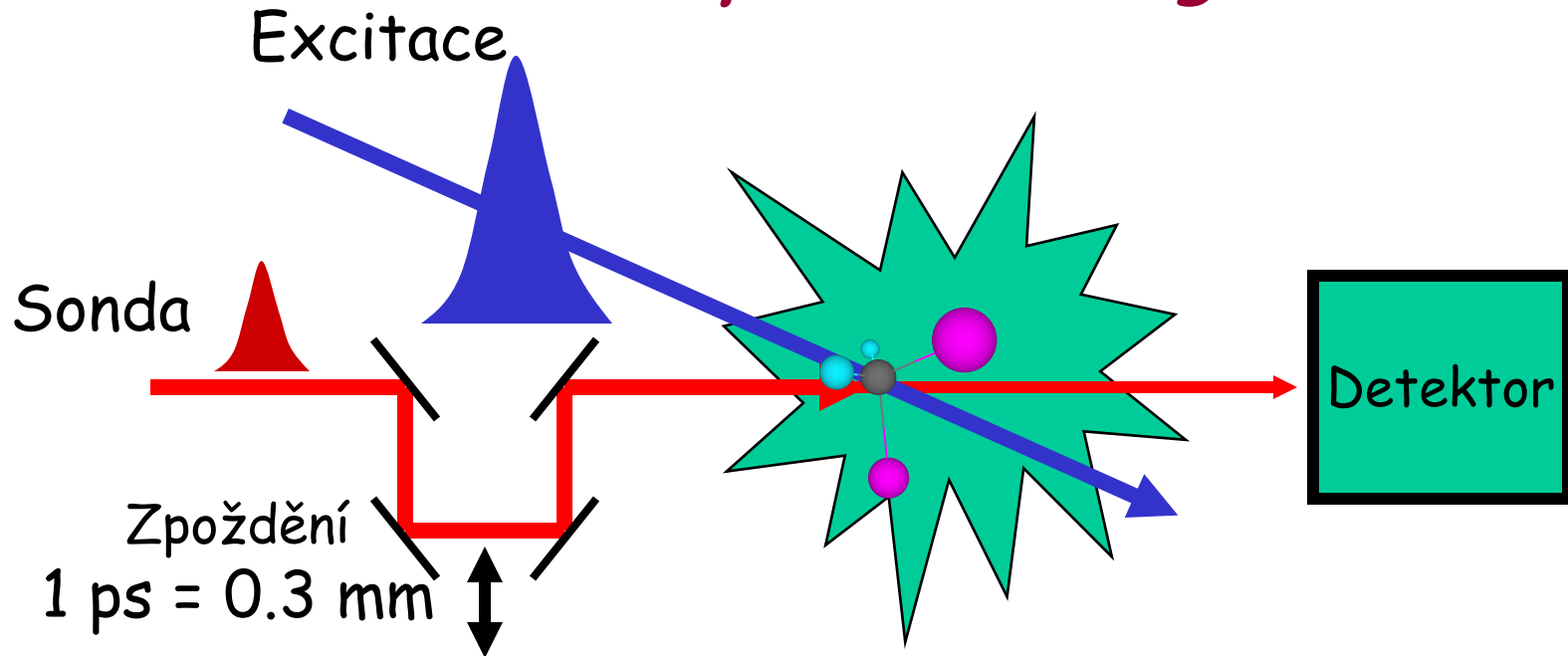
Už nelze mluvit o donoru a akceptoru, díky excitonové interakci se chovají jako jedna molekula

# Příklady mechanismů (anténa purpurových bakterií)

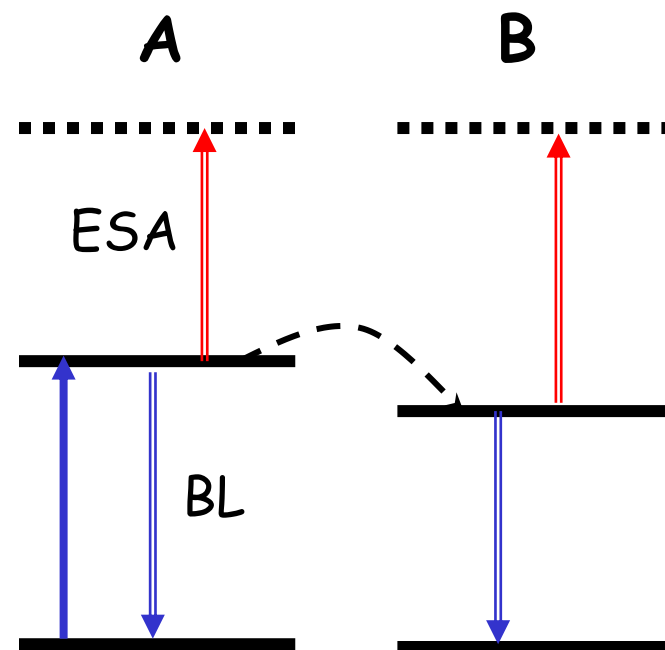
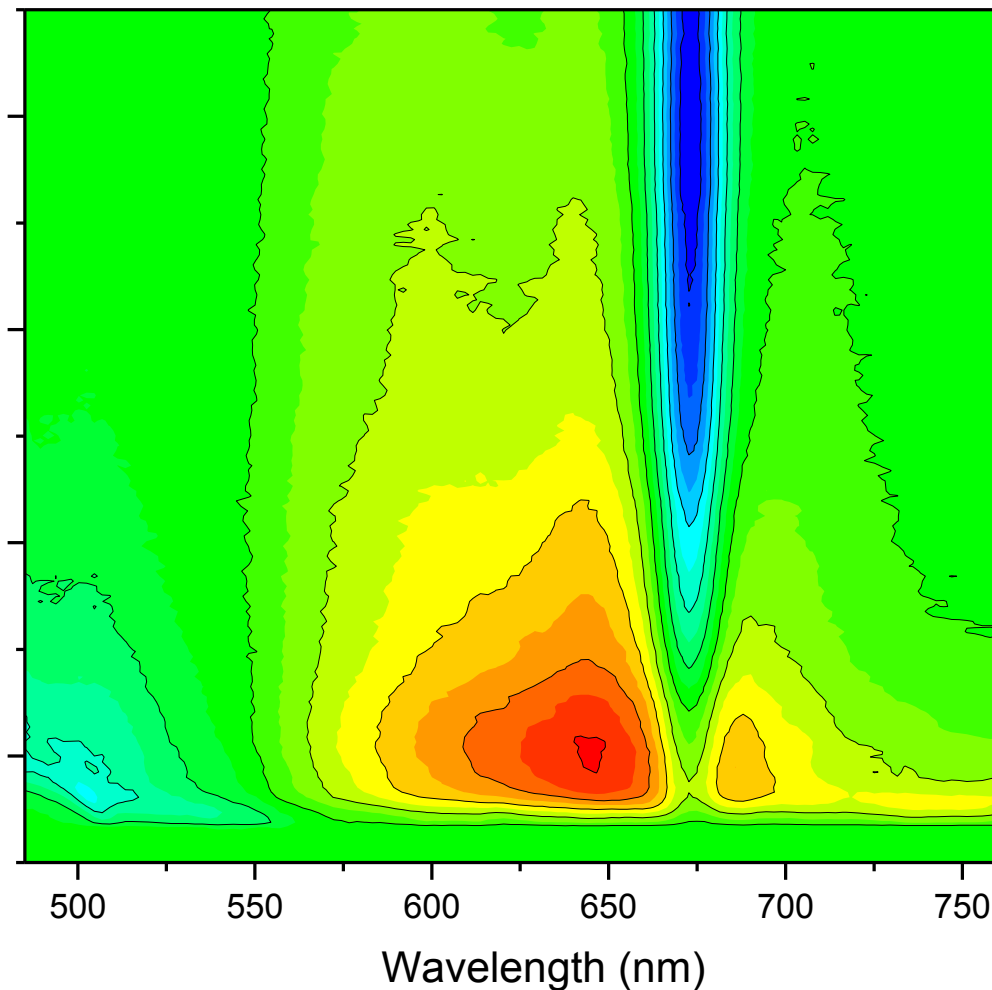


- B800-B850: **Forsterův přenos**, vzdálenost  $\sim 20\text{\AA}$ , relativně silné dipóly, singlet-singlet
- B850-B850: **excitonová interakce**, vzdálenost 5-6  $\text{\AA}$ , silné dipóly
- Car-B850: **modifikovaný Forster** (problém se zakázanými stavy, akceptor jako exciton)
- Pokud se BCcl B850 dostane do tripletního stavu, dochází ke zhášení tripletů triplet-tripletní přenosem mezi B850 a karotenoidem: **Dexterův přenos**, zanedbatelný dipól, malá vzdálenost, spinově zakázaný

# Měření přenosu energie



# Měření přenosu energie



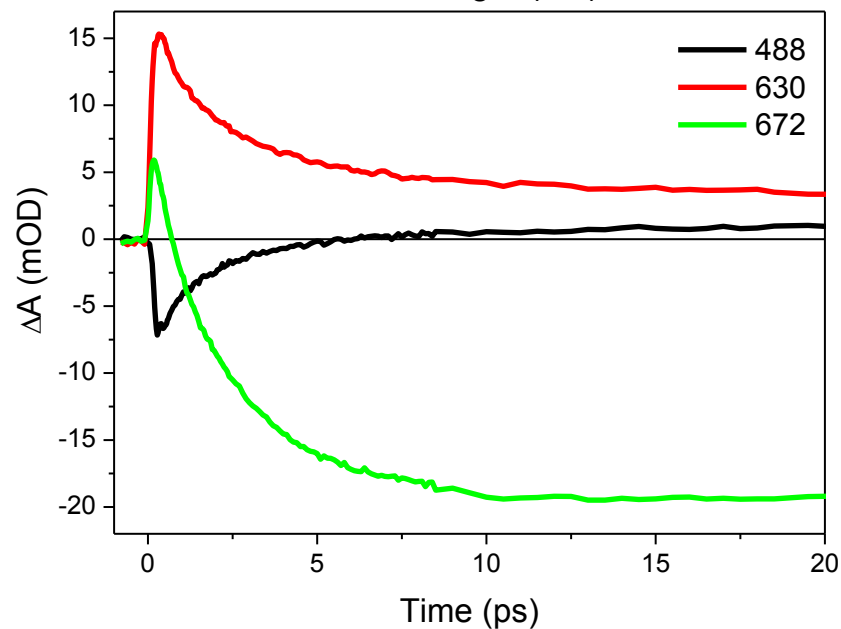
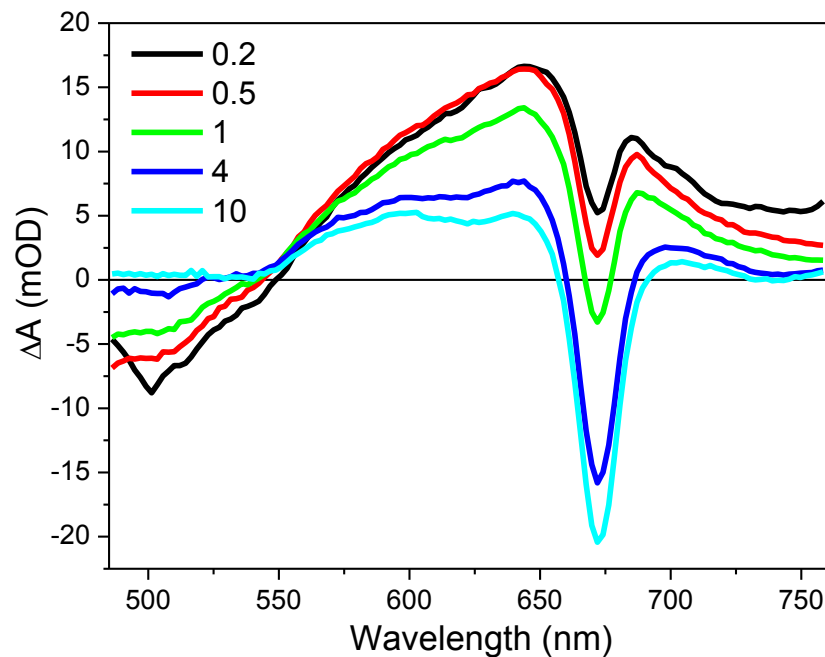
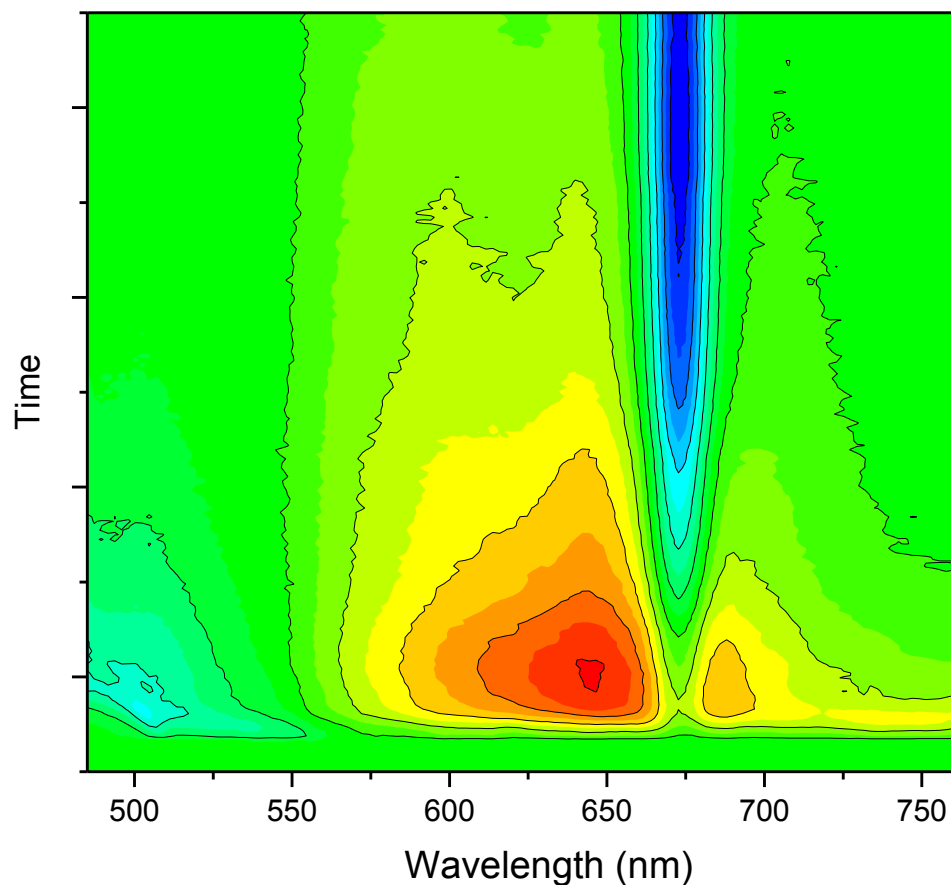
ESA - excited state absorption  
BL - bleaching

Obecně možné využít k sledování jakéhokoliv procesu za předpokladu, že výchozí molekula/produkt mají rozumně definované spektrum

Časová škála: 50 fs až 1 ns

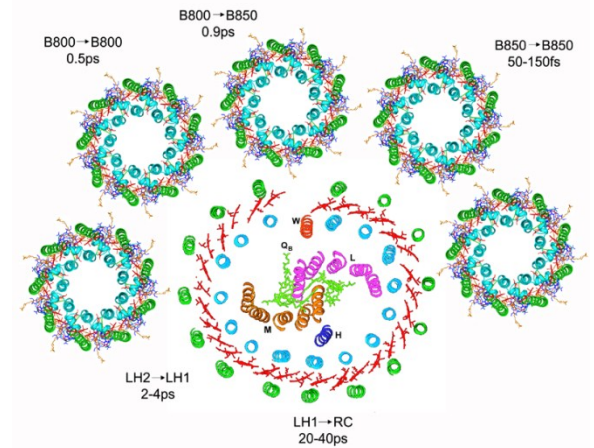
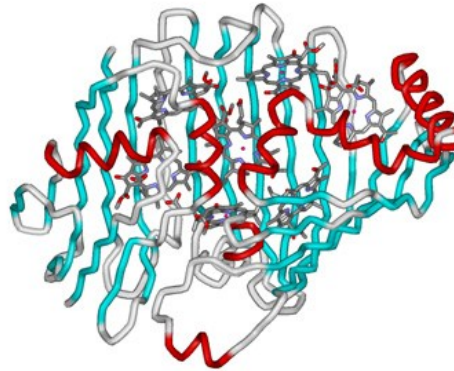
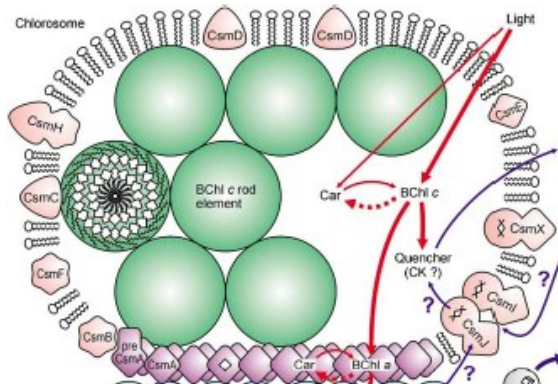
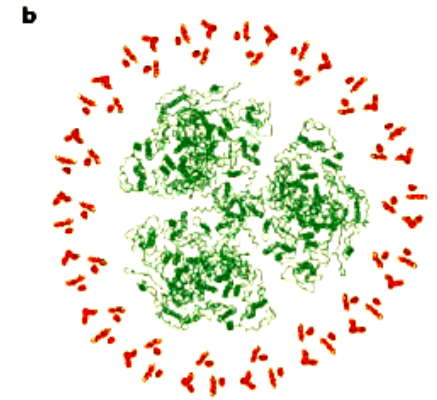
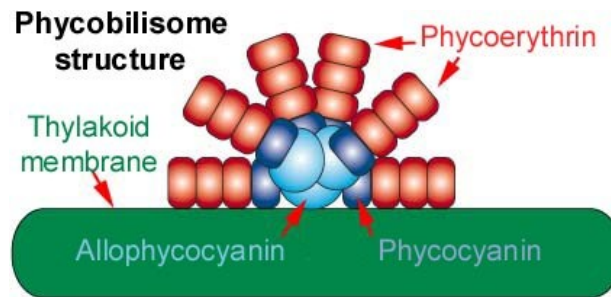
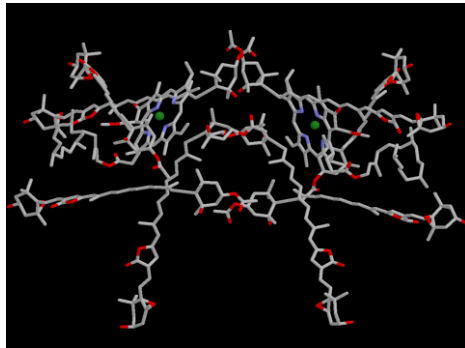
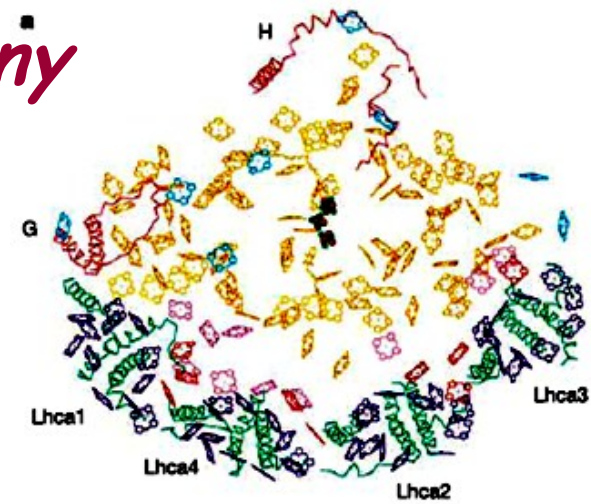
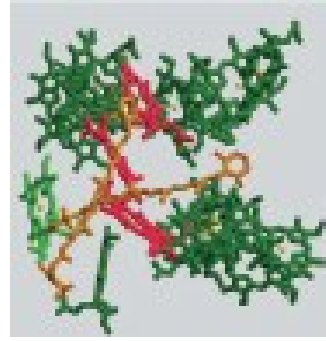


# Měření přenosu energie

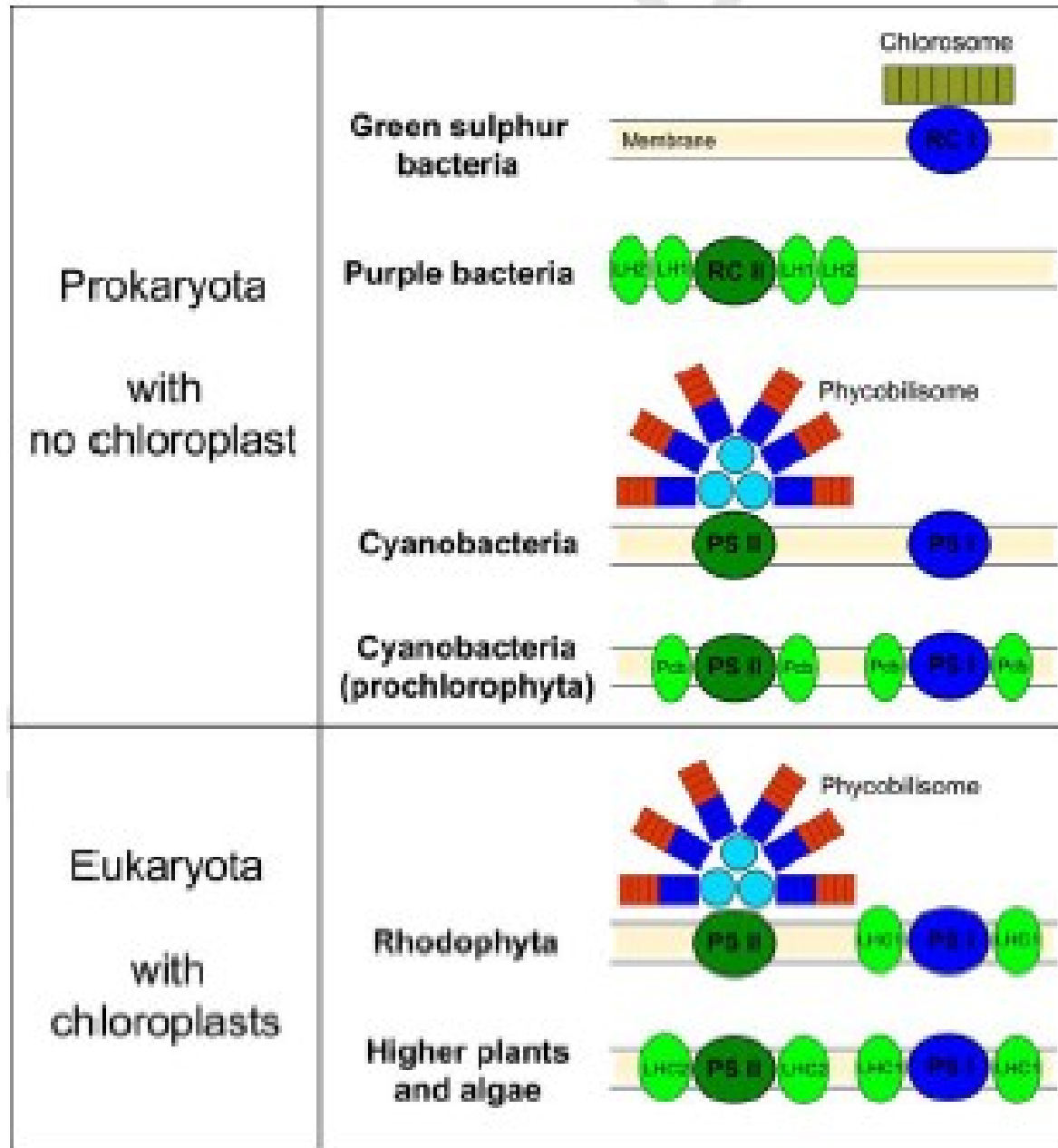


## Global fitting

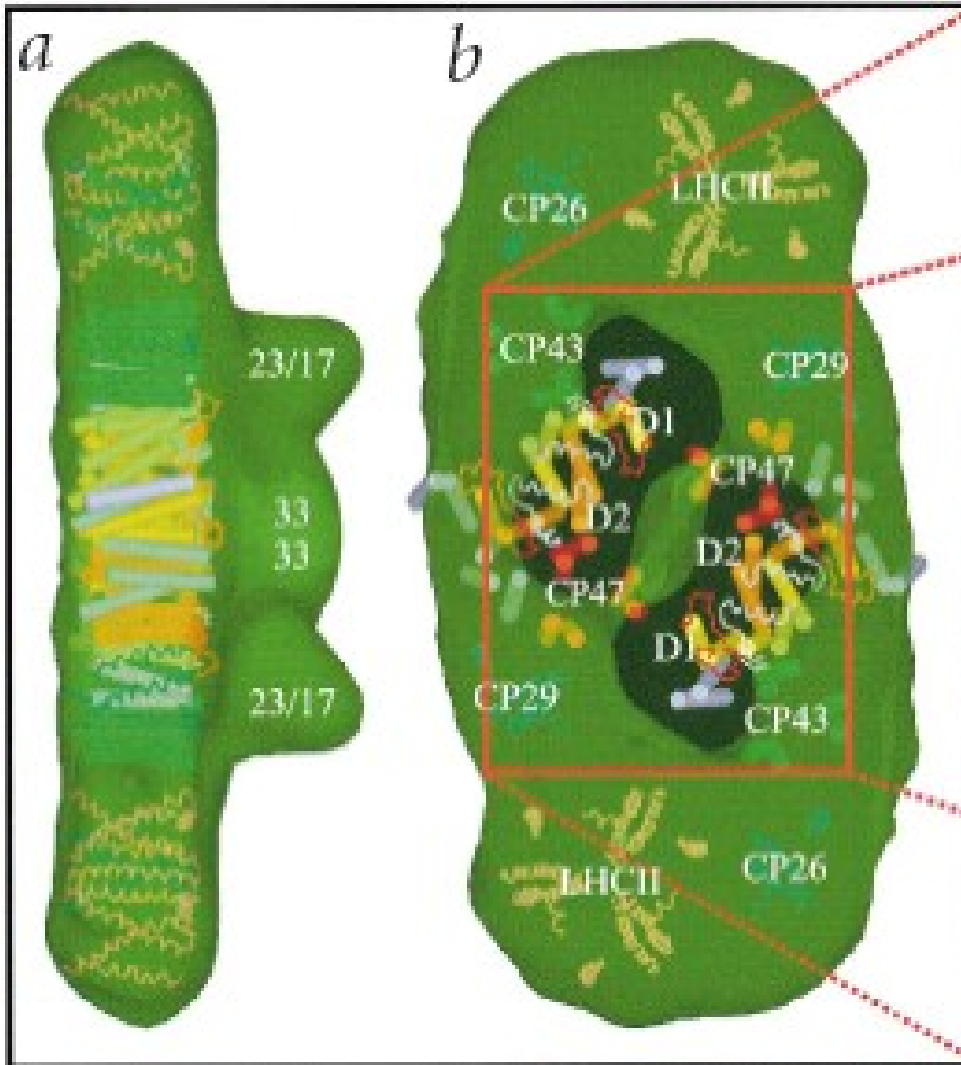
Simultánní fitování kinetik na všech měřených vlnových délkách



# *Taxonomie antén*



# Anténní systém fotosystému II



*Nield et al. Nature 2000*

## Anténní pigmenty/RC:

99 Chlorofylů

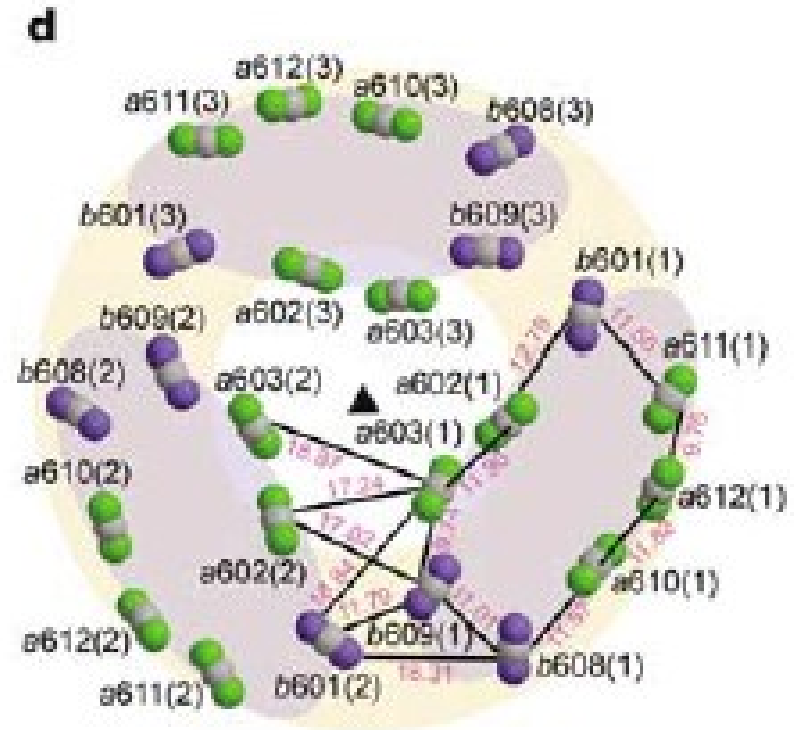
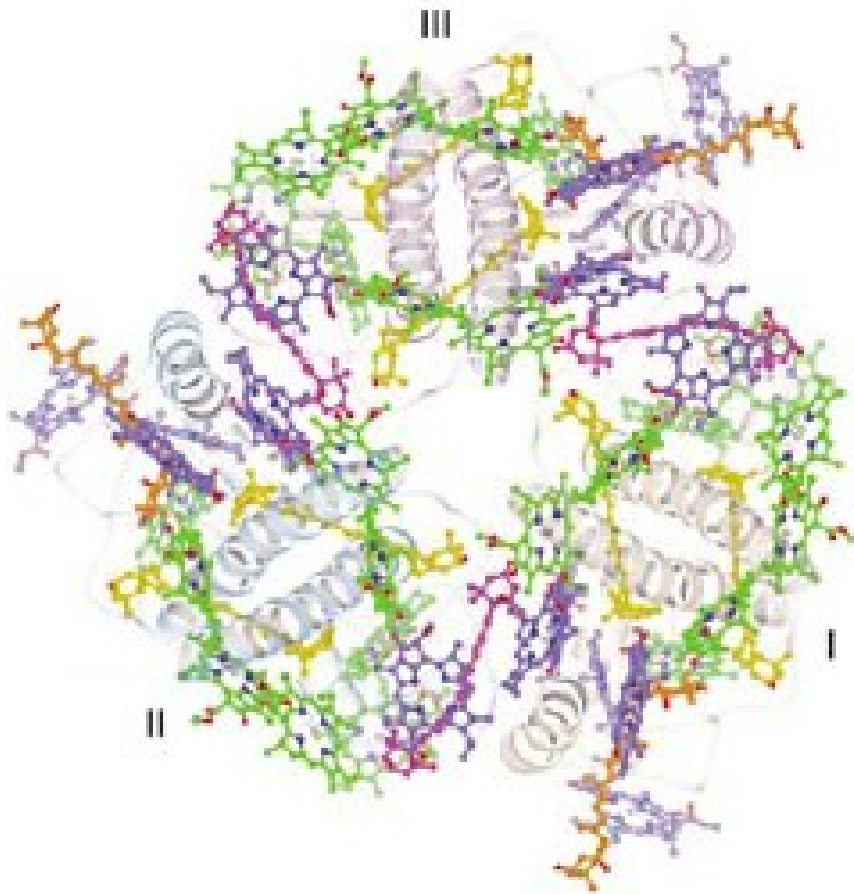
71 Chl-a + 28 Chl-b

25 Karotenoidů

LHCII	24a + 18b
CP29	6a + 2b
CP26	6a + 3b
CP24	5a + 5b
CP43	14a
CP47	16a

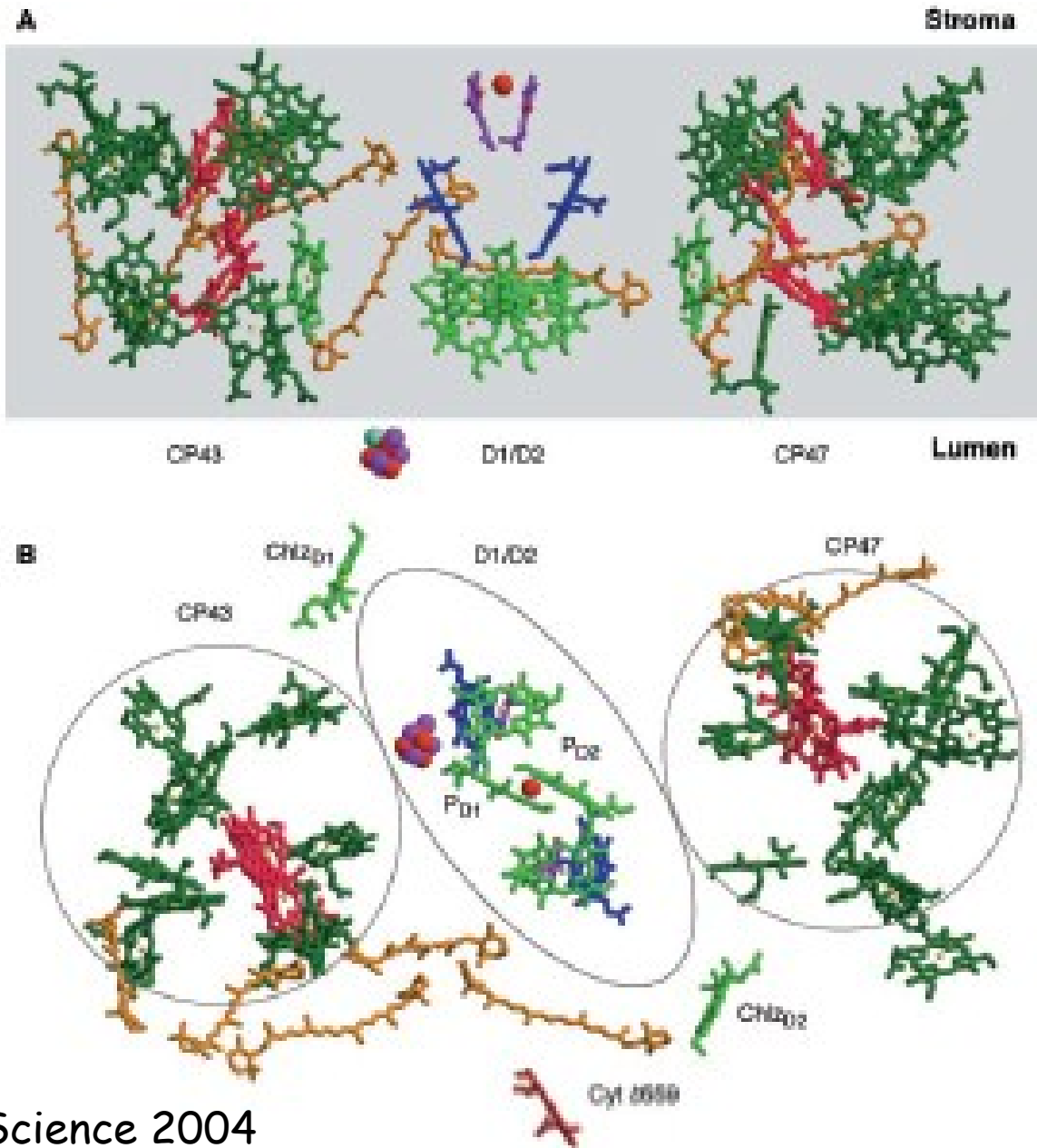
*Liu et al. Nature 2004 (LHCII, CP43+47)*  
*Roberto Bassi's group (CP29, 26, 24)*

## LHCII Trimer

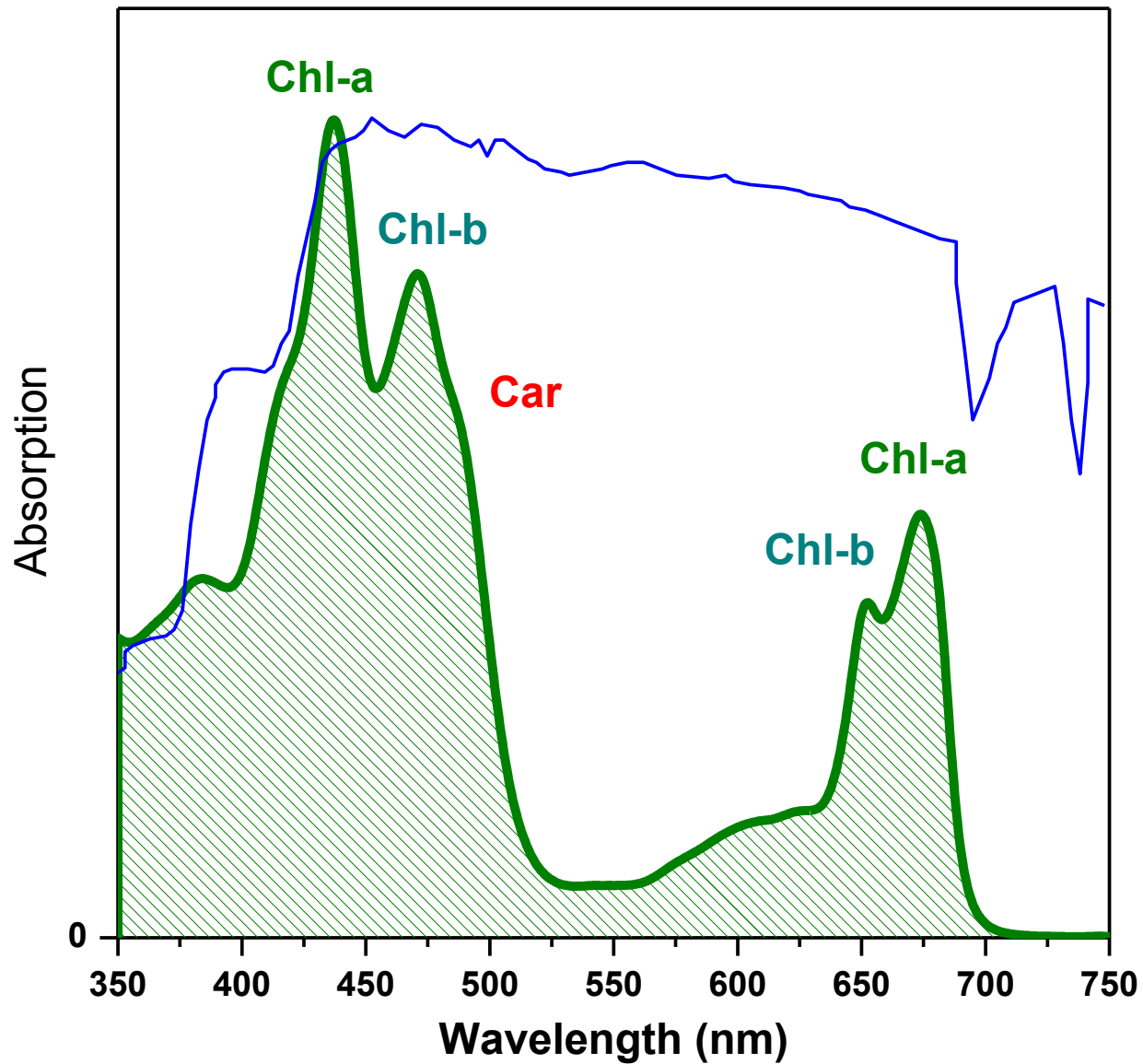


Liu et al. Nature 2004

# *PSII vnitřní anténa (CP43 a CP47)*

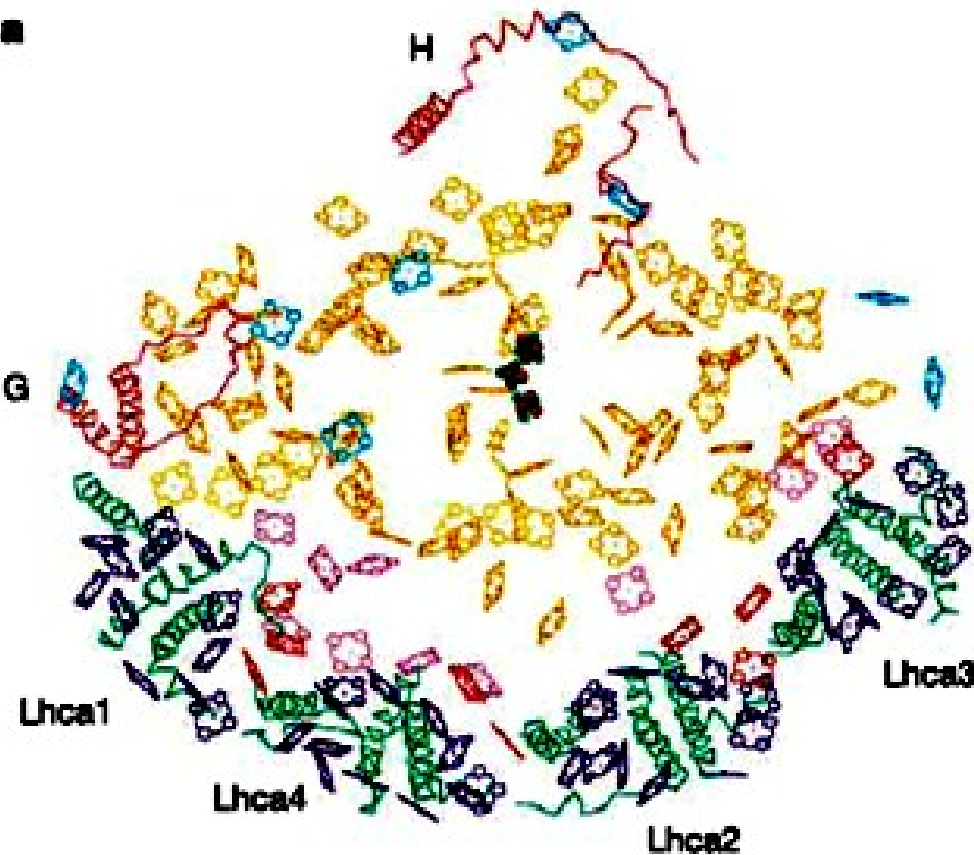


# *Absorpční spektrum LHCII*





# Fotosystém I,



Antenní pigmenty/RC:

136 Chlorofylů (96 Core)  
126 Chl-a + 10 Chl-b

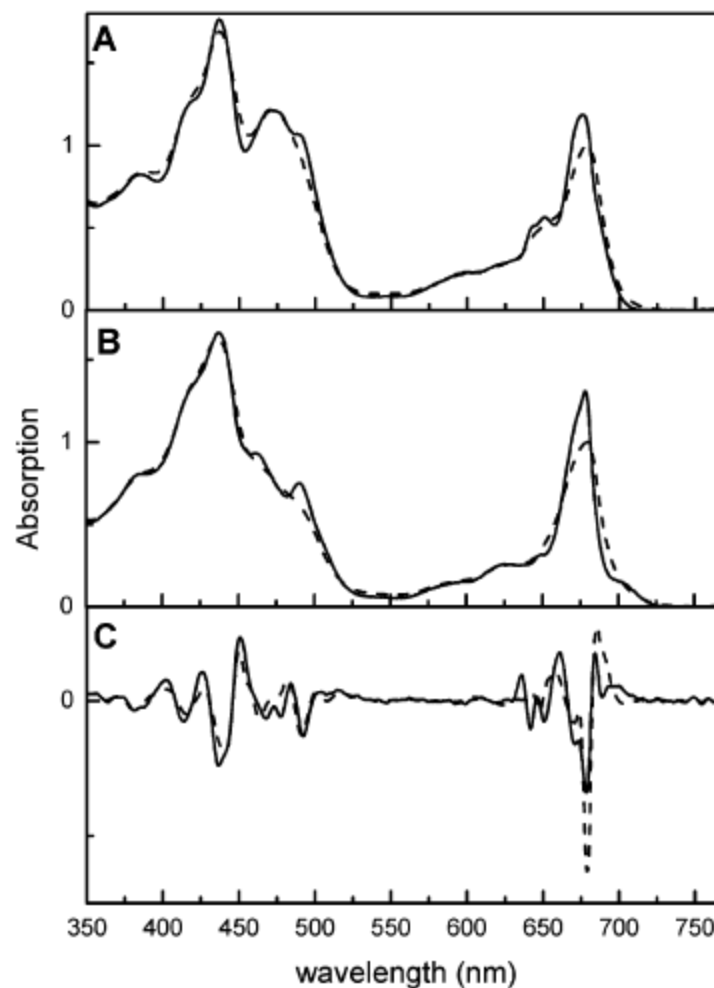
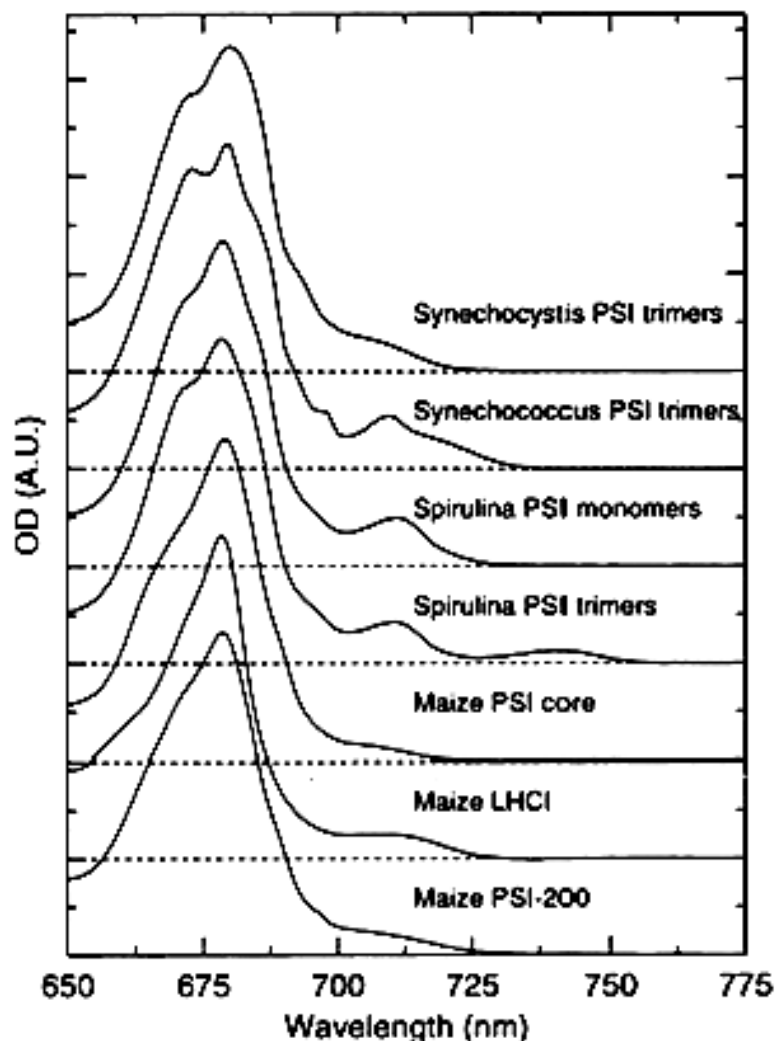
34 Karotenoidů (22 Core)

Lhca1	8a + 2b
Lhca2	6.5a + 3.5b
Lhca3	8.5a + 1.5b
Lhca4	7a + 3b

Lhca proteiny tvoří vnější anténu – pouze u eukaryot



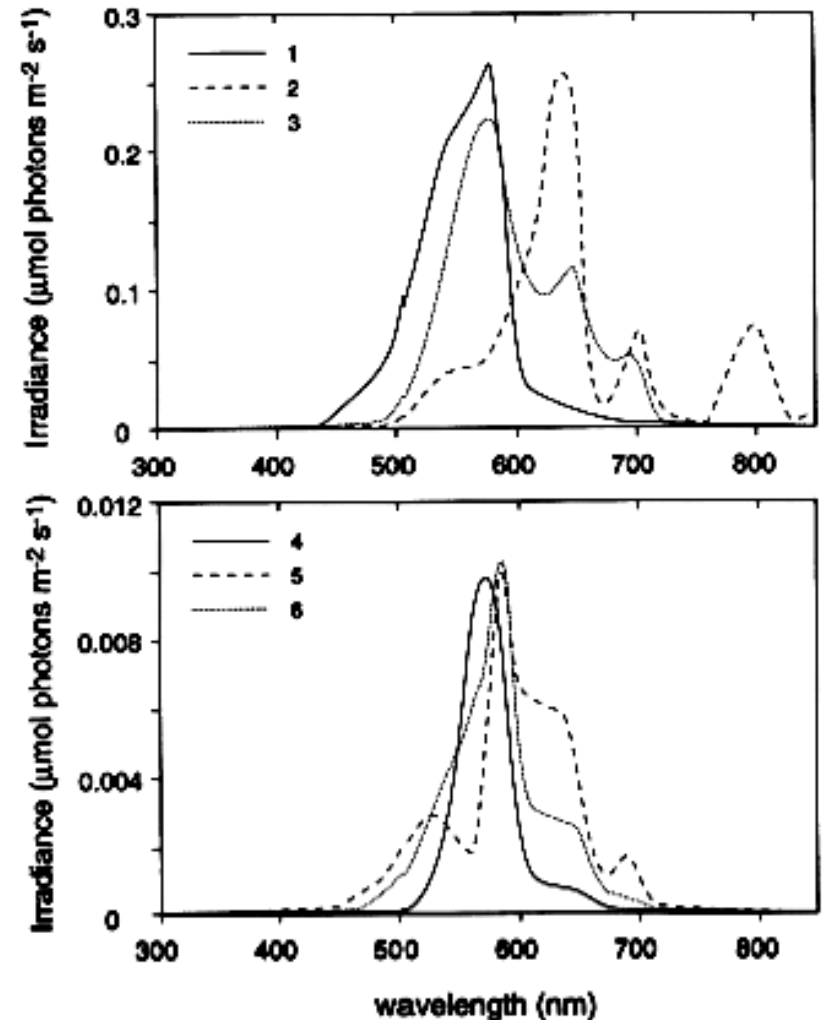
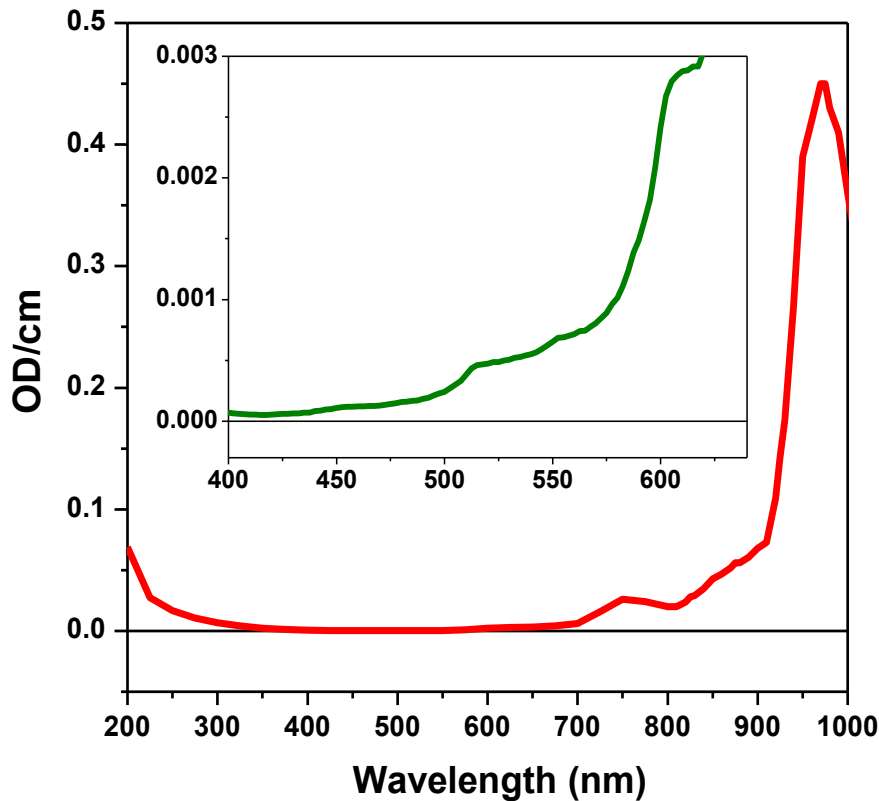
# Absorpční spektrum PS I



„Červené“ chlorofyly – k čemu jsou dobré?

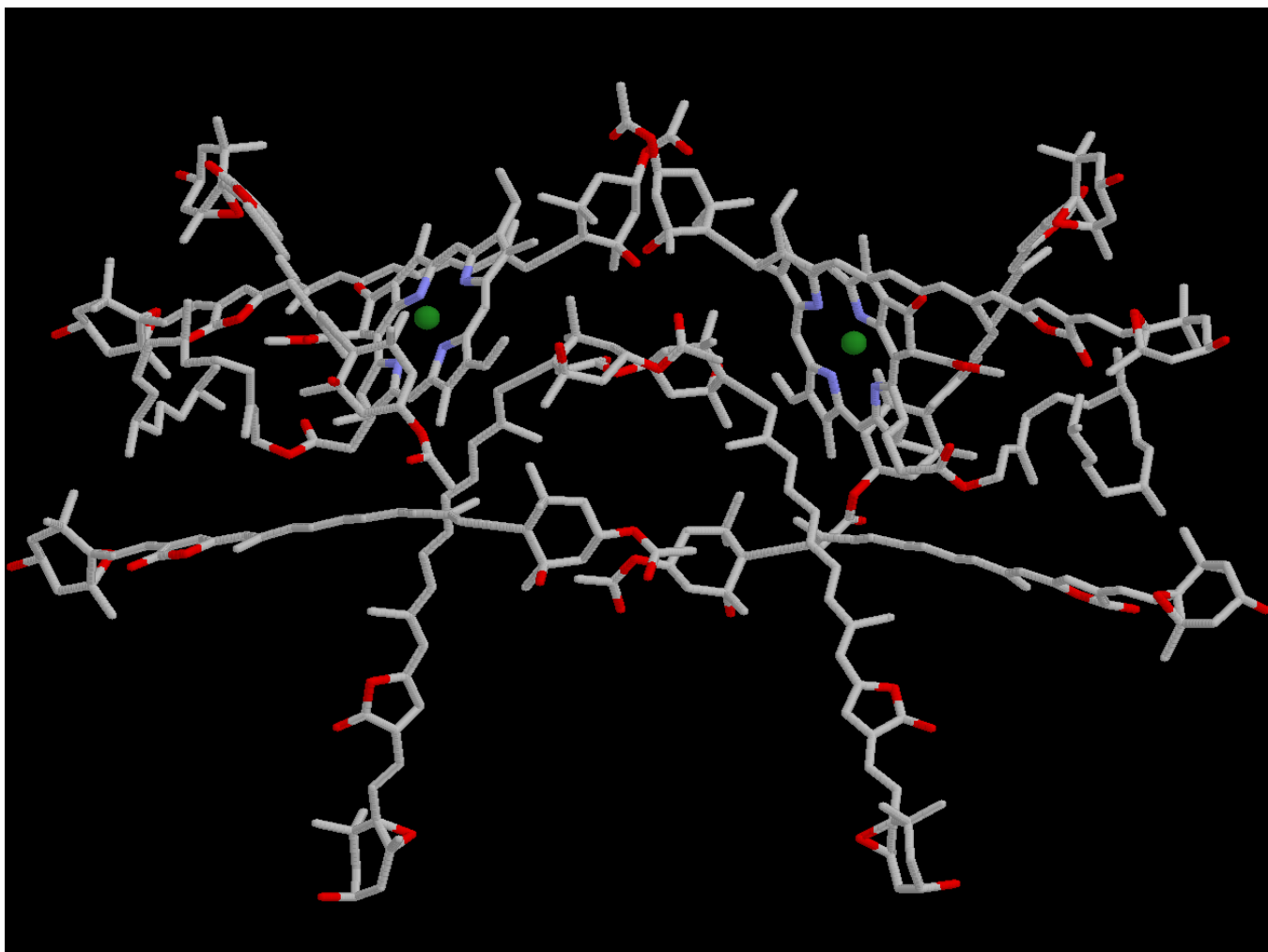
# Fotosyntéza ve vodě

- Filtrování vodním sloupcem
- Rozptyl světla ( $\sim 1/\lambda^4$ )
- "Organické" filtry



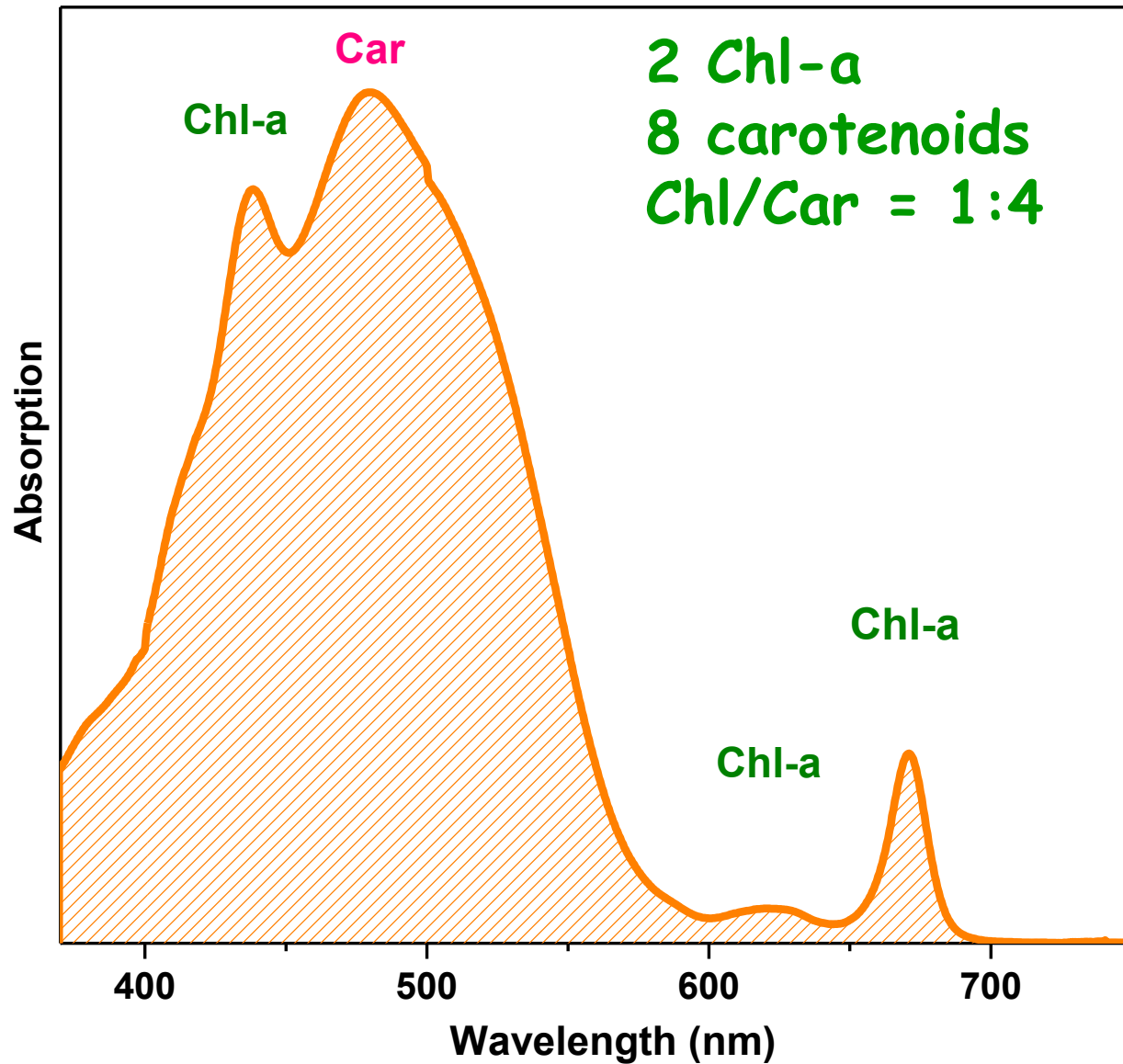
Fotosyntéza ve vodě by měla být optimalizována na sběr „zelenožlutých“ fotonů

## *Peridinin chlorophyll-a protein (PCP)*

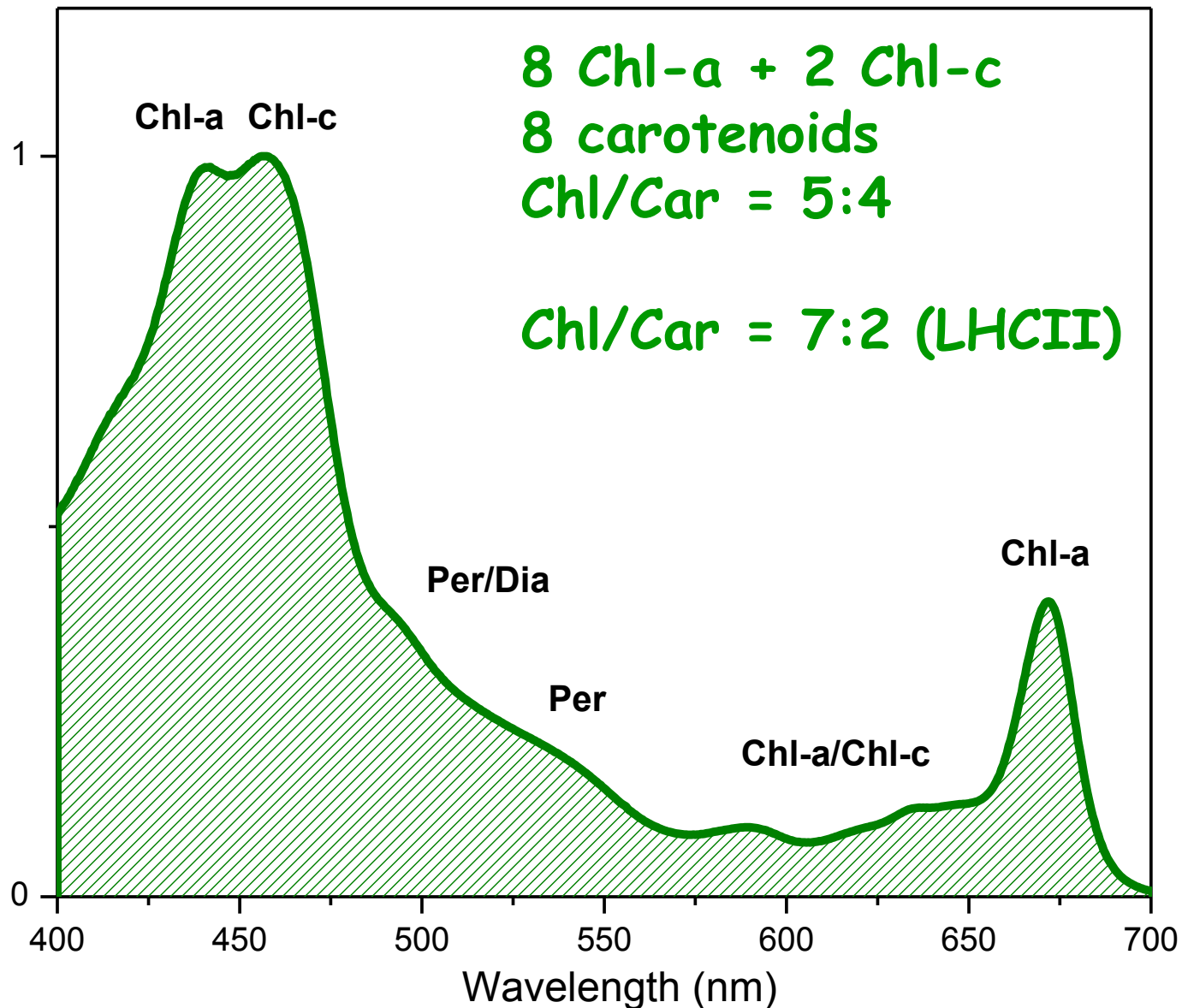


Vnější anténa připojená na stromatální straně tylakoidní membrány

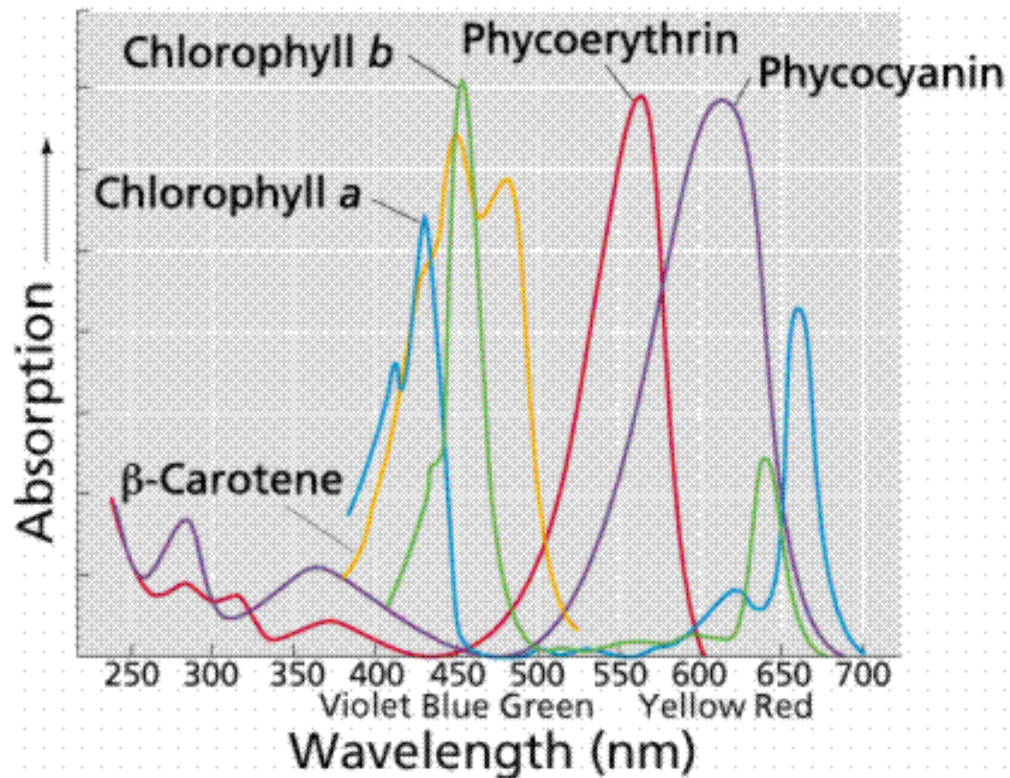
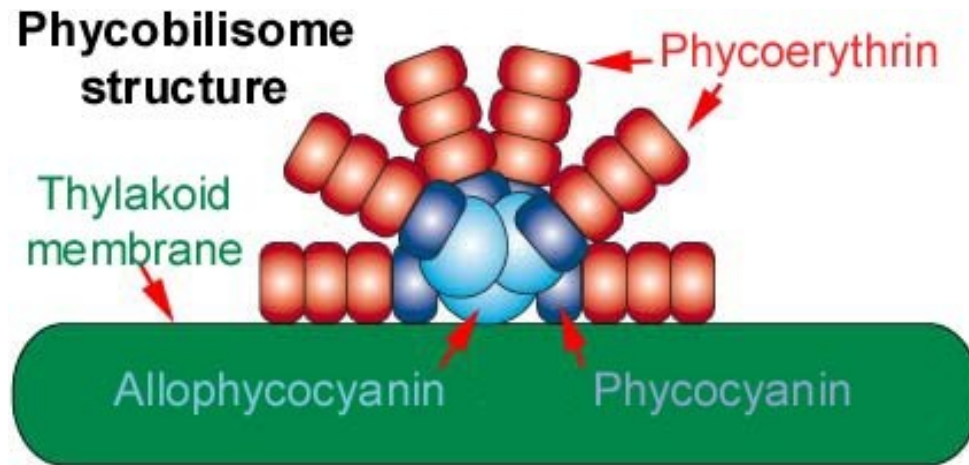
# *PCP spektrum*



## *LHC of PSII from Amphidinium*



# *Fykobilisomy sinic*



# Vodní sloupec zeslabuje intenzitu světla

Table 1. Attenuation (as a percentage of surface irradiance) of photosynthetically active radiation, conductivity, temperature, and approximate upper or lower plant zonal limits.

Depth (m)	Conductivity ( $\mu\text{mho}/\text{cm}^2$ )	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Radiation ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{sec}^{-1}$ )	Light attenuation	Zonal limits
0	55.3	29.1	1500.00 to 1700.00	100.00	
37	55.4	29.9	208.00 to 238.00	14.92	
71	54.6	29.0	19.05 to 21.59	1.27	
83	53.5	25.8	13.35 to 15.13	0.89	<i>Lobophora</i> , lower (88 m)
97	52.9	25.8	7.35 to 8.33	0.49	
100			5.25 to 5.95	0.35	
104			3.75 to 4.25	0.25	
107	52.2	24.7	2.85 to 3.23	0.19	
116			2.25 to 2.55	0.15	<i>Johnson-sea-linkia</i> , upper (113 m)
128	51.7	24.6	1.35 to 1.53	0.09	
134			1.20 to 1.36	0.08	<i>Halimeda</i> , lower (130 m)
137	51.4	23.6	0.75 to 0.85	0.05	<i>Palmelloid green</i> , <i>Johnson-sea-linkia</i> , lower (157 m)
210	48.4	20.6	0.013 to 0.015*	0.0009*	<i>Peyssonnelia</i> , lower (189 m)
268	47.2	19.0	0.007 to 0.009*	0.0005*	<i>Ostreobium</i> , lower (210 m) Crustose coralline, lower (268 m)

\*Extrapolated from the attenuation plot.

Na povrchu:  $\sim 10 \text{ photons Chl}^{-1} \text{ s}^{-1}$   
 40 m:  $\sim 1 \text{ photon Chl}^{-1} \text{ s}^{-1}$   
 110 m:  $\sim 0.1 \text{ photon Chl}^{-1} \text{ s}^{-1}$   
 210 m:  $\sim 3.5 \text{ photons Chl}^{-1} \text{ hour}^{-1}$

Jak přežívají organismy ve velkých hloubkách?

## Deepest Known Plant Life Discovered on an Uncharted Seamount

## Strategie při nízkém osvitu

**Abstract.** *The discovery of abundant autotrophic macrophytes living below 200 meters indicates their importance to primary productivity, food webs, sedimentary processes, and as reef builders in clear oceanic waters. Estimates concerning minimum light levels for macroalgal photosynthesis and macrophytic contributions to the biology and geology of tropical insular and continental borderlands must now be revised.*

**Fotosyntéza za tmy  
268 m pod hladinou moře**

Littler et al. Nature 1985

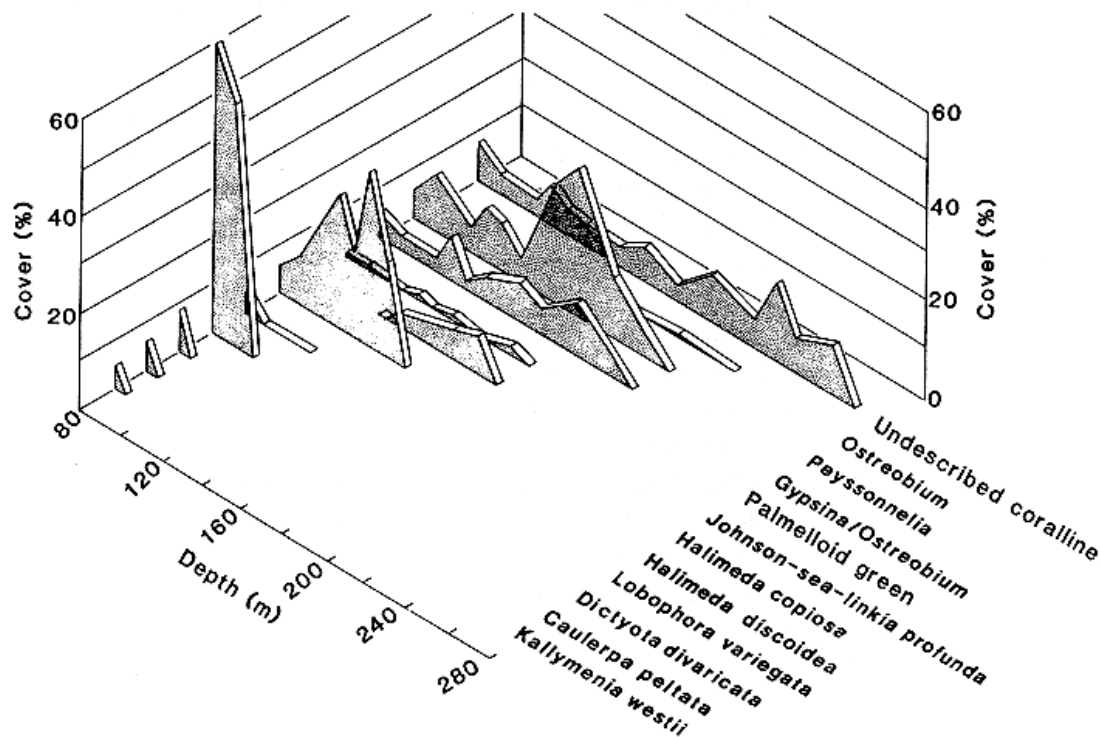
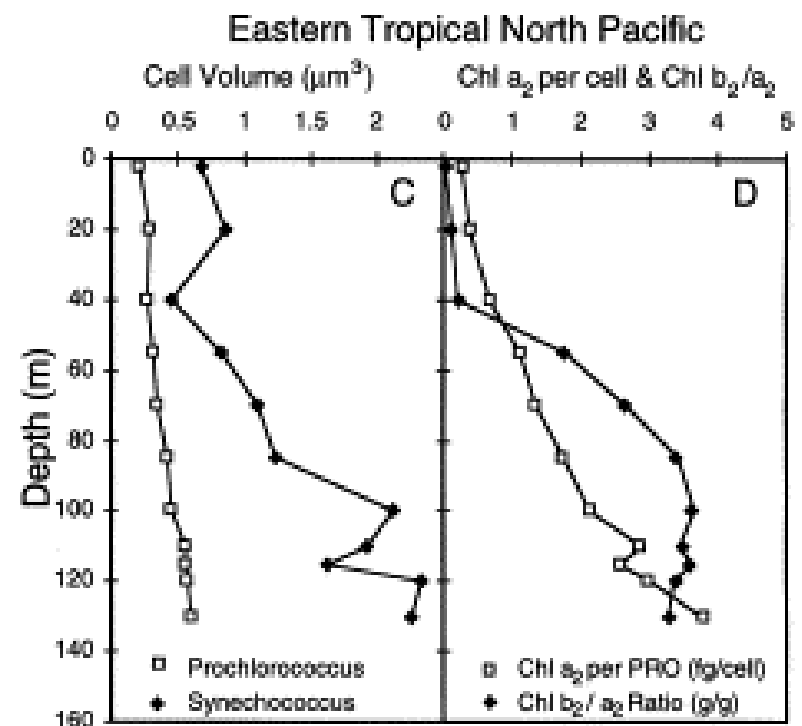
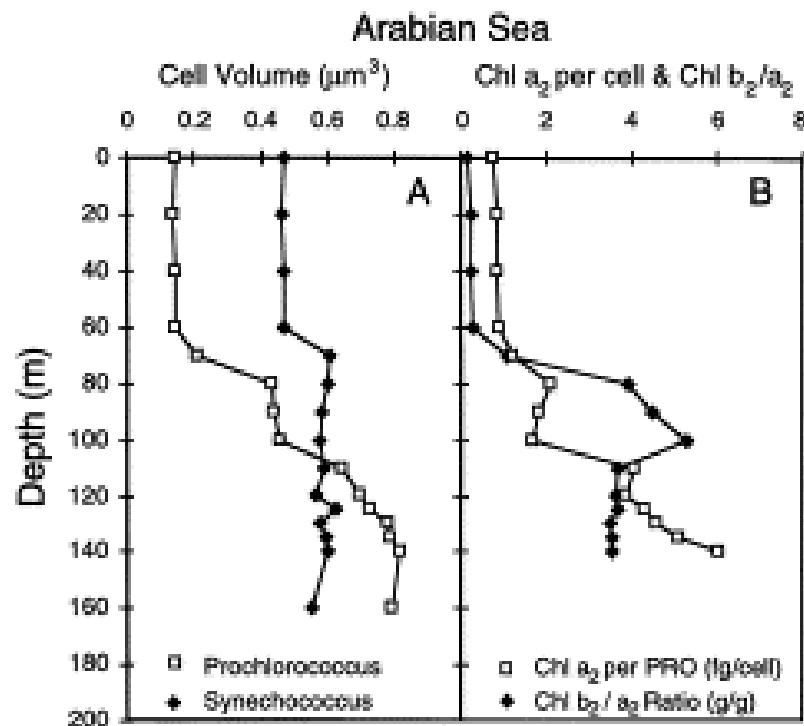
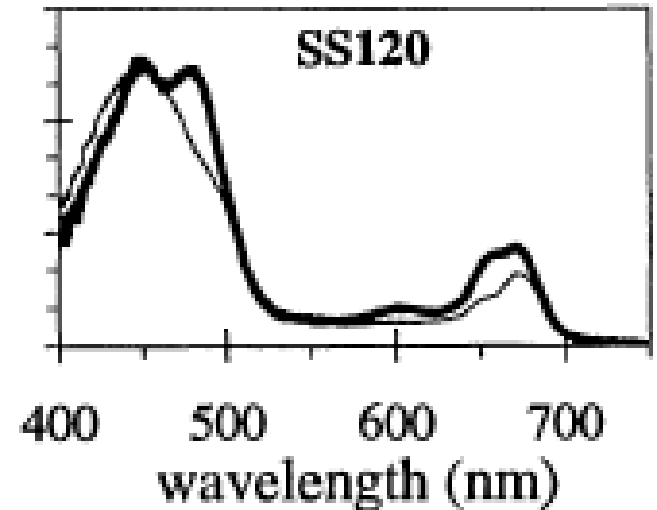


Fig. 2. Distribution and abundance patterns of the major plant cover.



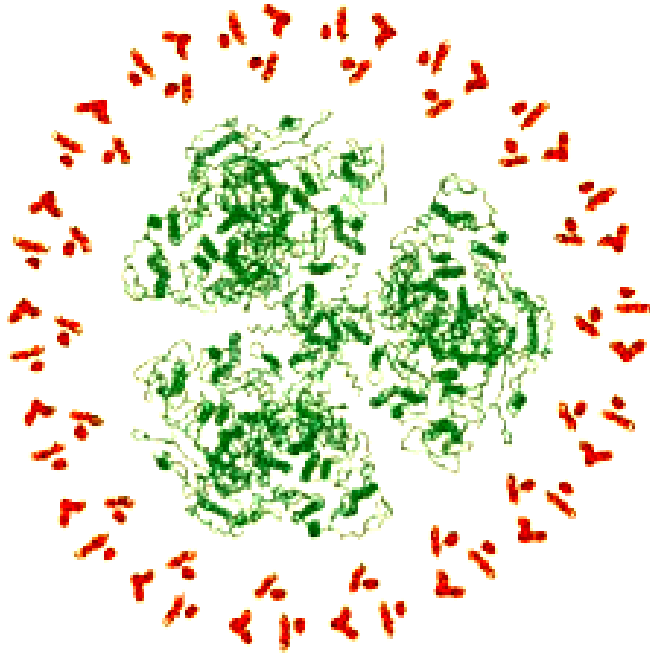
# Strategie za nízkého osvětlení

1. Zvýšení poměru Chl-b/Chl-a (zvýšení účinného průřezu v maximu spektra slunečního záření)
2. Syntéza Chl-a<sub>2</sub> and Chl-b<sub>2</sub> (divinyl Chl-a, Chl-b, lepší pokrytí v maximu spektra slunečního záření)



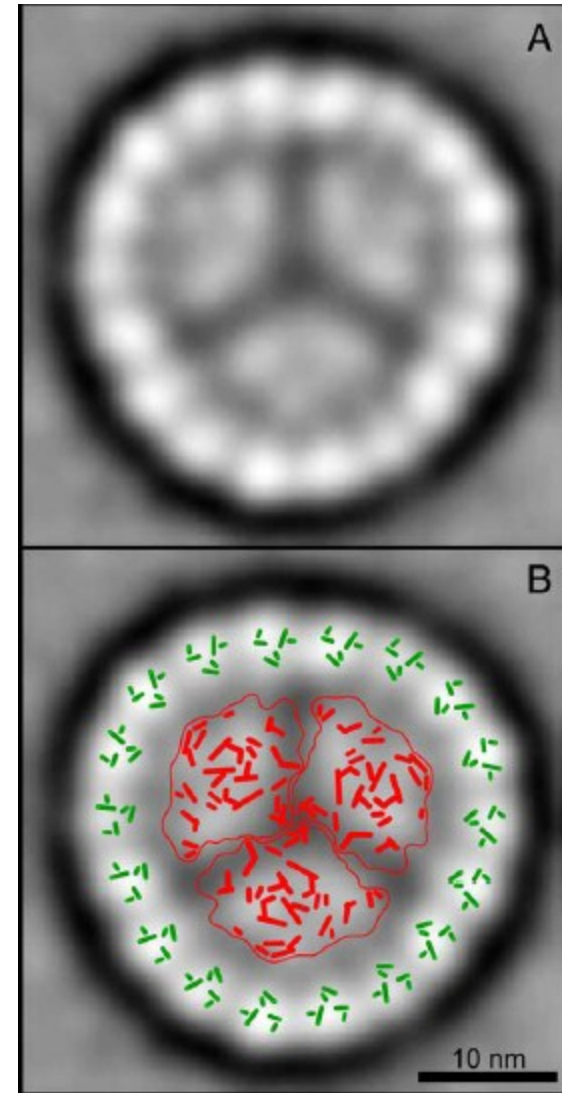
# *Přídavné antény u prochlorofyt*

**b**



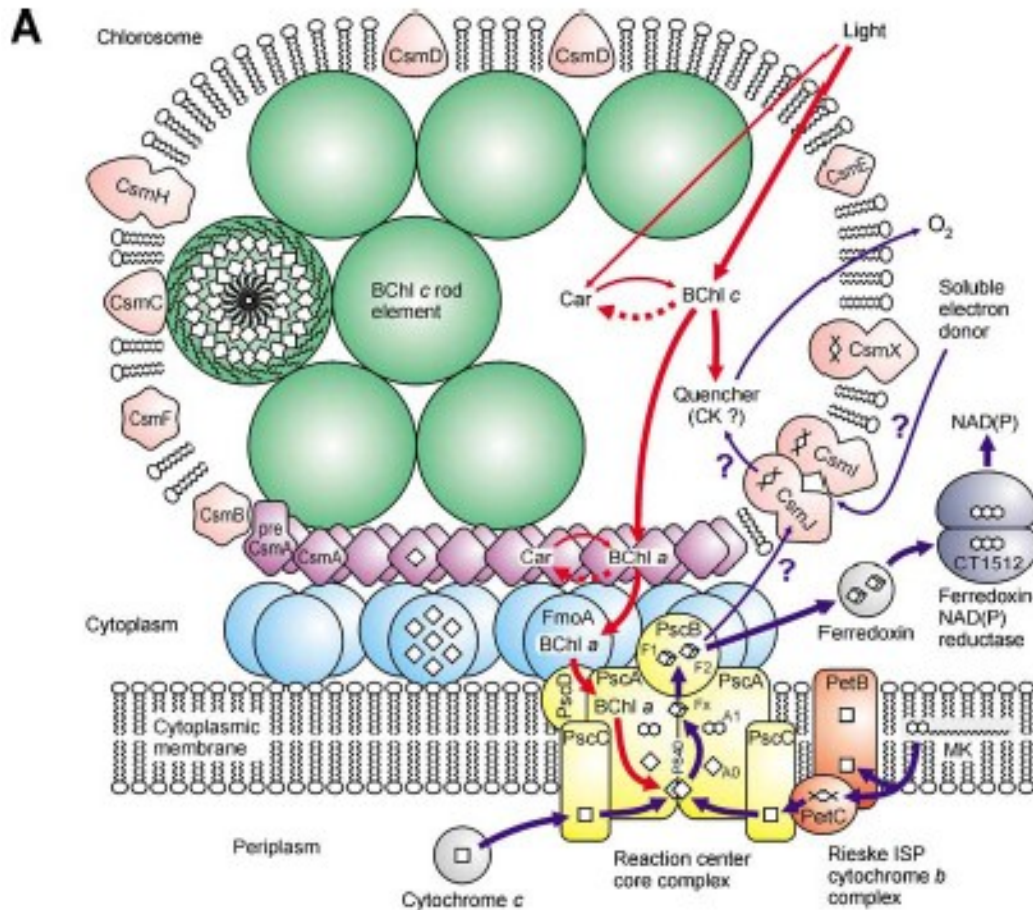
Prochlorococcus SS120  
Bibby et al., Nature 2001

**18 kopií Pcb proteinu kolem PSI přidá  
270 molekul chlorofylu, čímž se znásobí  
světlosběrná kapacita PSI**



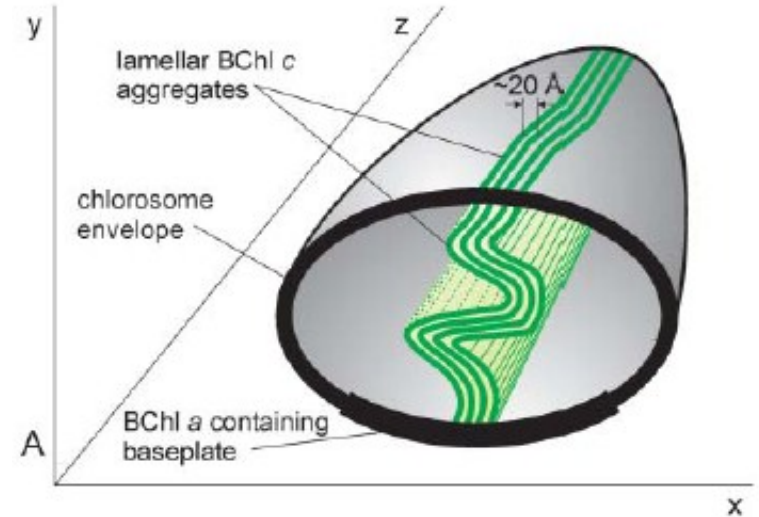
Prochlorotrix hollandica  
Bumba et al., BBA 2005

# Chlorosomy zelených sirných baktérií

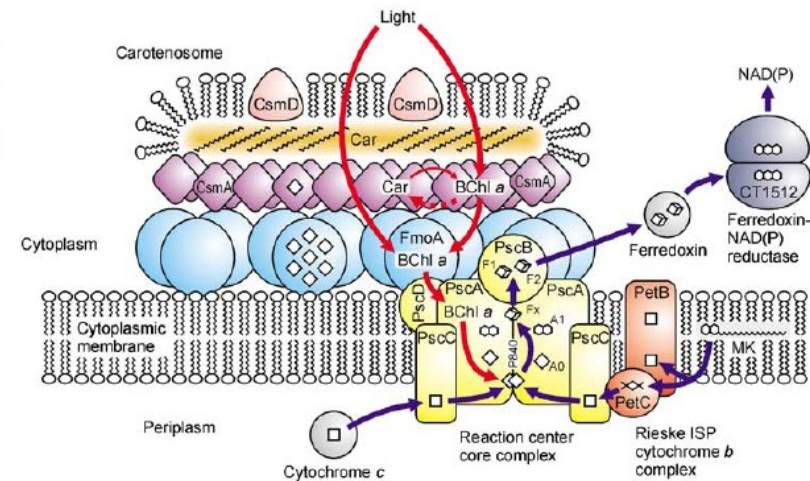


Frigaard et al. Photosynth. Res. 2003

**10<sup>6</sup> anténních molekul na RC!!**



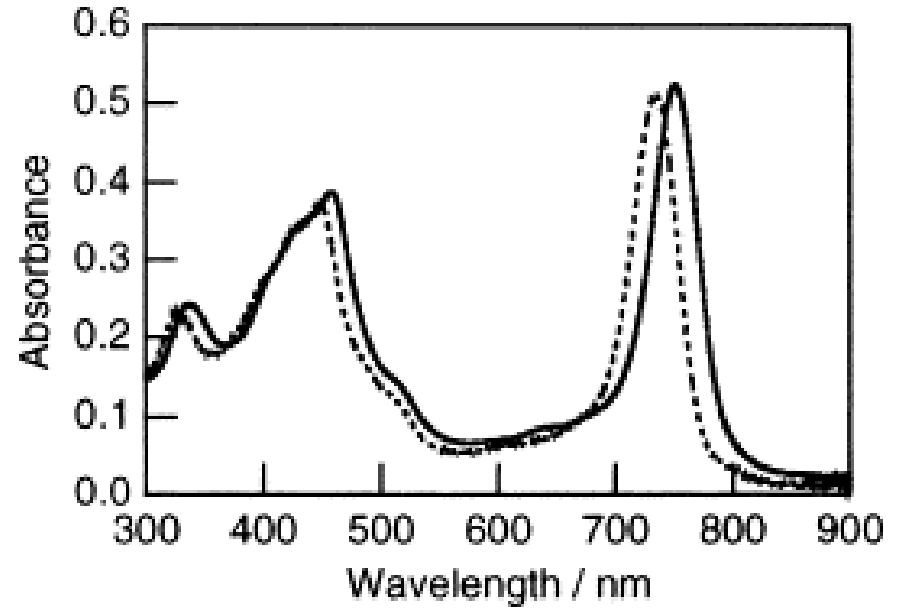
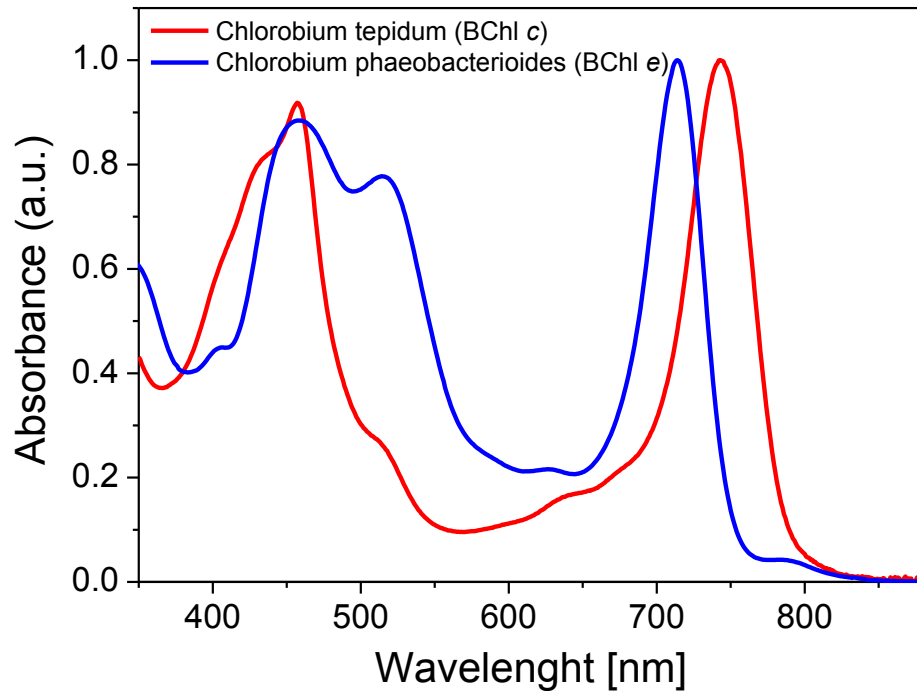
Pšenčík et al. Biophys. J. 2004



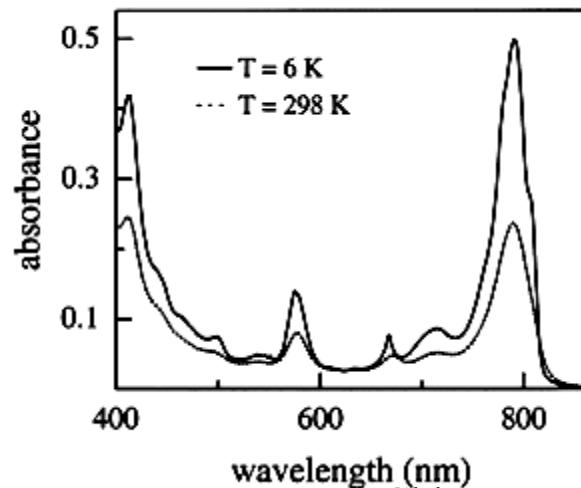
Frigaard et al. J. Bacteriol. 2002

# Absorpční spektra chlorosomů

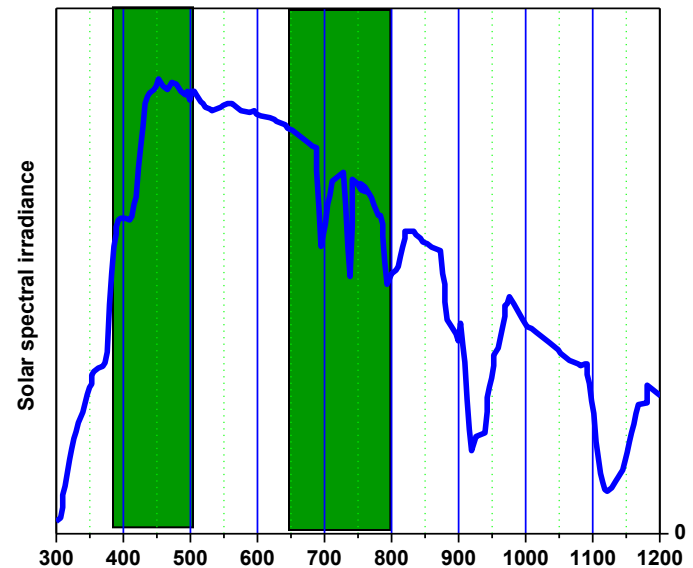
Absorption spectra of chlorosomes



BChl-c (solid), BChl-d (broken), Saga 2004



BChl-g, Neerken BBA 2001

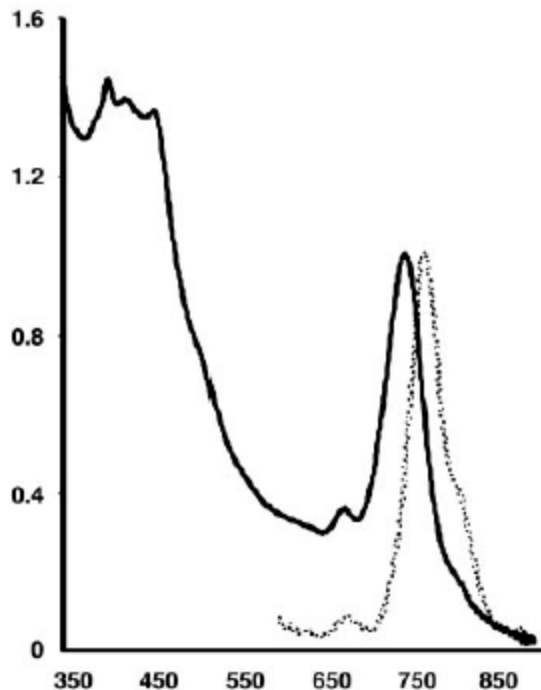


# Extrémní fotosyntéza

## An obligately photosynthetic bacterial anaerobe from a deep-sea hydrothermal vent

J. Thomas Beatty<sup>\*†</sup>, Jörg Overmann<sup>‡</sup>, Michael T. Lince<sup>§</sup>, Ann K. Manske<sup>‡</sup>, Andrew S. Lang<sup>\*¶</sup>, Robert E. Blankenship<sup>§</sup>, Cindy L. Van Dover<sup>||</sup>, Tracey A. Martinson<sup>¶</sup>, and F. Gerald Plumley<sup>¶\*\*</sup>

sulfur compounds to reduce CO<sub>2</sub> to organic carbon, and are capable of photosynthetic growth at extremely low light intensities. We describe the isolation and cultivation of a previously unknown green sulfur bacterial species from a deep-sea hydrothermal vent, where the only source of light is geothermal radiation that includes wavelengths absorbed by photosynthetic pigments of

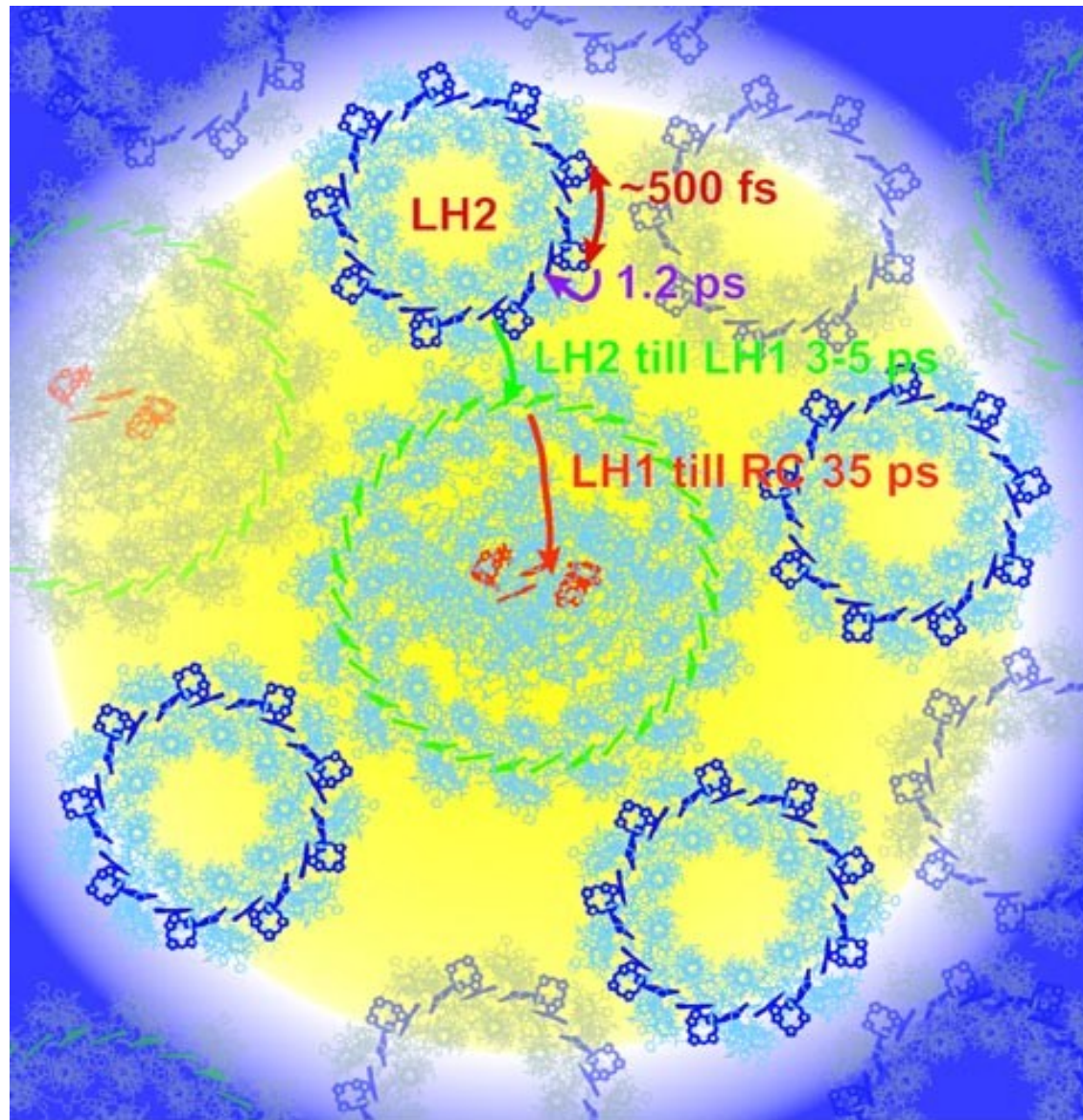


On this cruise, we visited the East Pacific Rise, which is an area of high volcanic activity with a variety of vents that support characteristic ecosystems (2, 21). A water sample was obtained directly from the effluent plume within 50 cm above the orifice of the TY black smoker (2,391 m in depth; 9° 49.63' N, 104° 17.37' W), using a 1-liter capacity Niskin sampler on the ALVIN

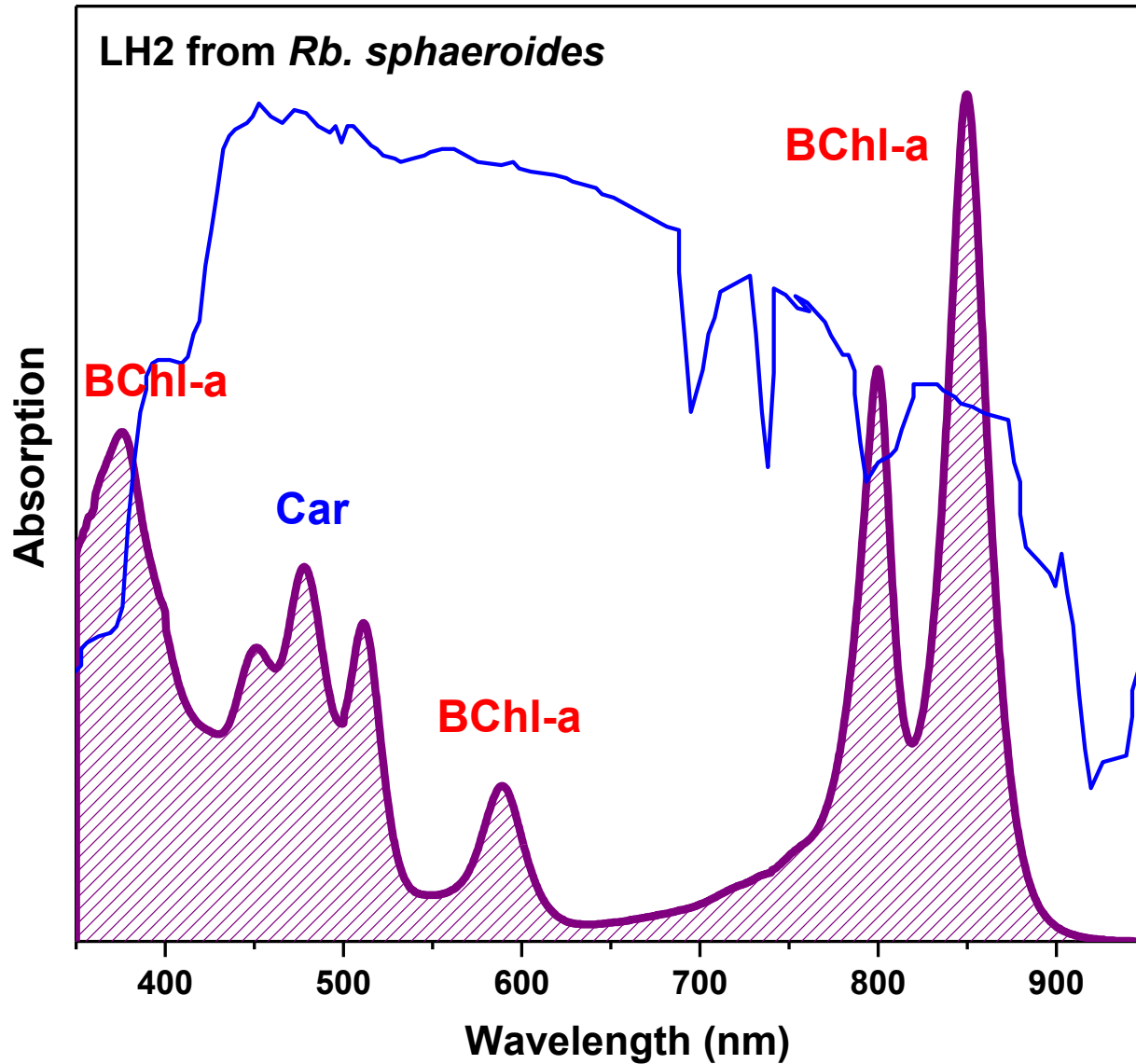
*Zelená sirná baktérie, BChl-c jako hlavní pigment*



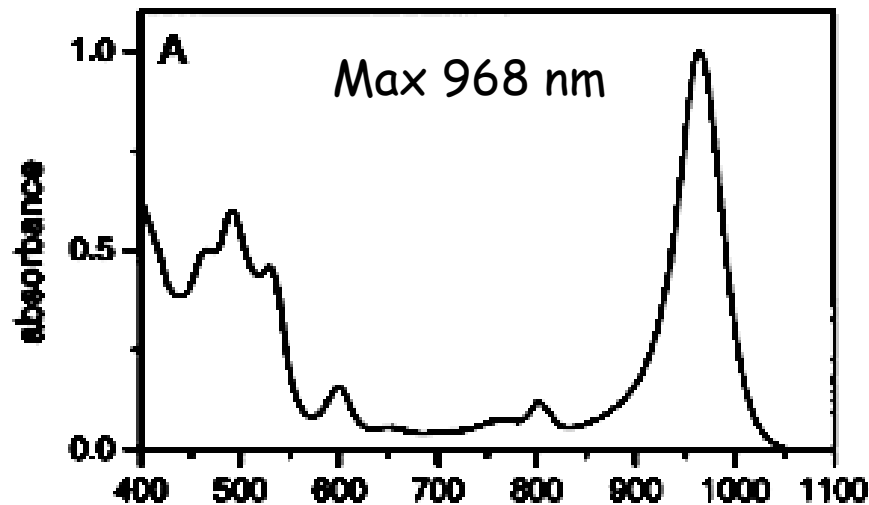
# *Purpurové baktérie*



# *LH2 spektrum*



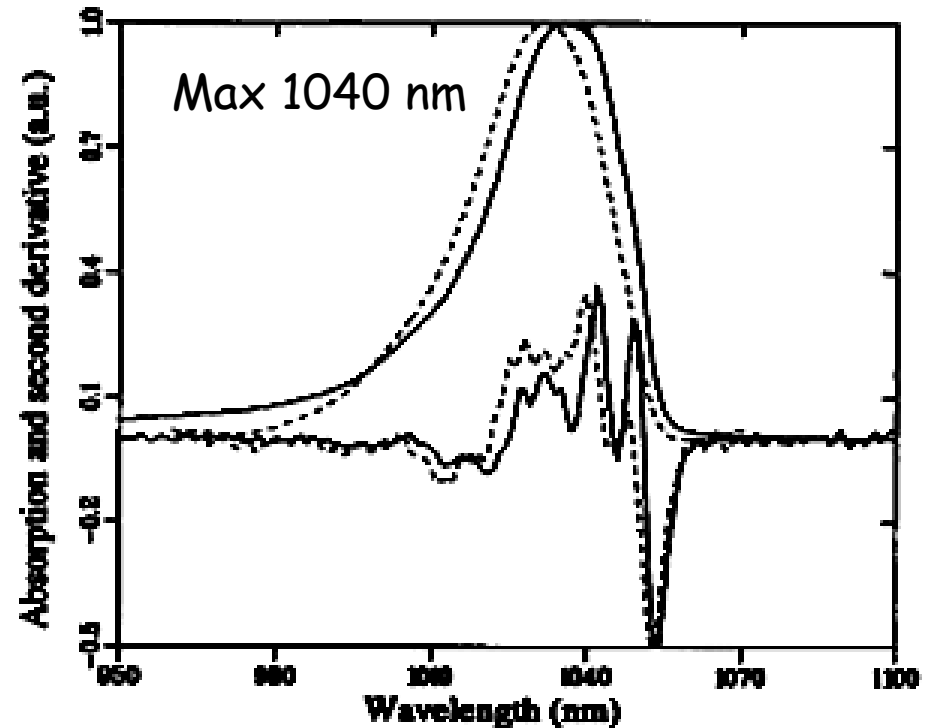
# *Purpurové bakterie - dál do infračervené oblasti*



neidentifikovaná purpurová bakterie,  
BChl-a  
Permentier Bioch. 2001

Značné spektrální posuvy způsobené  
interakcí s proteinem

**770 nm v roztoku, 968 nm v proteinu**



Rps. viridis, BChl-b  
Monshouwer BBA 1995

Extrémní spektrální posuvy, specifické pro  
BChl-b

**790 nm v roztoku, 1040 nm v proteinu**

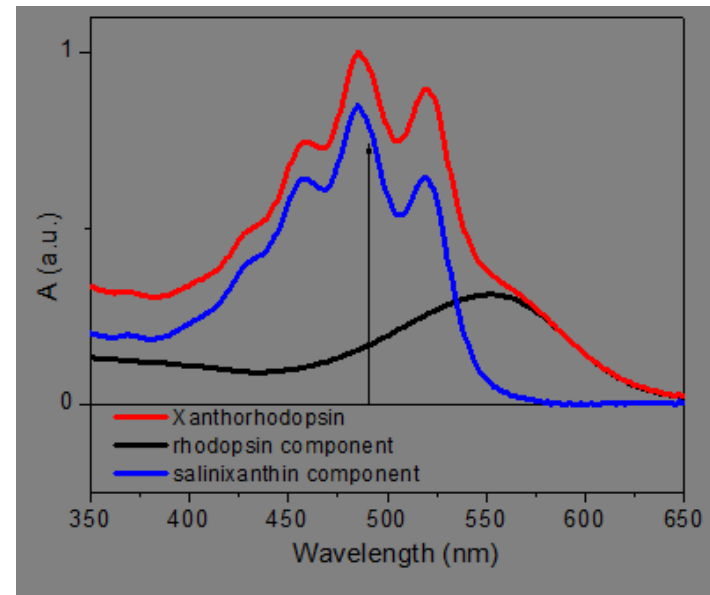
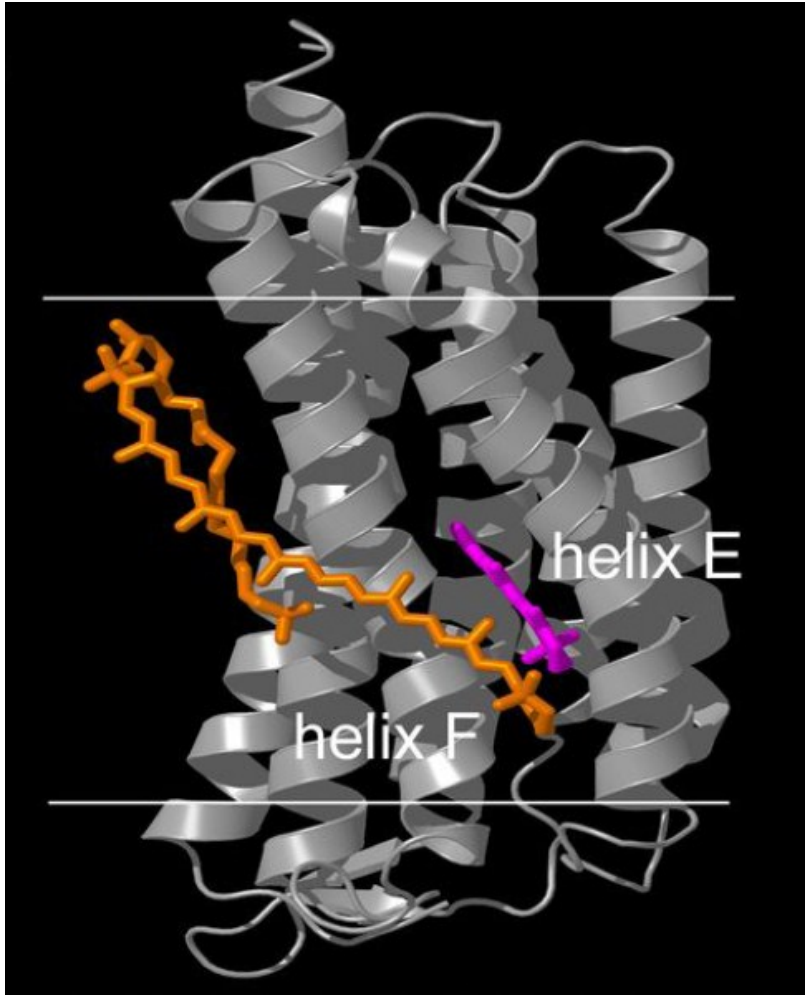


# Xanthorhodopsin

Protein z rodiny rhodopsinů, což jsou protonové pumpy využívající světlo jako primární zdroj energie

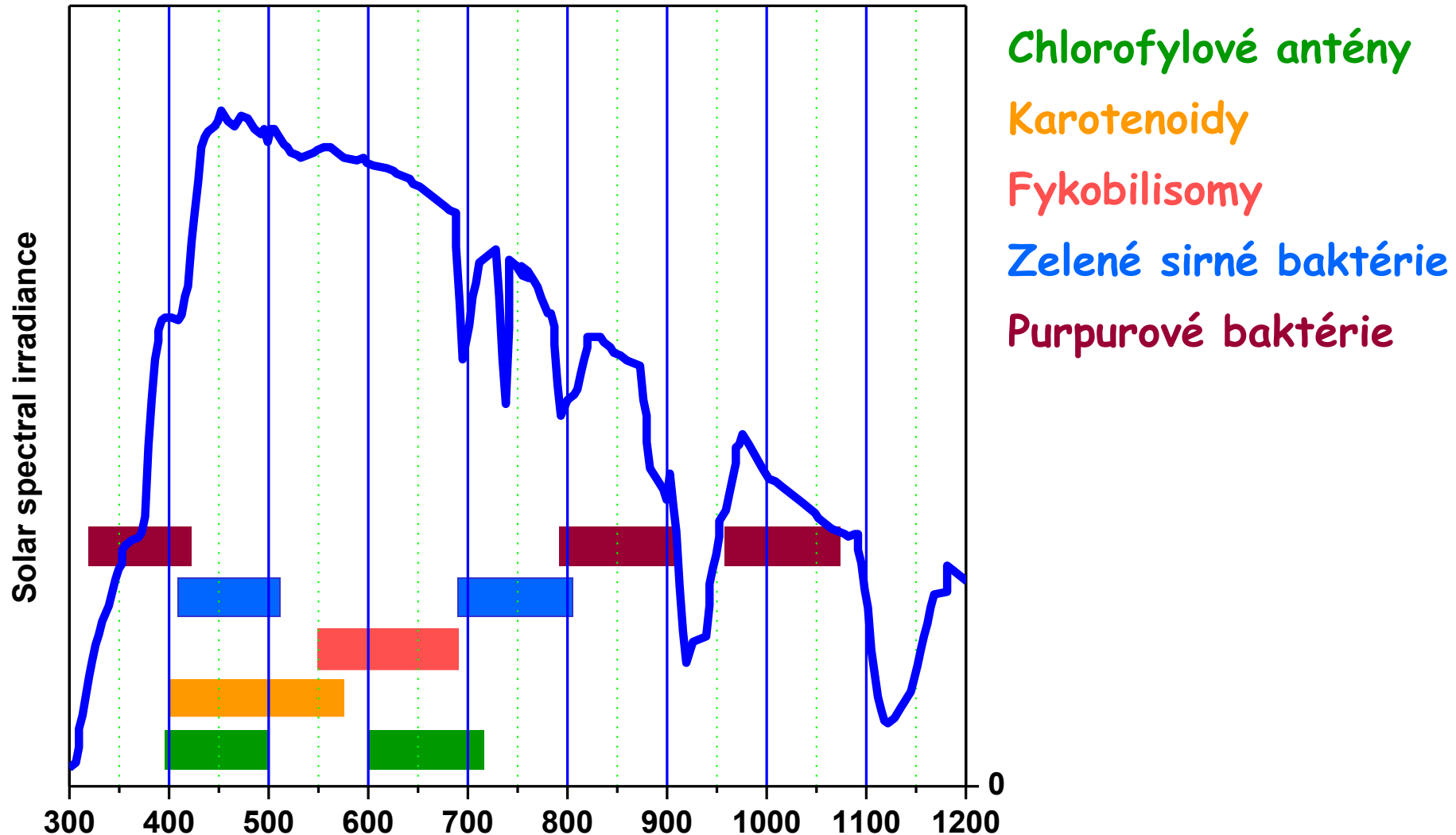
**Není to „typická“ fotosyntéza**

**Anténní funkce xanthorhodopsinu  
objevna v roce 2005, struktura  
vyřešena v roce 2009**



**Nejjednodušší dosud známá anténa**, obsahuje jeden anténní pigment, karotenoid salinixanthin, a jeden pigment s rolí reakčního centra - retinal

# *Sluneční záření využívané k fotosyntéze*

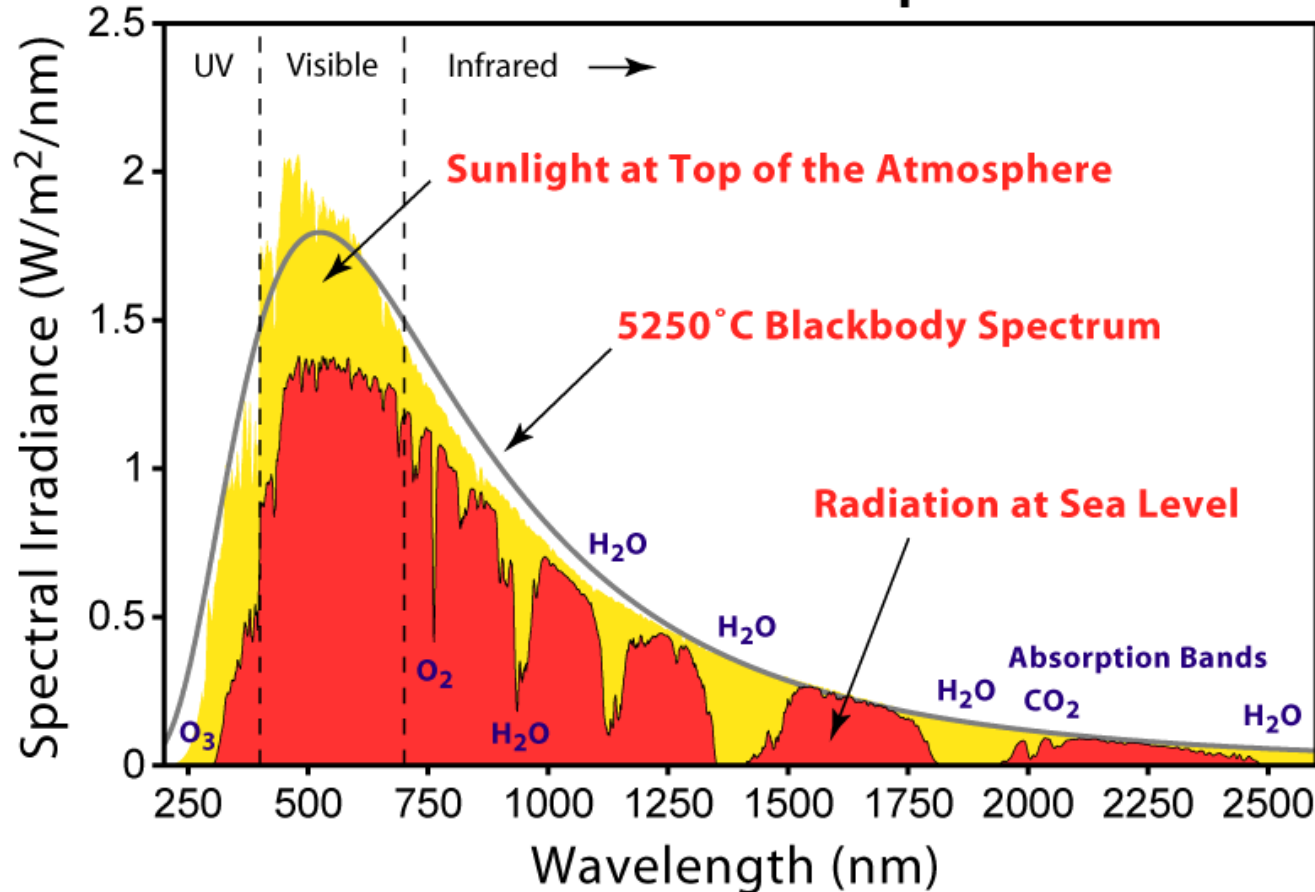


# *Umělá fotosyntéza*



# Parametry slunečního záření

## Solar Radiation Spectrum



Solární konstanta

1366  $\text{Wm}^{-2}$

174 000 TW

345  $\text{Wm}^{-2}$

44 000 TW

K získání 1 GW energie  
je zapotřebí 3  $\text{km}^2$

+ účinnost  
+ spektrální závislost



# Sluneční elektrárny



Solar II, Mojave desert 10 MW  
„standardní“ elektrárna,  
Southern California Edison 500 MW,



Gut Erlasee Solar Park 12 MW  
Fotovoltaické panely



Serpa, Portugalsko 11 MW  
Fotovoltaické panely

$50 \text{ W/m}^2$

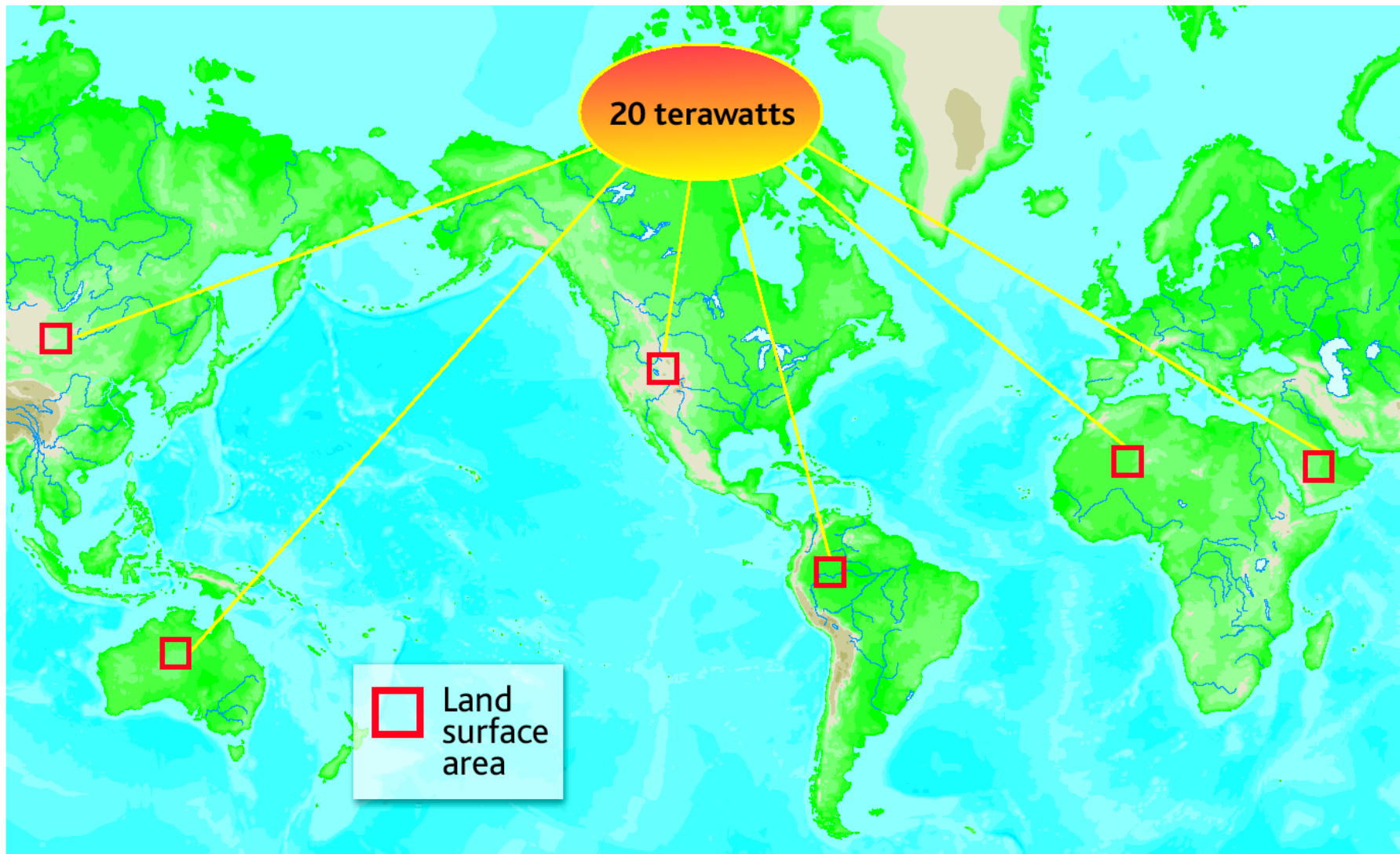
# *Problém hustoty energie*

1 ha fotovoltaických článků = 1 dm<sup>3</sup> jaderného paliva

**1645W/m<sup>2</sup>**

V případě jaderné fúze je hustota energie zhruba 4x vyšší než u štěpení (na kg paliva)

# *Sluneční energie - plocha pokrytí*



**Global need.** This map shows the amount of land needed to generate 20TW with 10% efficient solar cells.

# *Problém toku energie*

K zabezpečení plynulé dodávky elektrické energie je třeba plynulé dodávky zdroje energie

Fosilní paliva, jaderné palivo, **geotermální, biomasa, příliv**

Většina obnovitelných zdrojů energie nesplňuje podmínku plynulosti toku energie

**Voda, slunce, vítr**

Nutno zálohovat výrobu energie jinými zdroji

Využít obnovitelných zdrojů k výrobě skladovatelné formy energie - **paliva**

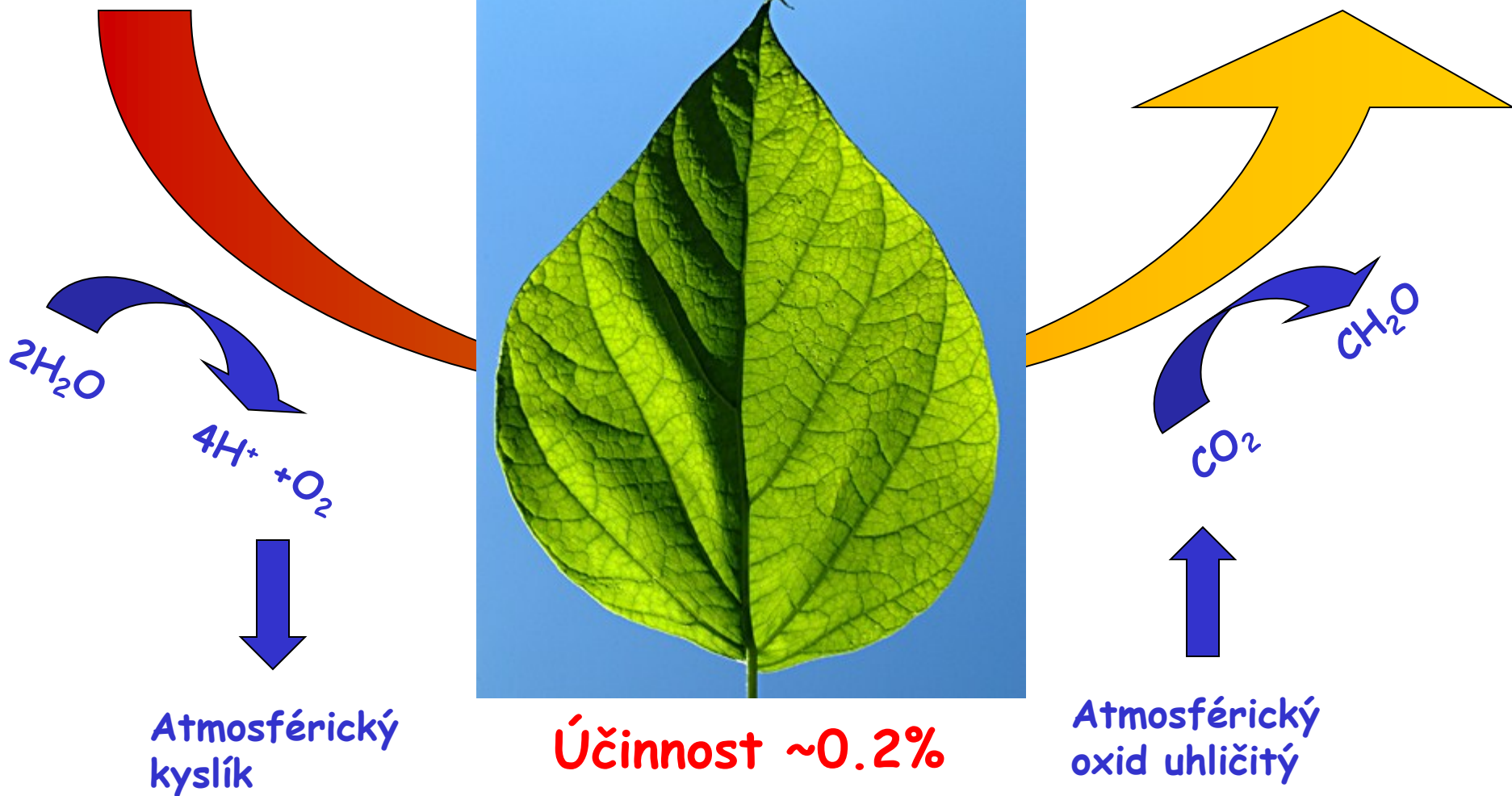
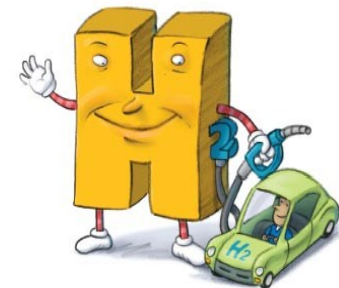
**Umělá fotosyntéza**



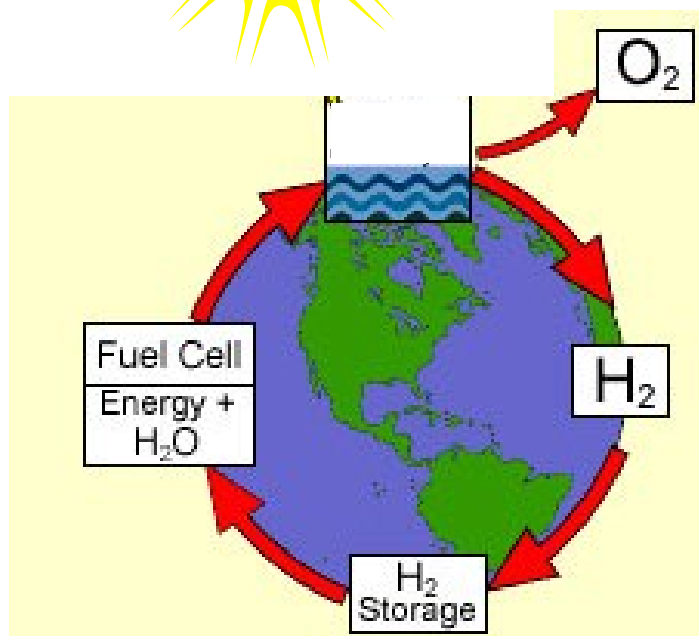


# Fotosyntéza

## Primární zdroj energie v biosféře



# Umělá fotosyntéza



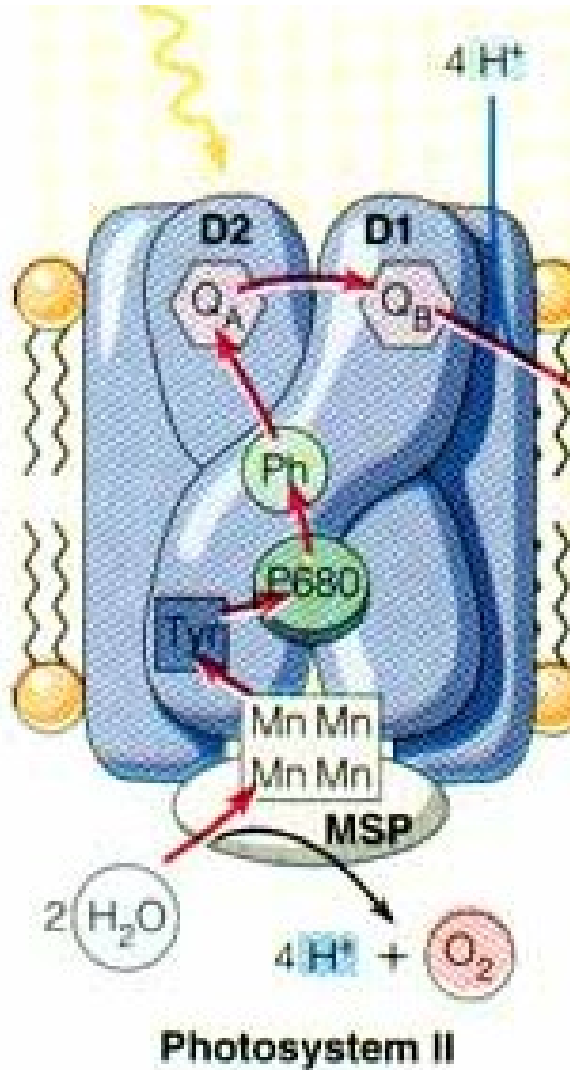
- Napodobení a modifikace přírodních dějů
- Čistý a obnovitelný zdroj energie
- Zatím technologicky nedostupný

Jules Verne, 1875



umělá fotosyntéza vodíku a kyslíku

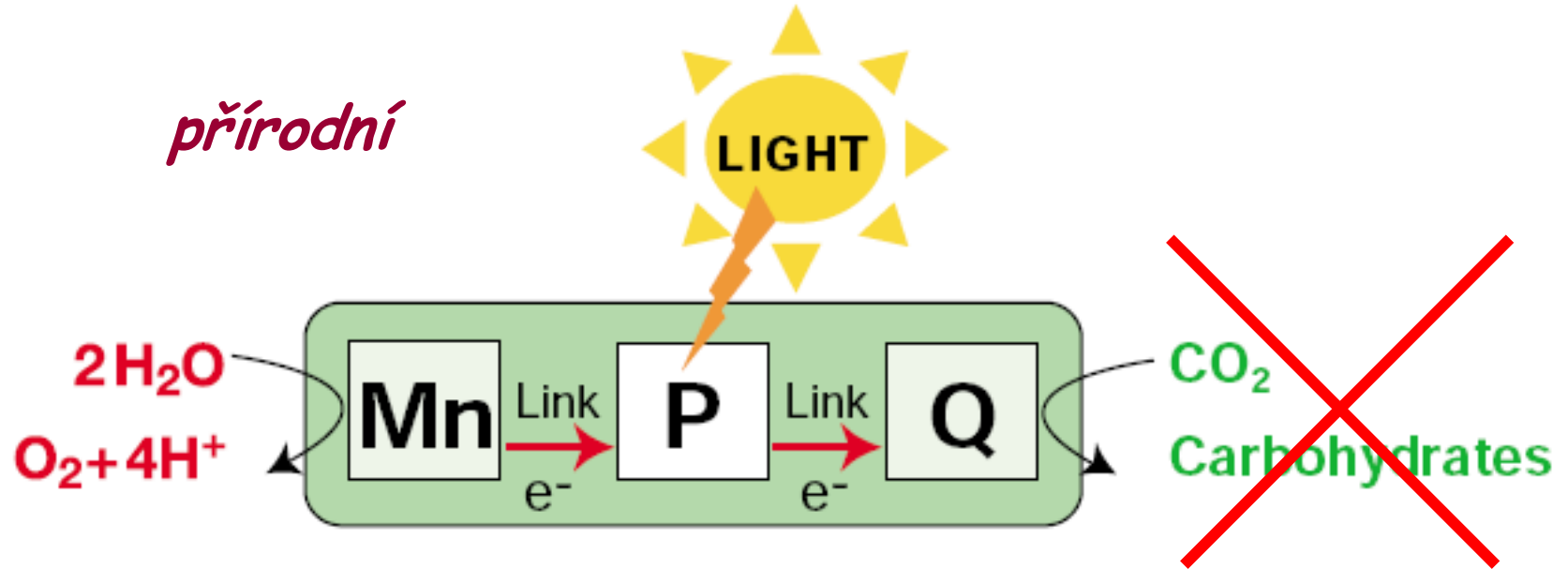
# Fotosystém II - přenos elektronu



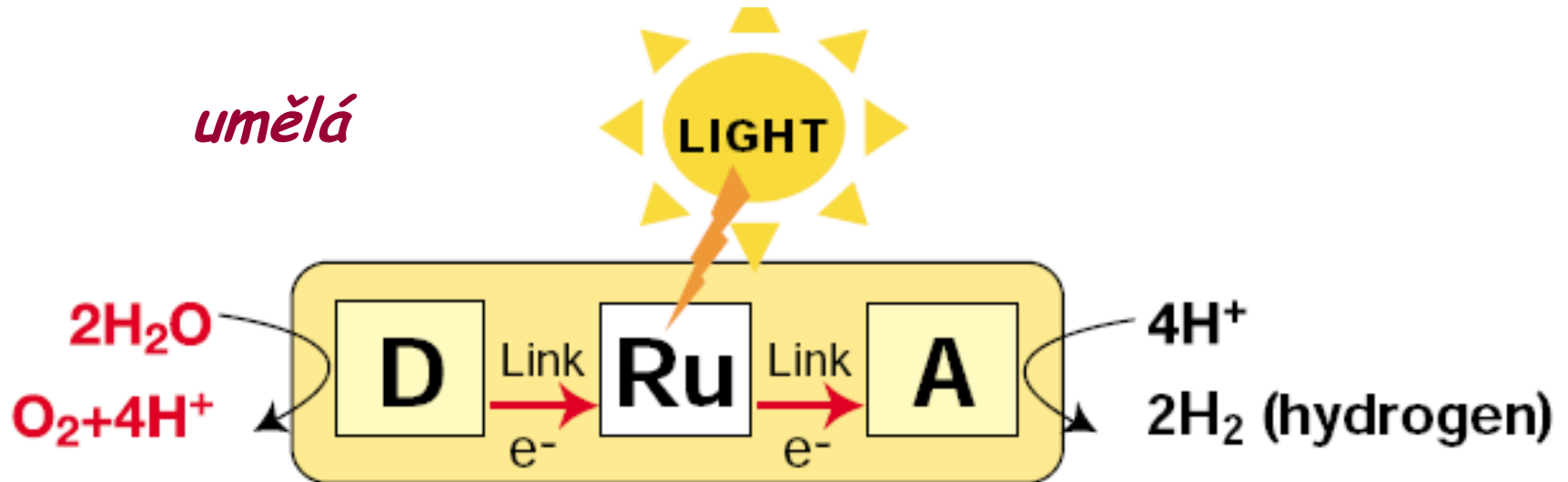
- **P680** - tzv. primární donor, chlorofyl-a, maximum absorpce 680 nm
- **Ph** - pheophytin, první akceptor elektronu
- **Q<sub>a</sub>, Q<sub>b</sub>** - chinony, sekundární akceptory elektronu
- **Tyr** - tyrosin, poslední přenašeč elektronu na donorové straně
- **Mn** - manganový klastr

# *Jak napodobit přírodní procesy*

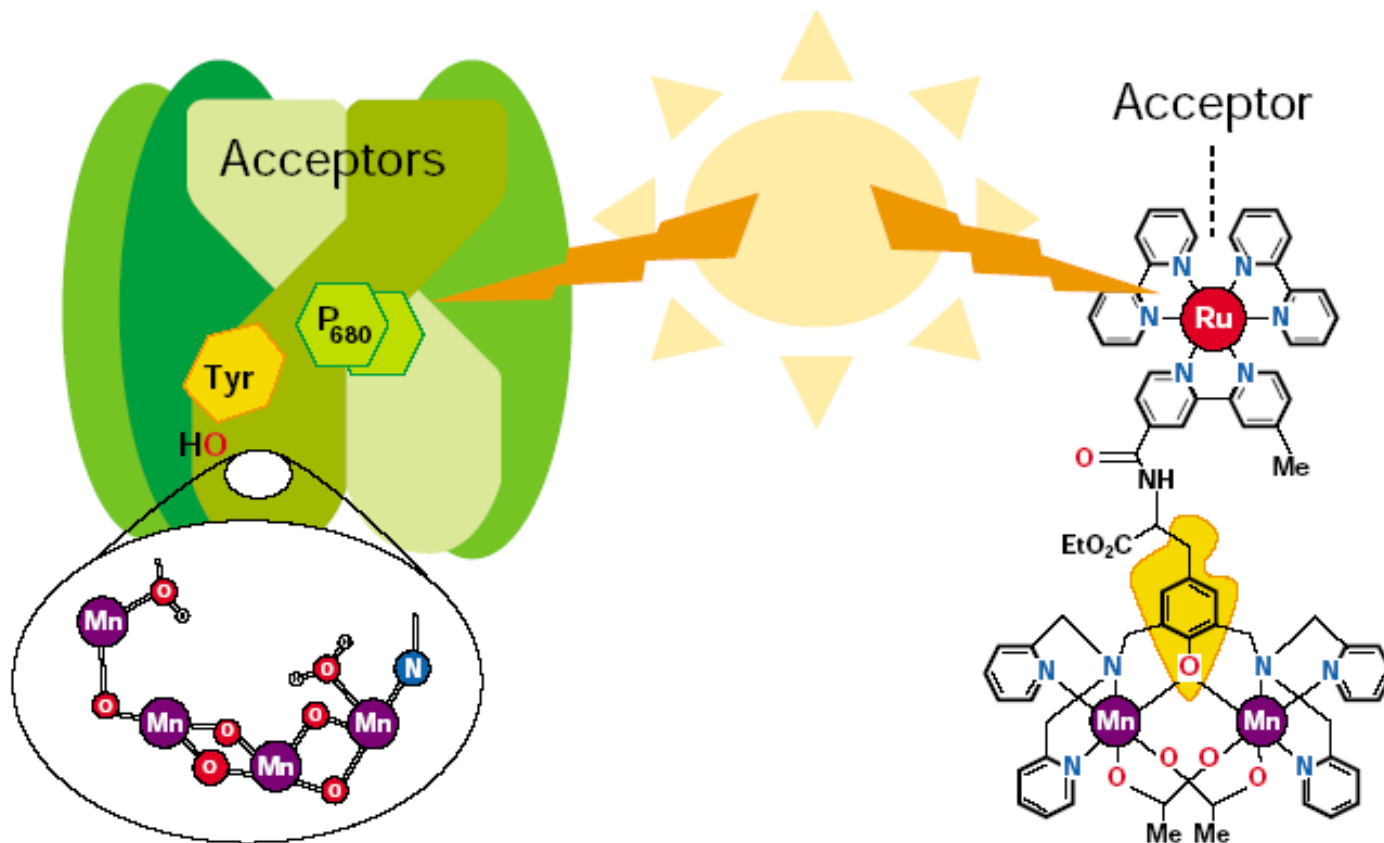
*přírodní*



*umělá*



# Přírodní vs. umělá fotosyntéza



**Ruthenium tris-bipyridyl:**

**Tyrosin:**

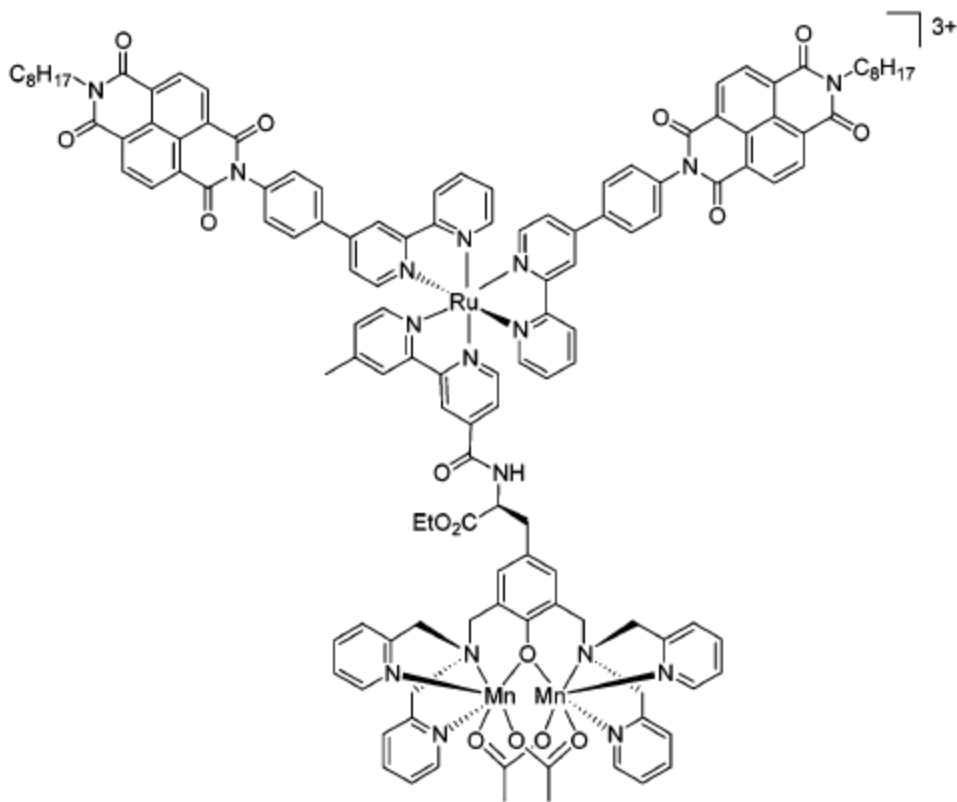
**Manganový komplex:**

**Akceptor:**

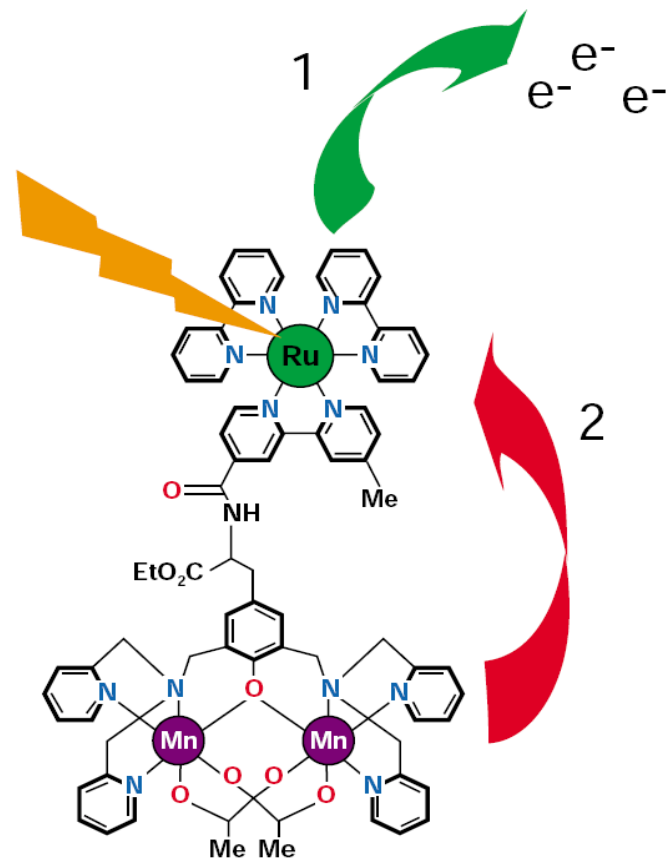
primární donor, fotochemicky stabilní,  
snadno chemicky modifikovatelný  
intermediální přenašeč elektronu  
oxidace vody  
např. TiO<sub>2</sub>

Zdroj: Swedish Consortium for Artificial Photosynthesis

# Modely umělého reakčního centra



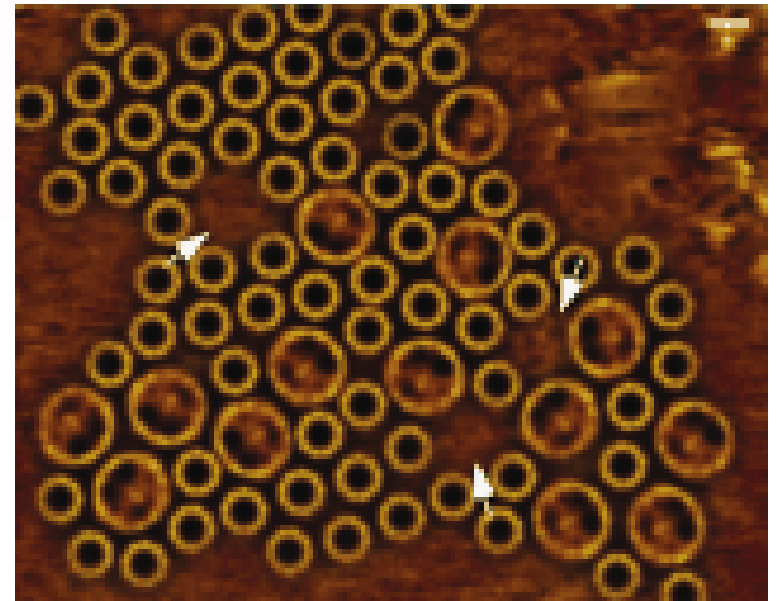
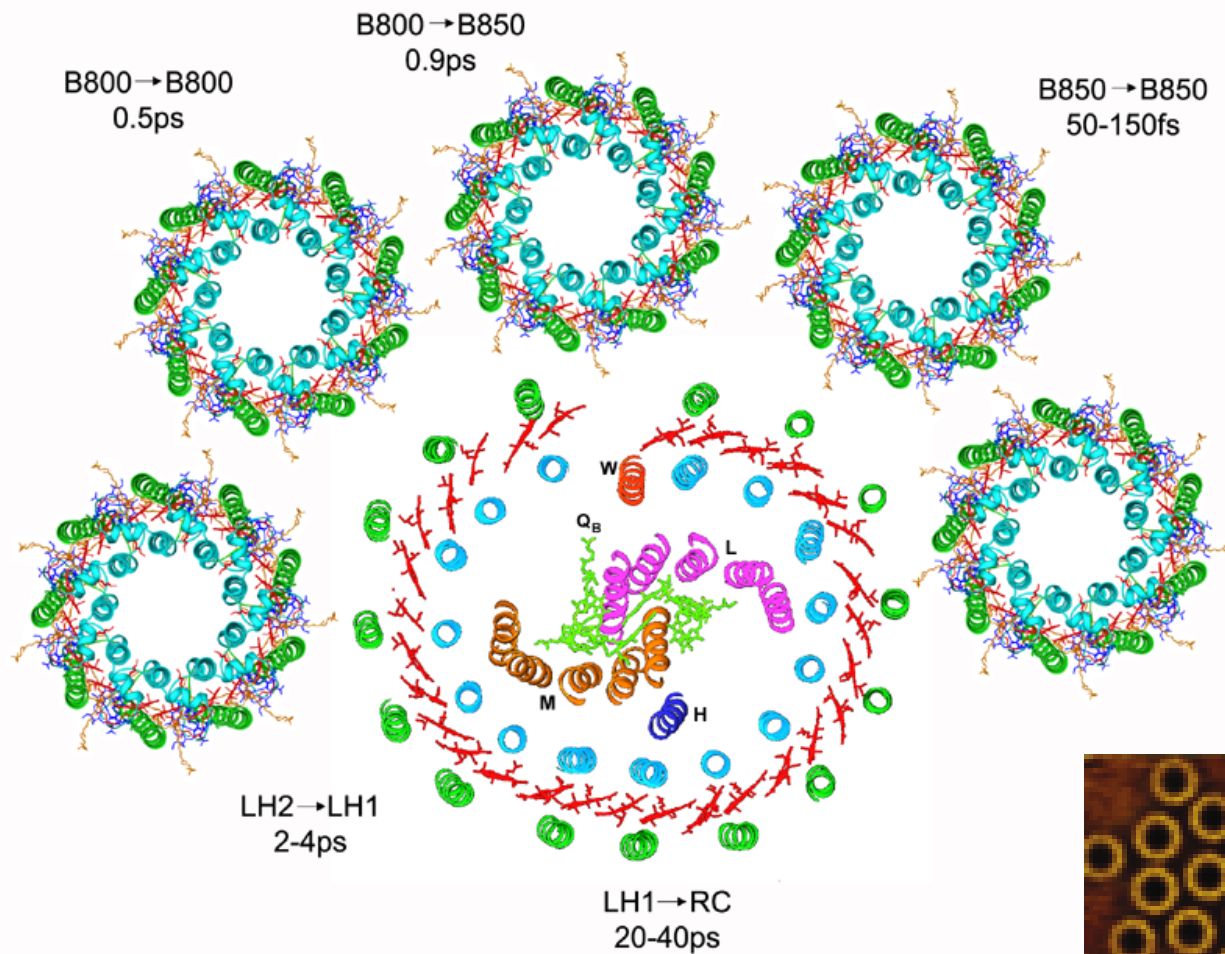
Borgstrom, JACS 2005



Huang, JACS 2002

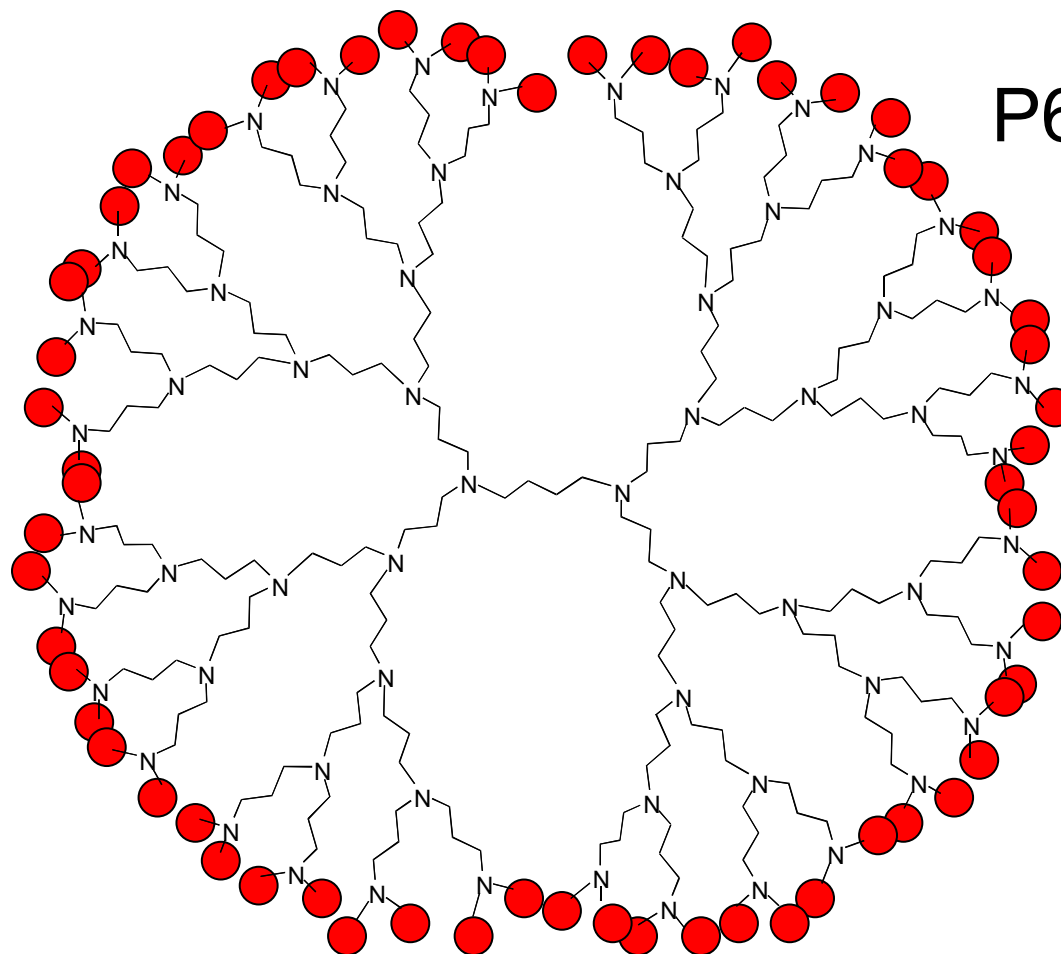
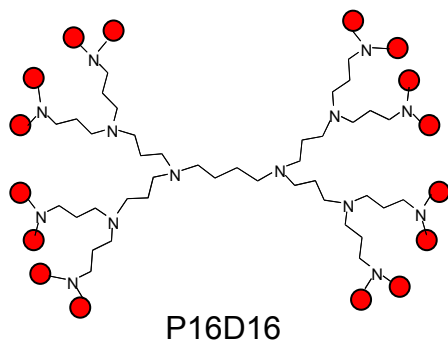
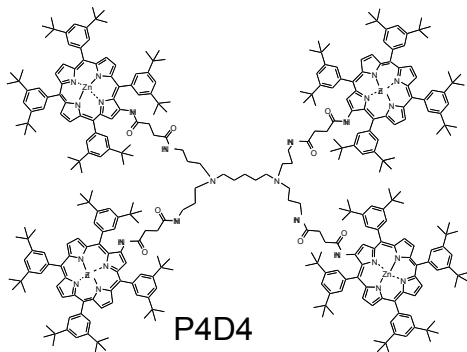
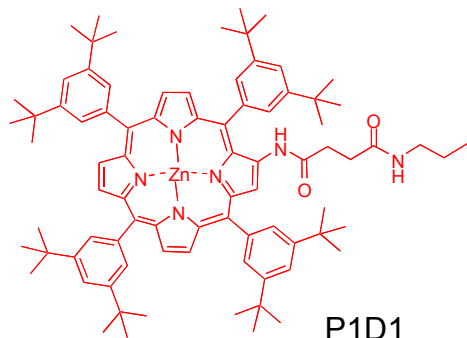
**Zatím neexistuje systém  
schopný účinného štěpení vody pomocí světla**

# *Purpurové baktérie*





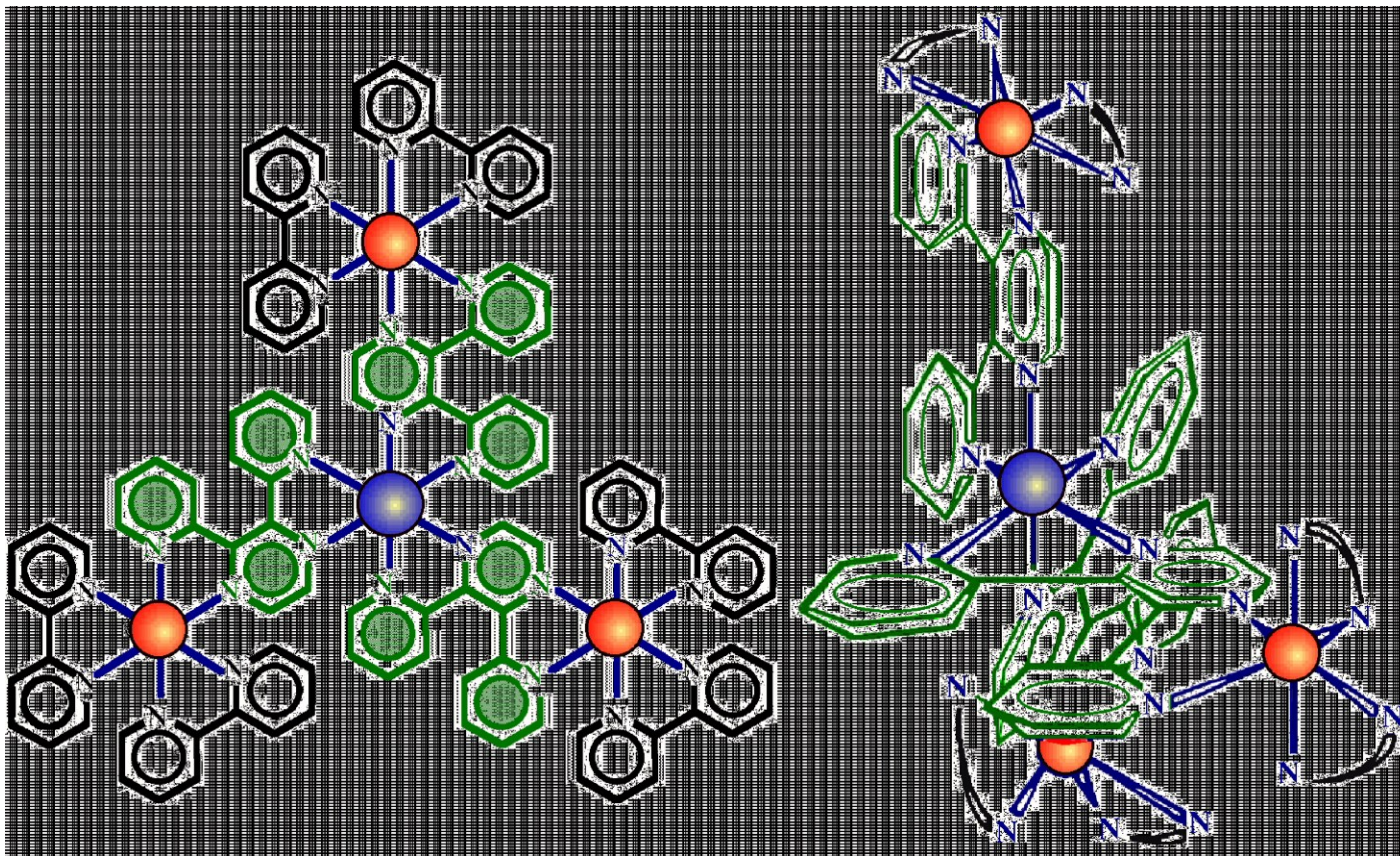
# Umělé anténní systémy



*Porfyrinové dendrimery*  
*Abs. 400-450, 520-630*  
*Velký účinný průřez*



# *Umělé anténní systémy*



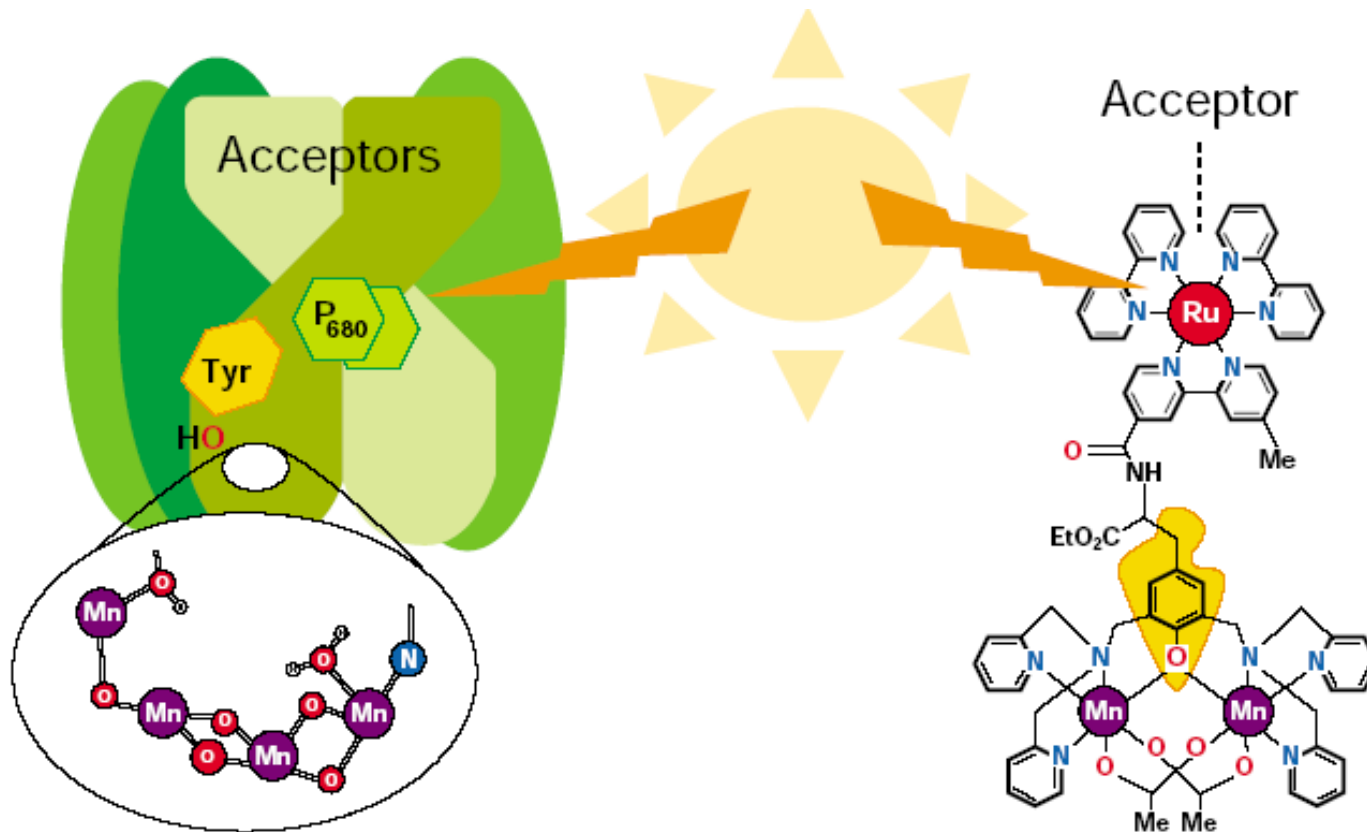
*Komplexy přechodových kovů (Ru, Os)*

*Abs. 400-700 nm*

*Nízký účinný průřez, rychlý přenos energie*

*Sebastiano Campagna, University of Messina*

# Funkční problémy



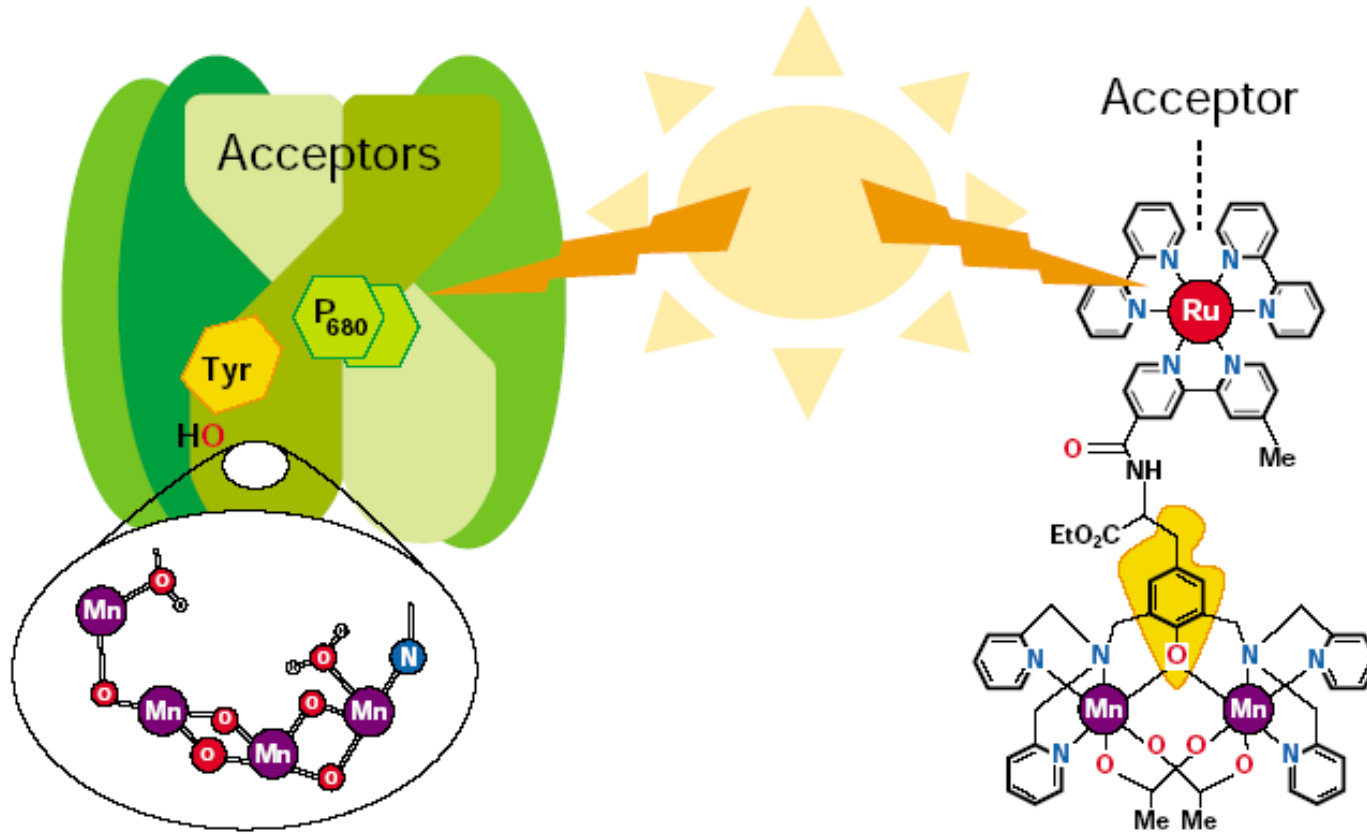
## Problém struktury

Přítomnost proteinu jako nosné struktury zabraňuje tvorbě izomerů a konformerů

## Možné řešení

Fixace umělých komplexů na pevné podložky nebo do nanotrubic

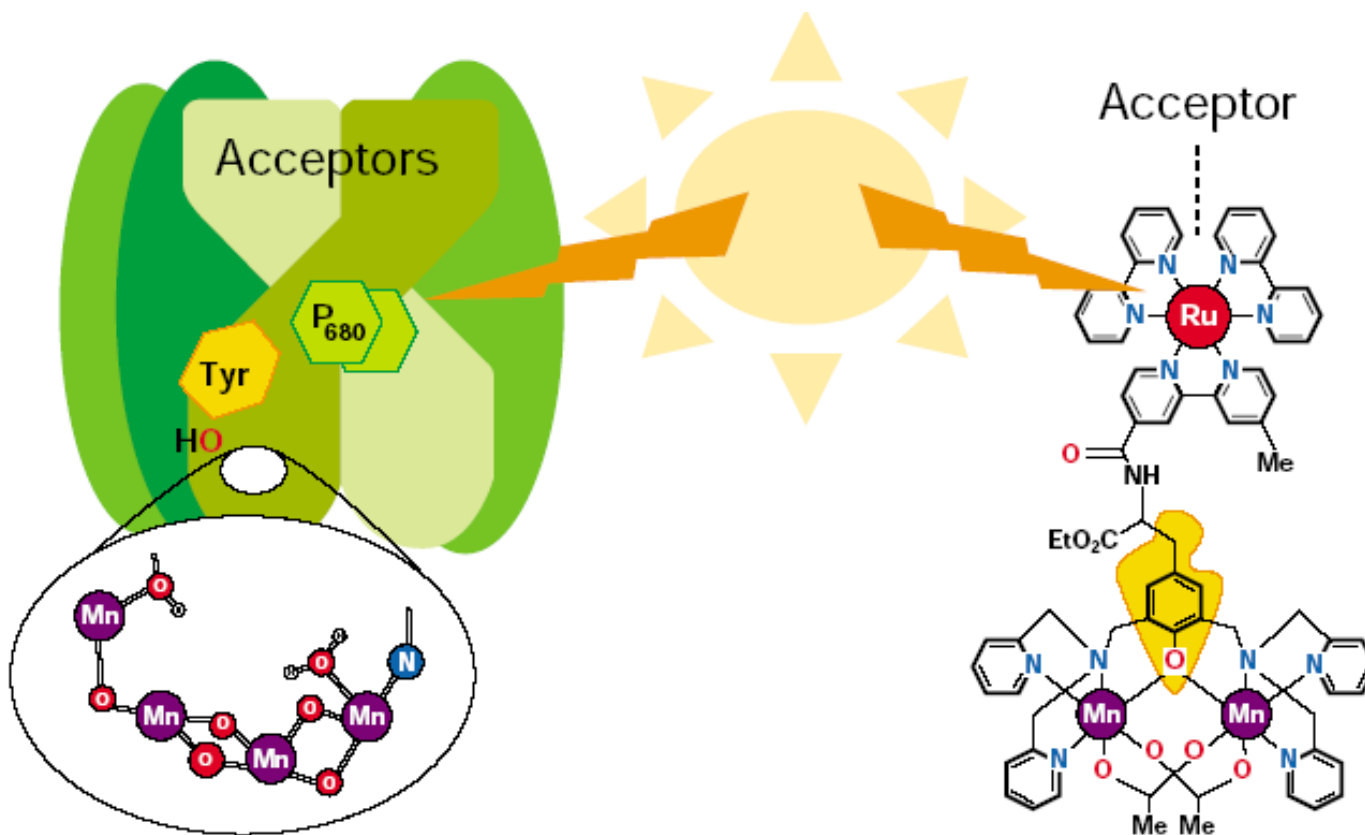
# Funkční problémy



## Problém znalostí

Některé funkční a strukturní detaily přírodních systémů stále neznáme

# Funkční problémy



## Problém účinnosti

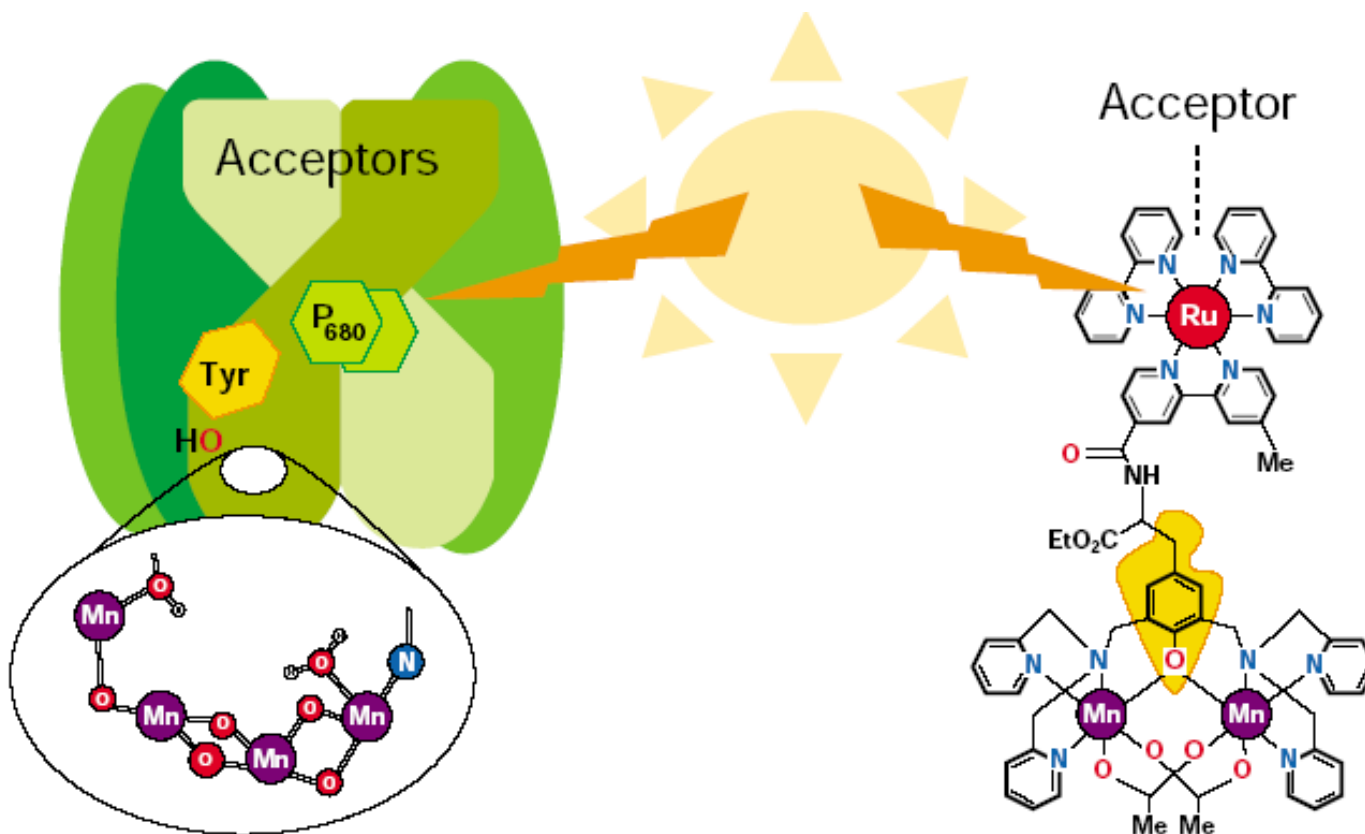
Reakce na umělých komplexech jsou výrazně pomalejší což vede k nízké účinnosti

## Možné řešení

Další výzkum v oblasti fyzikální chemie, elektrochemie, organické syntézy...



# Funkční problémy

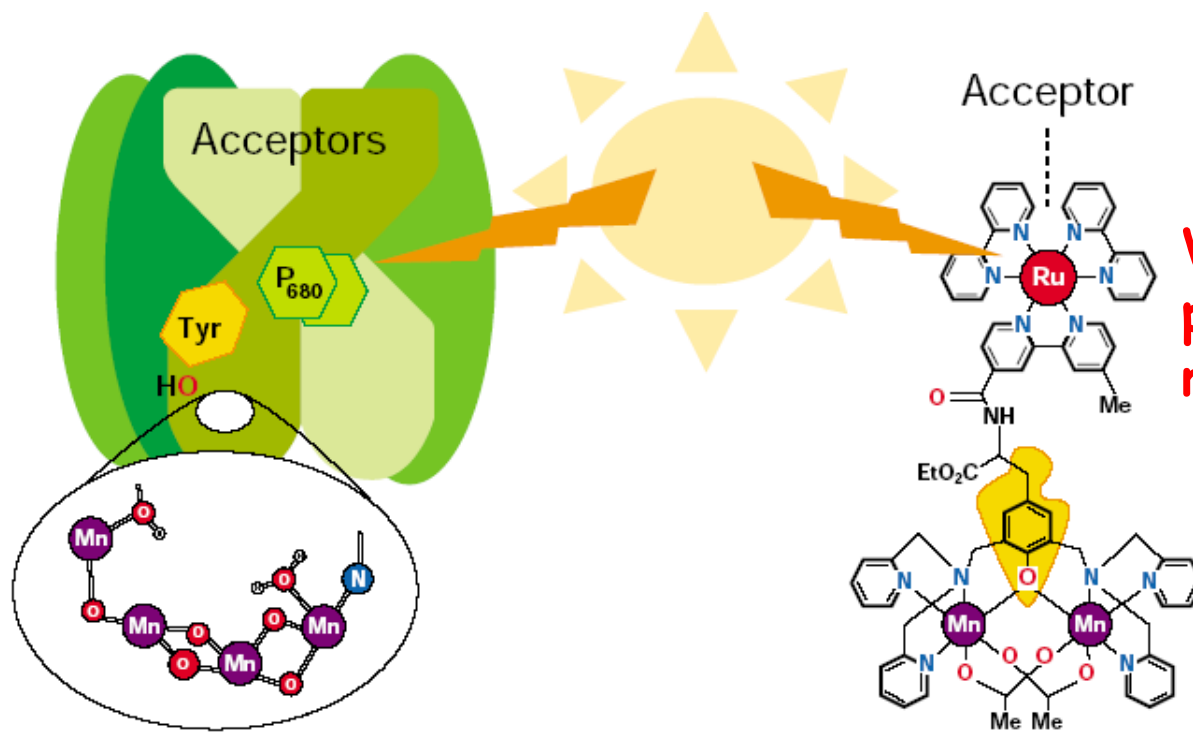


## Problém konektivity

Současné semifunkční modely reakčních center a antén jsou nepropojitelné, jelikož nejnižší energetický stav umělých anténních komplexů je příliš nízko

# Umělá fotosyntéza

Výborná myšlenka, která má potenciál  
zajistit čistý a obnovitelný zdroj energie



Výsledky dosažené v  
poslední době =  
realizace (snad) možná

Cesta k plně funkční umělé fotosyntéze bude dlouhá