

Světloběrné 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

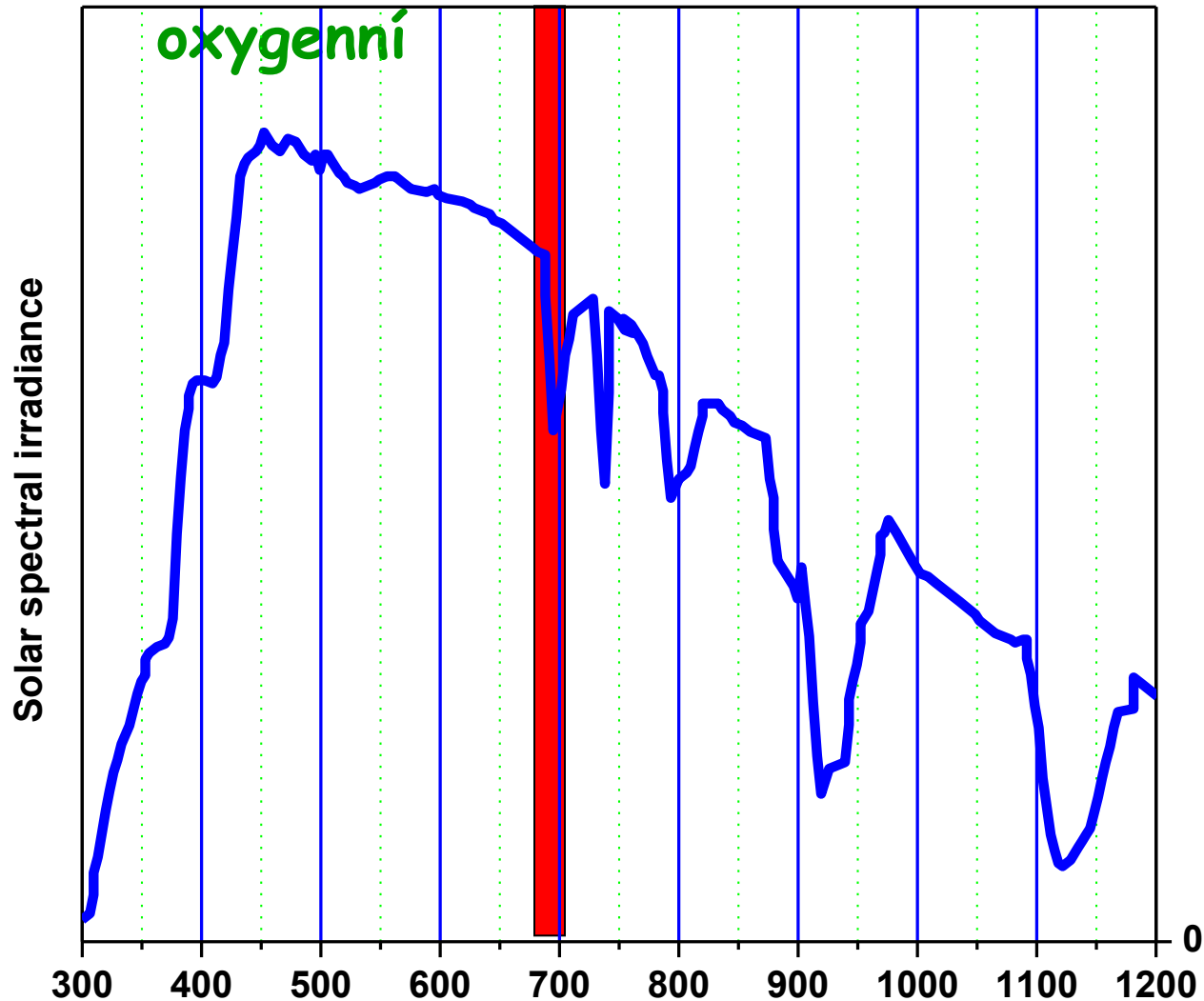
Světlosběrný systém = anténa



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

Spektrum slunečního záření

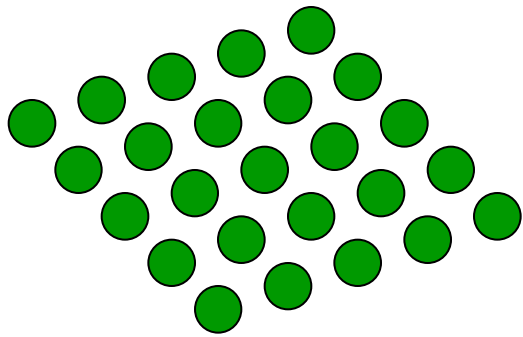
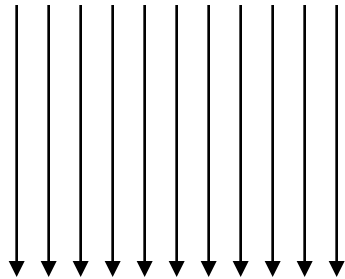
$0.2-2 \text{ mE m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 10^{20}-10^{21} \text{ fotonů m}^{-2} \text{ s}^{-1}$



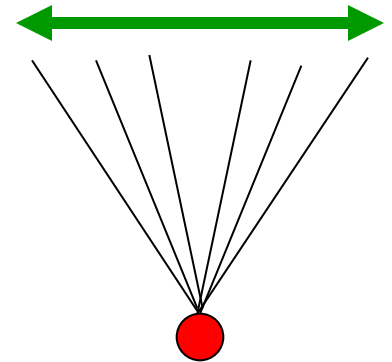
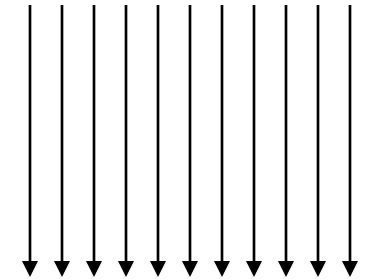
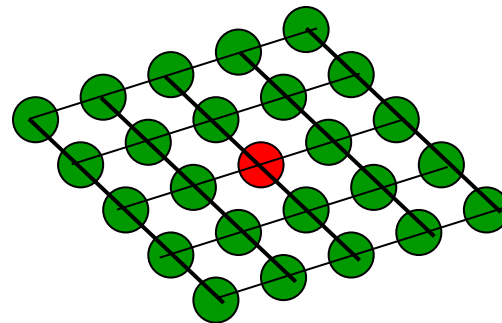
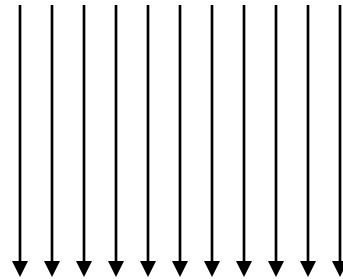
Proč antény?

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

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

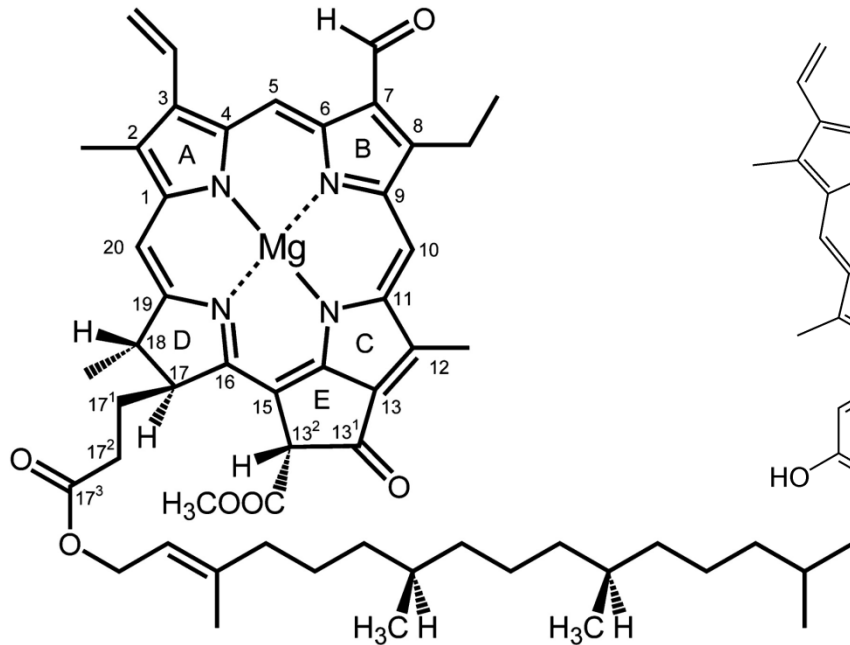


$1-10 \text{ fotonů Chl}^{-1} \text{ s}^{-1}$

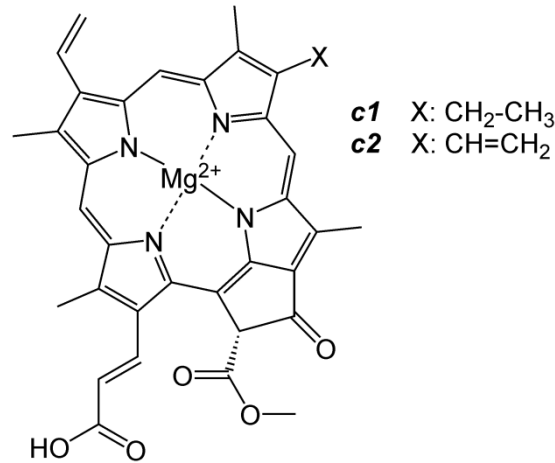


Zvýšení intenzity až 10^2-10^6

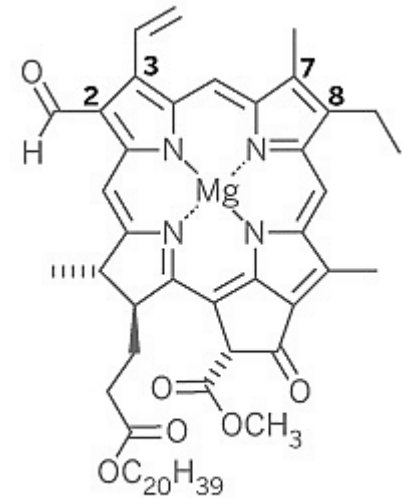
Chlorofyly



Chlorofyl a,b,d



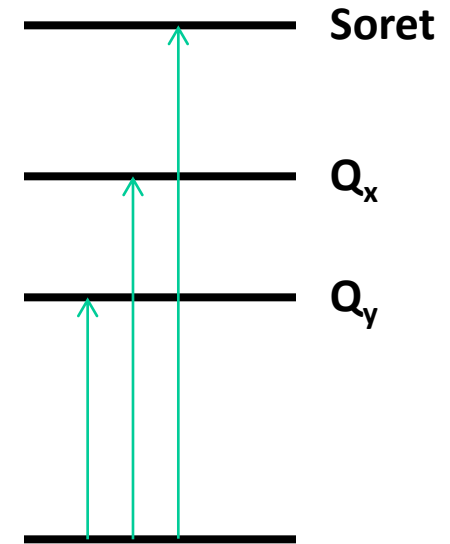
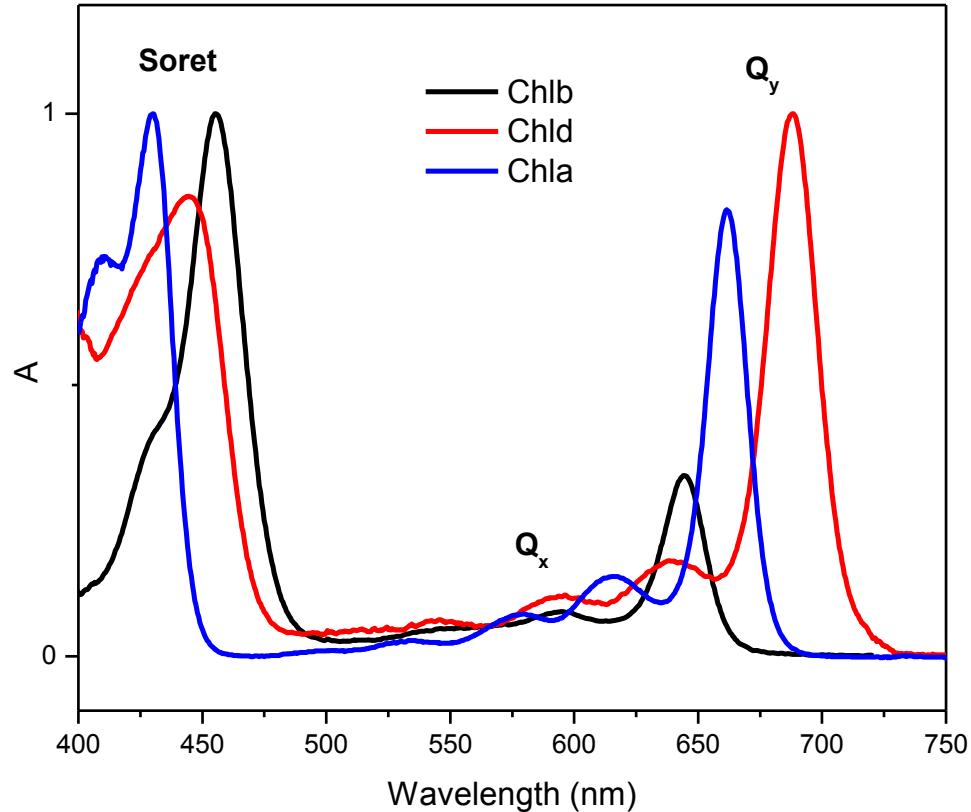
Chlorofyl c



Chlorophyll f

	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Chlorophyll c1	Chlorophyll c2	Chlorophyll d	Chlorophyll f
Molecular formula	C ₅₅ H ₇₂ O ₅ N ₄ Mg	C ₅₅ H ₇₀ O ₆ N ₄ Mg	C ₃₅ H ₃₀ O ₅ N ₄ Mg	C ₃₅ H ₂₈ O ₅ N ₄ Mg	C ₅₄ H ₇₀ O ₆ N ₄ Mg	C ₅₅ H ₇₀ O ₆ N ₄ Mg
C2 group	-CH ₃	-CH ₃	-CH ₃	-CH ₃	-CH ₃	-CHO
C3 group	-CH=CH ₂	-CH=CH ₂	-CH=CH ₂	-CH=CH ₂	-CHO	-CH=CH ₂
C7 group	-CH ₃	-CHO	-CH ₃	-CH ₃	-CH ₃	-CH ₃
C8 group	-CH ₂ CH ₃	-CH ₂ CH ₃	-CH ₂ CH ₃	-CH=CH ₂	-CH ₂ CH ₃	-CH ₂ CH ₃
C17 group	-CH ₂ CH ₂ COO-Phytyl	-CH ₂ CH ₂ COO-Phytyl	-CH=CHCOOH	-CH=CHCOOH	-CH ₂ CH ₂ COO-Phytyl	-CH ₂ CH ₂ COO-Phytyl
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

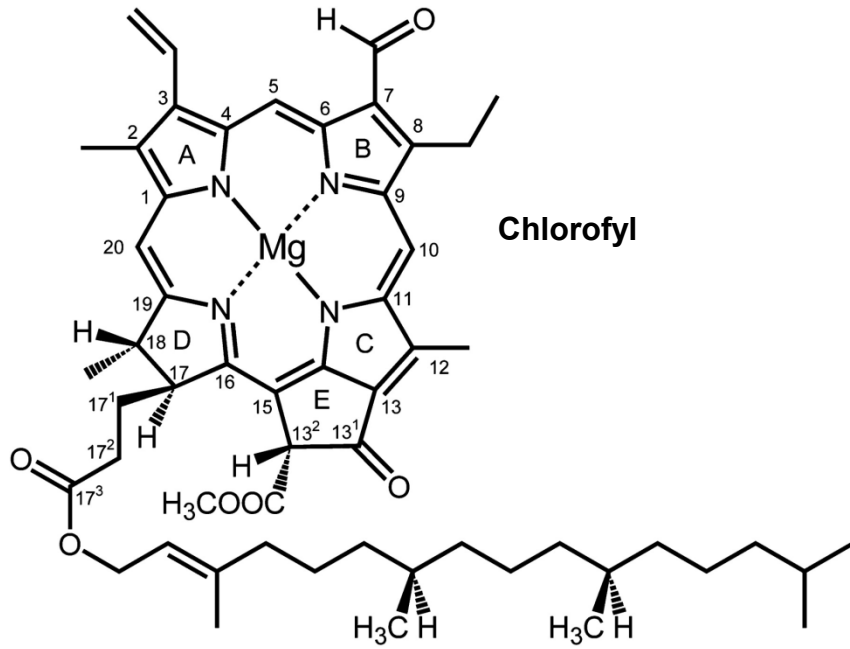
Spektroskopie chlorofylů



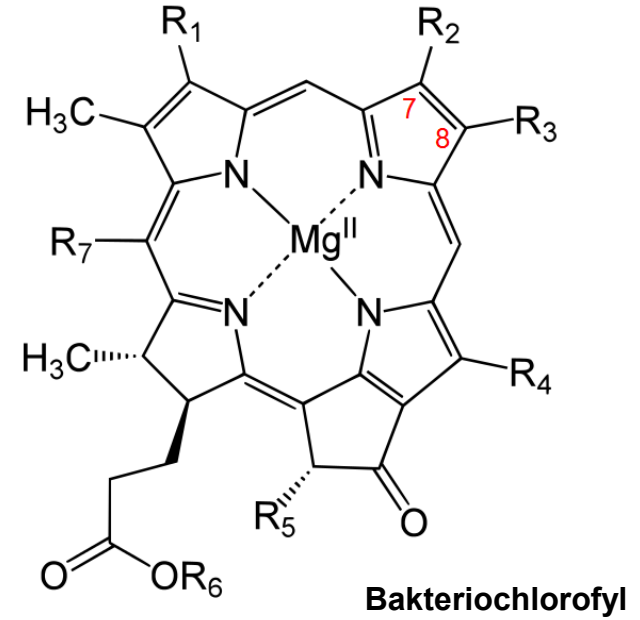
Intenzita absorpčních pásů je dána dipólovým momentem přechodu

Polohy absorpčních pásů dány interakcí s prostředím

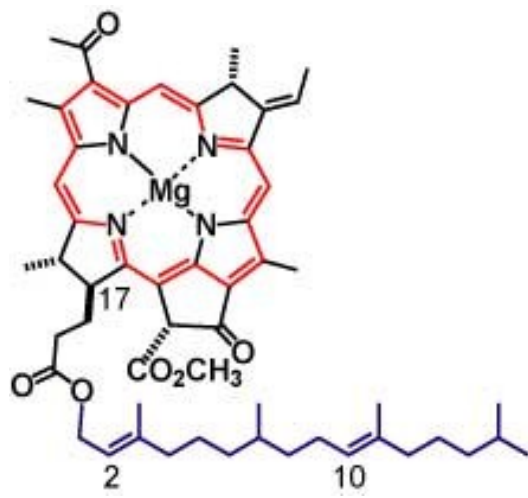
Bakteriochlorofyly



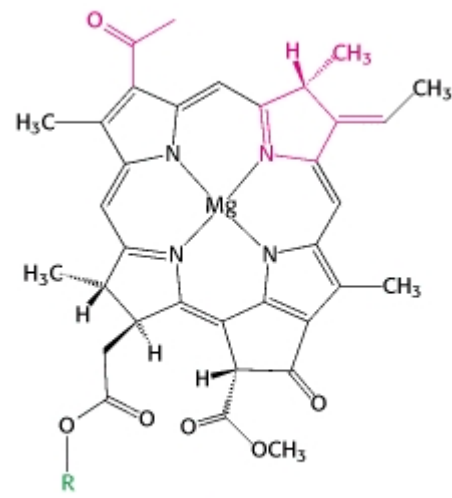
Chlorofyl



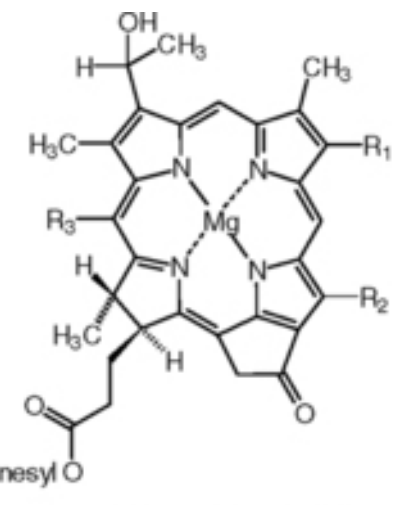
Bakteriochlorofyl



Bakteriochlorofyl - a

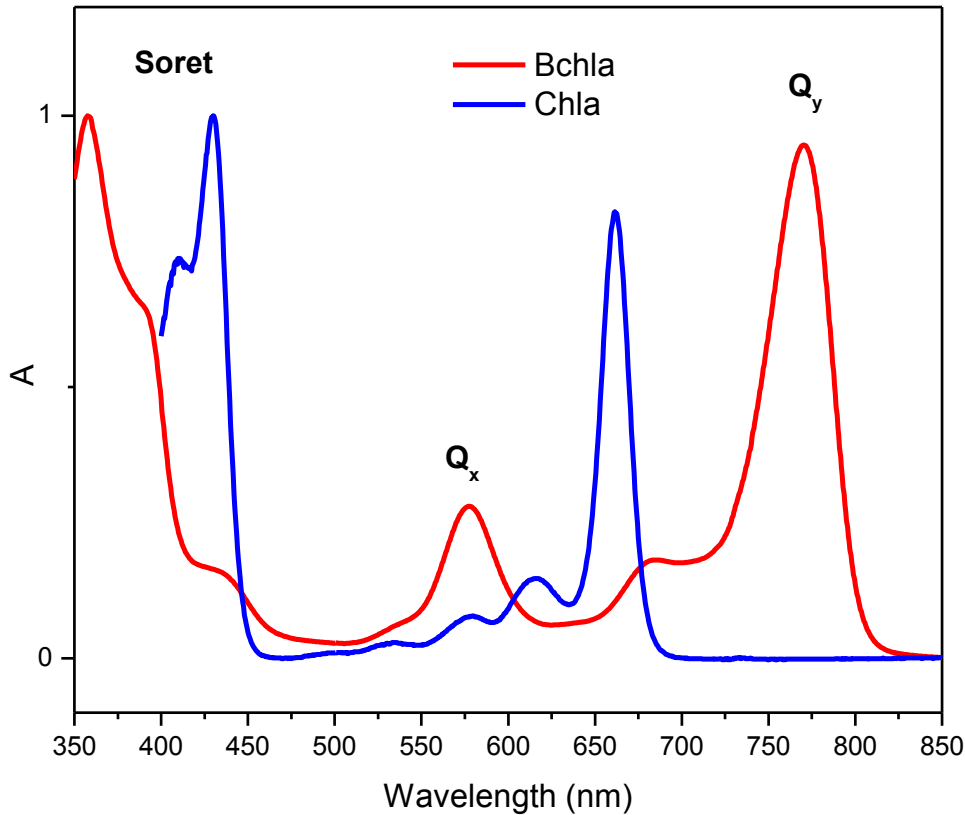


Bakteriochlorofyll b (BChl-b)



bakteriochlorofyll c, d, e core structure

Spektroskopie bakteriochlorofylů

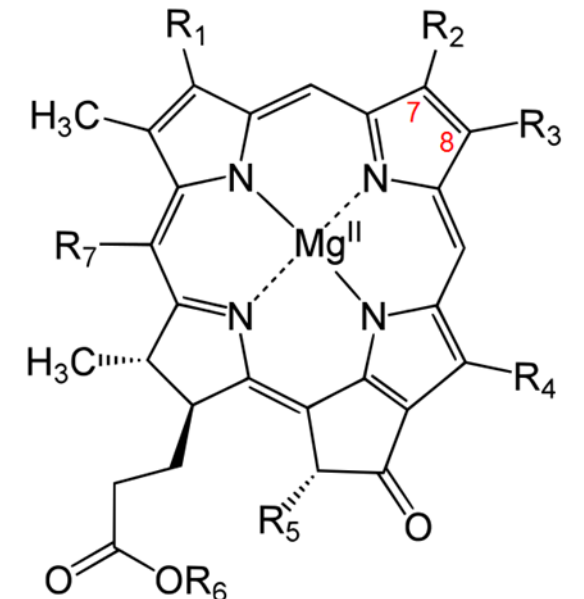


	Q _y	Soret
BChl-a	770	365
BChl-b	795	375
BChl-c	665	435
BChl-d	655	425
BChl-e	655	470
BChl-g	765	365

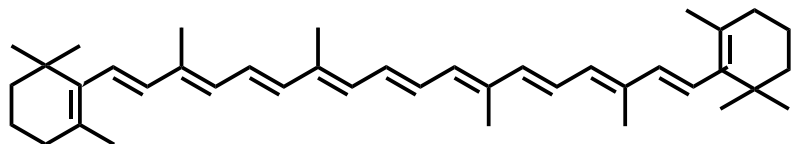
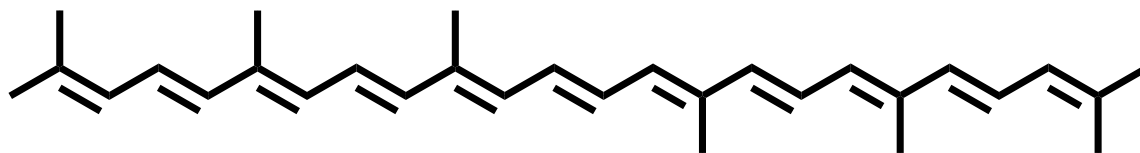
Dvě skupiny:

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

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



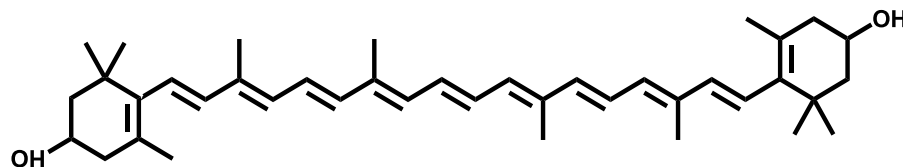
Karotenoidy



β -carotene

Izolován v roce 1831

Karoteny (uhlovodíky)



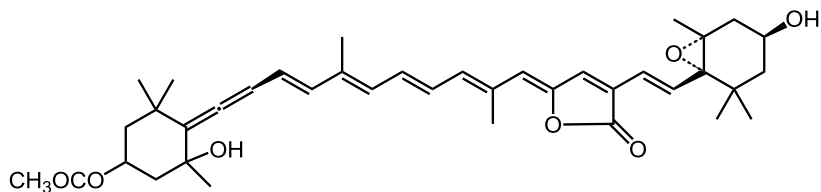
Zeaxanthin

Izolován v roce 1837

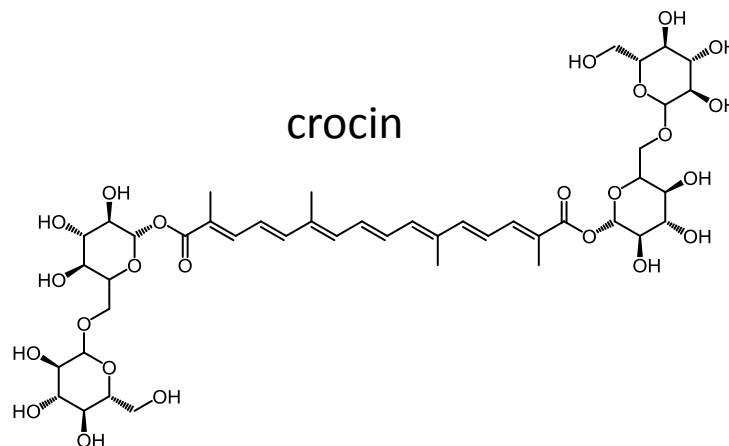
Xantofyly (obsahují kyslík)

Značná variabilita, dosud popsáno přibližně 1000 různých karotenoidů

peridinin



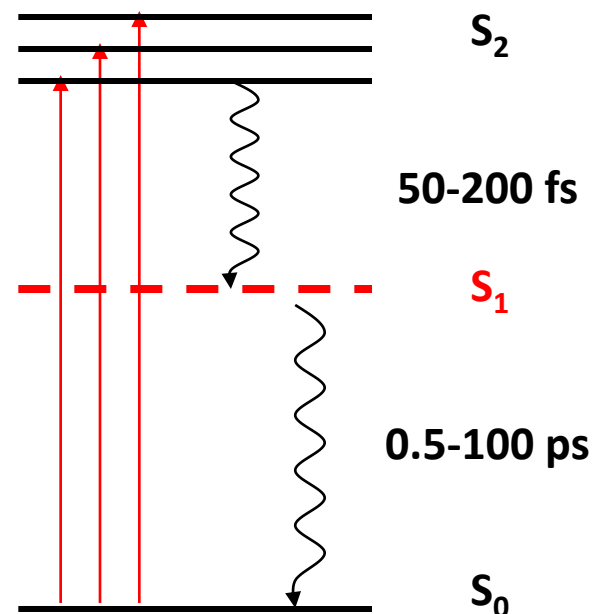
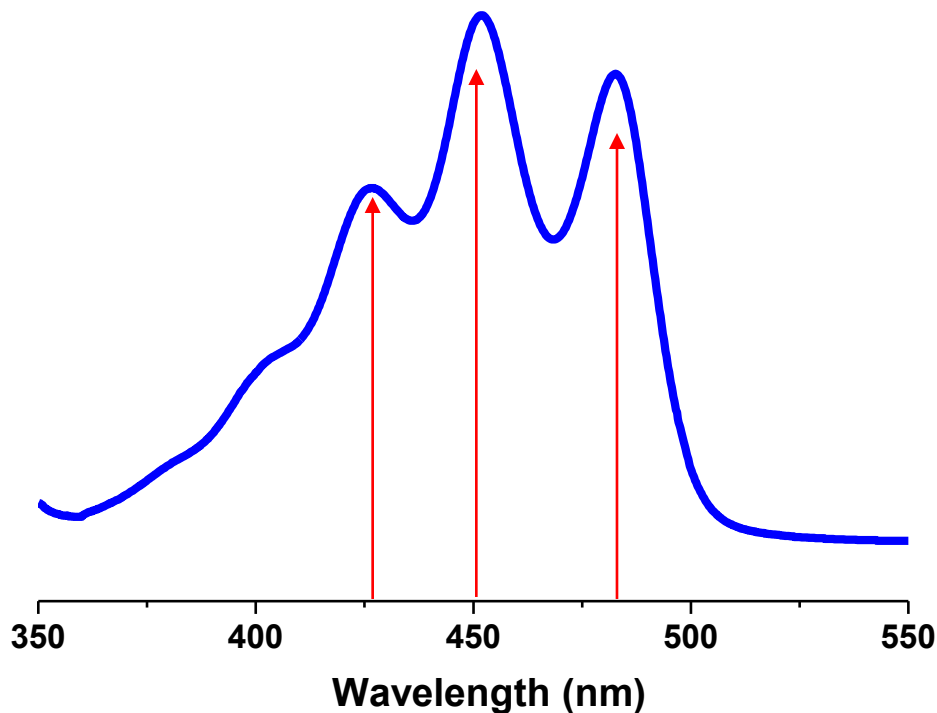
crocin



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

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

Spektroskopie karotenoidů

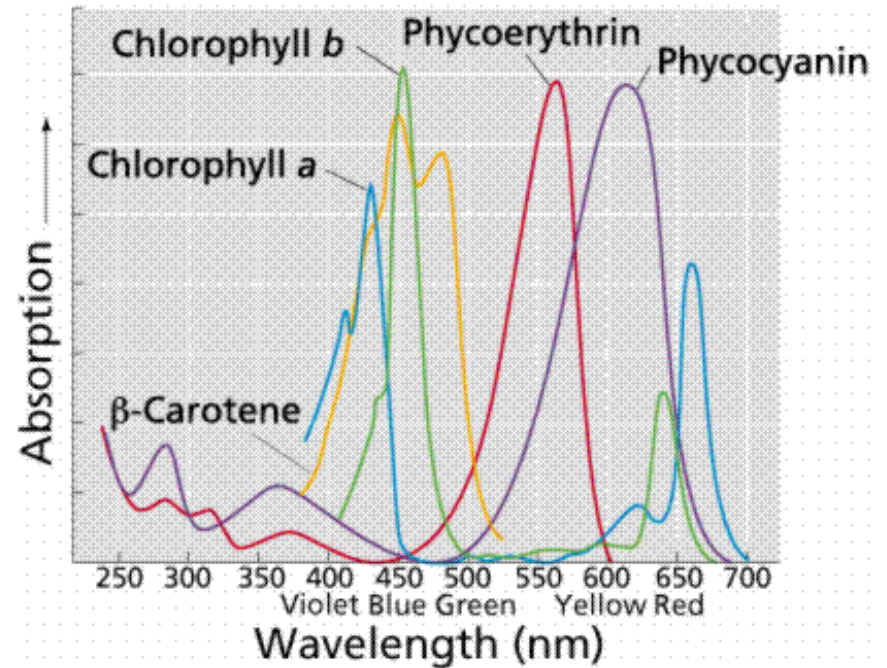
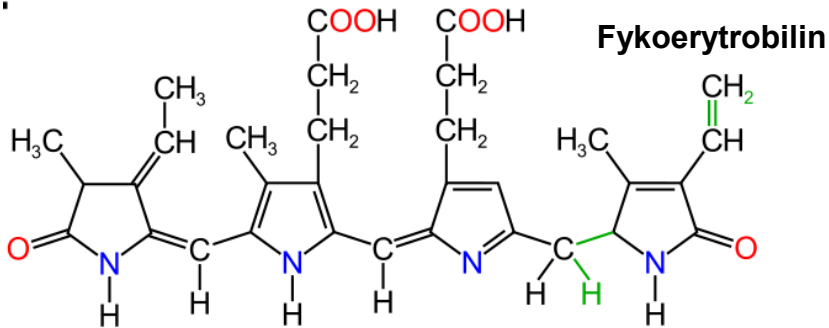
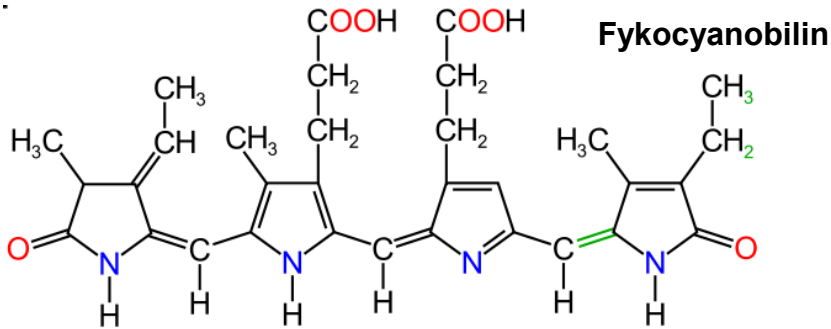


Přírodní barviva, silně absorbují v modro-zelené oblasti spektra

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.

Fykobiliny



Fykobiliny jsou pigmenty specifických proteinů, fykobiliproteinů, které tvoří anténní komplexy sinic - fykobilisomy

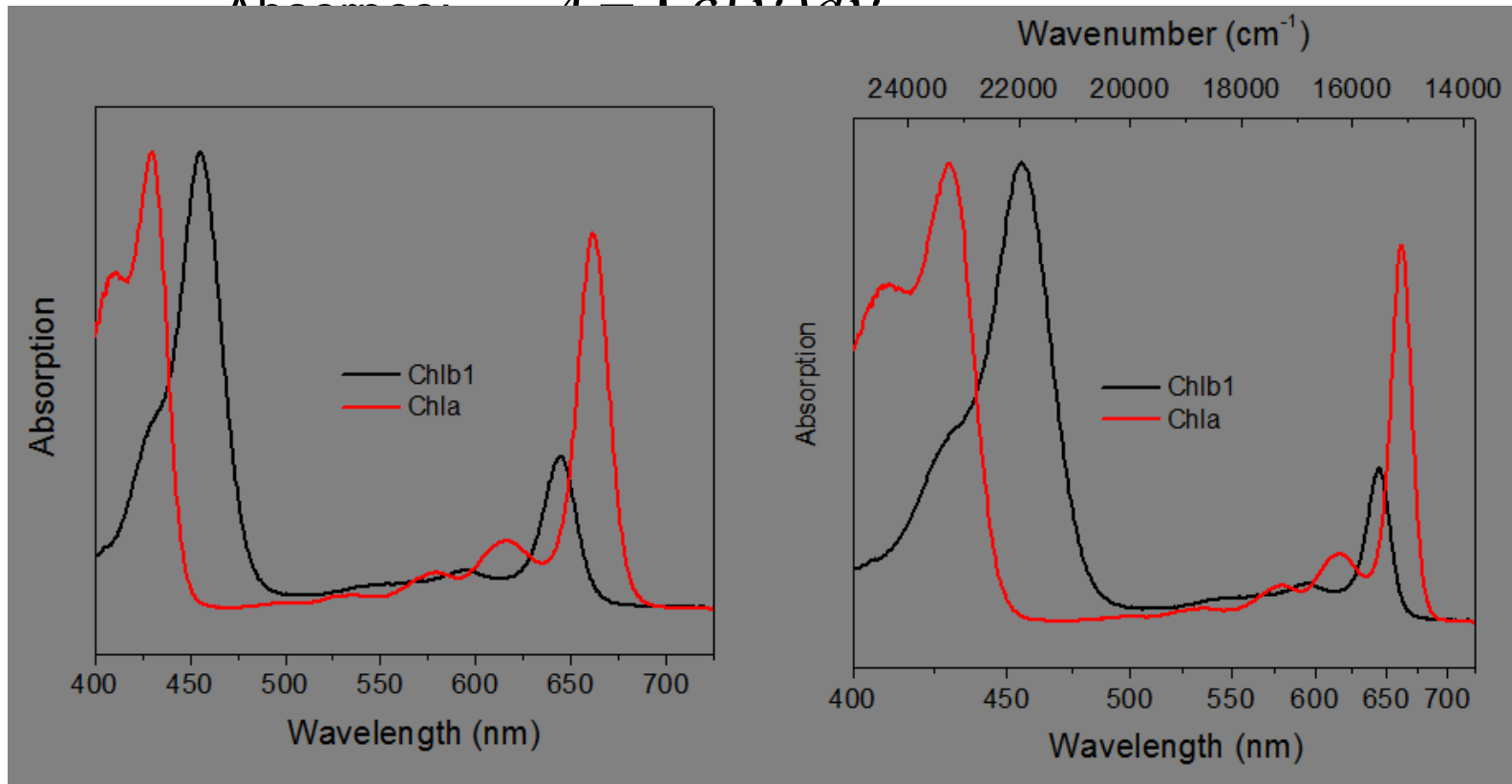
Absorbují zejména v oblasti 500-650 nm, tj. v oblasti kde chlorofyly ani karotenoidy neabsorbují

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, ε – extinkční koeficient

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



Absorpce, síla oscilátoru a dipólový moment přechodu

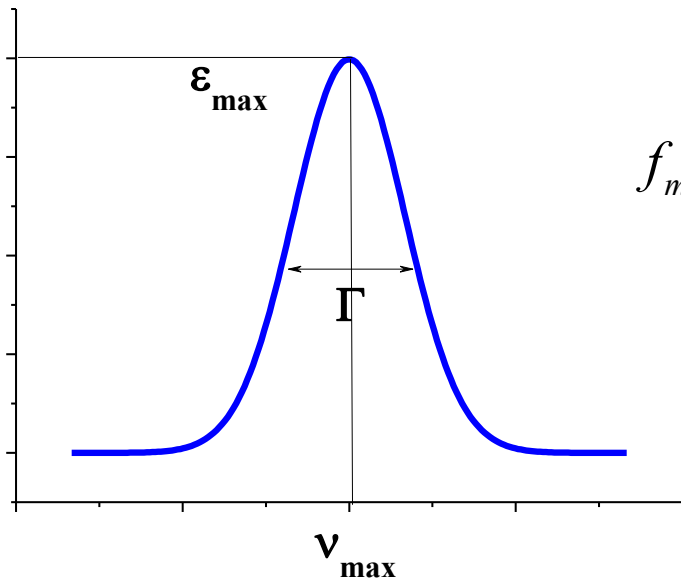
Síla oscilátoru přechodu m-n:
$$f_{mn} = \frac{4\varepsilon_0 m_e c^2 \ln 10}{N_A e^2} \cdot A = 4.319 \times 10^{-9} \text{ M.cm}^2 A$$

Pro Gaussovský absorpční pás pološířky Γ s extinkčním koeficientem v maximu ε_{\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:

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

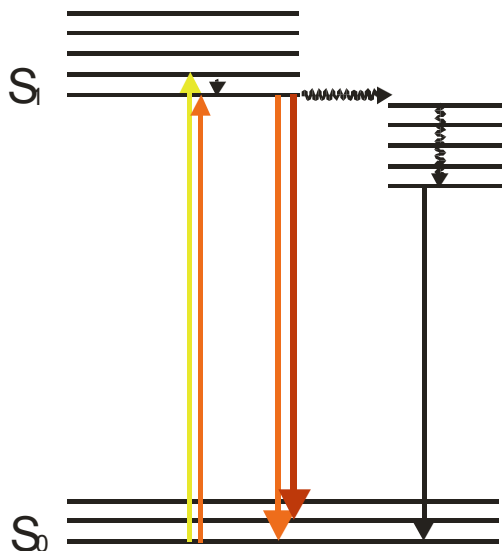


Užitečný vztah
(výpočet dipólového momentu z absorpčního spektra)

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

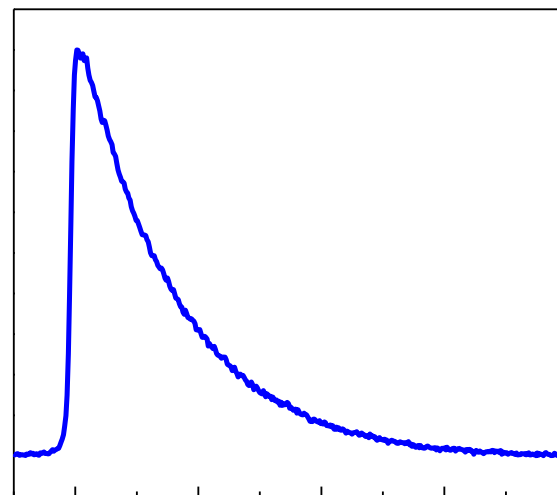
Jednotky: μ – Debye, ε_{\max} – $\text{M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, Γ, ν_{\max} – cm^{-1}

Doby života excitovaných stavů



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

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

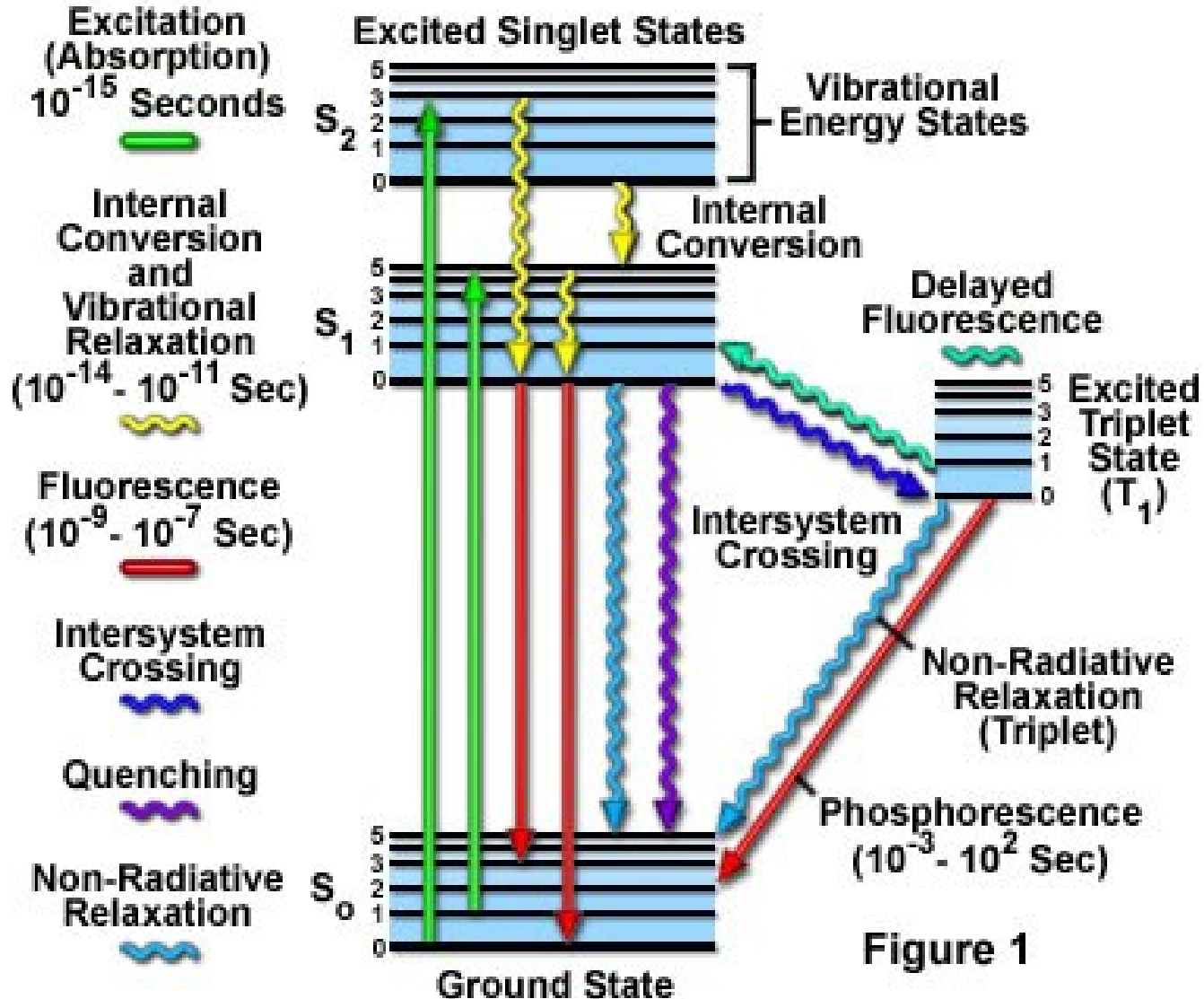


Time

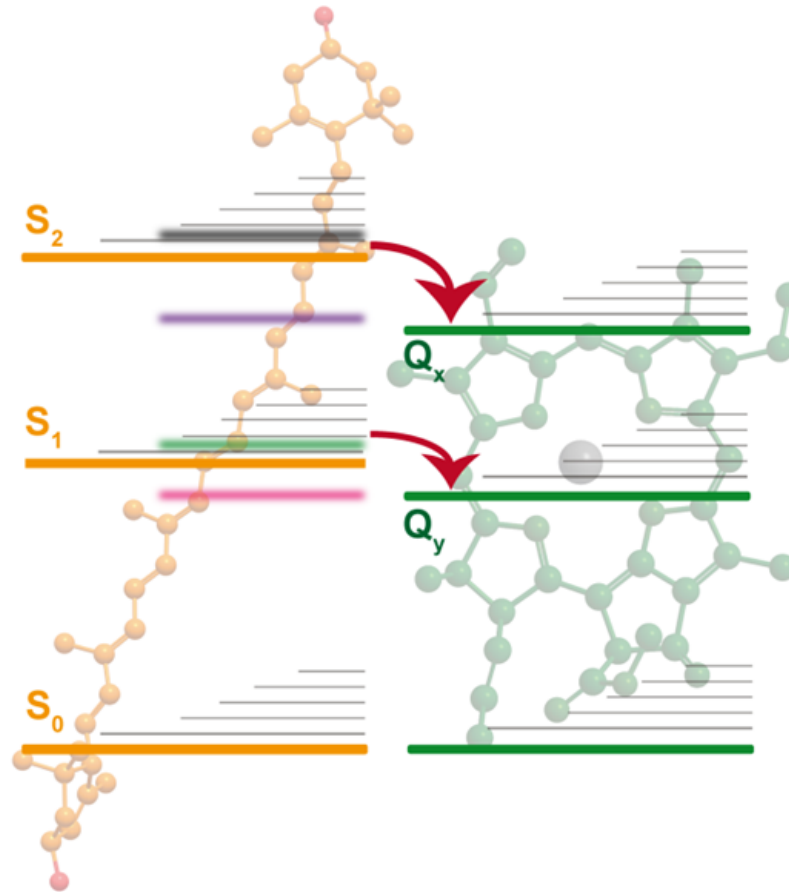
Transition	Process	Rate Constant	Timescale (Seconds)
$S(0) \Rightarrow S(1)$ or $S(n)$	Absorption (Excitation)	Instantaneous	10^{-15}
$S(n) \Rightarrow S(1)$	Internal Conversion	$k(\text{ic})$	10^{-14} to 10^{-10}
$S(1) \Rightarrow S(1)$	Vibrational Relaxation	$k(\text{vr})$	10^{-12} to 10^{-10}
$S(1) \Rightarrow S(0)$	Fluorescence	$k(\text{f})$ or Γ	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

Souhrn

Jablonski Energy Diagram



Přenos energie



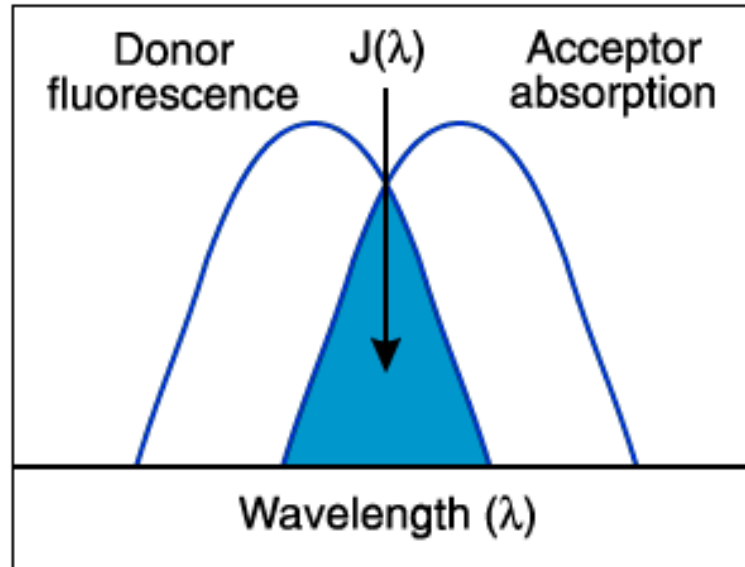
Excitovaný stav určitého pigmentu (donor) předá energii jinému pigmentu (akceptor)

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)



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

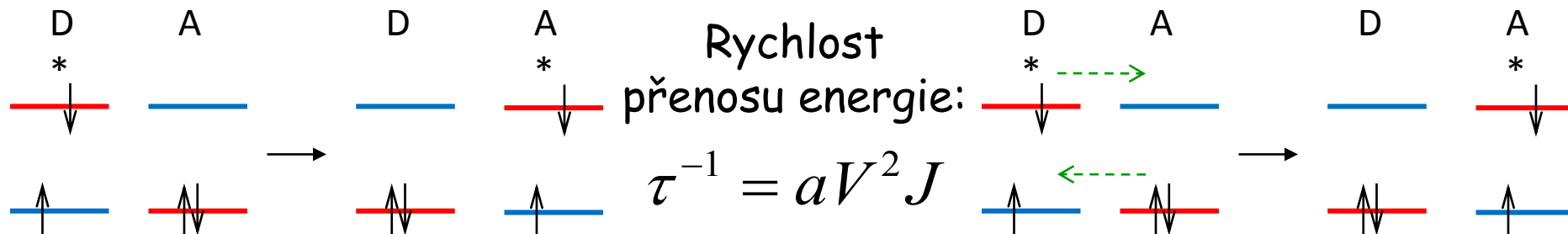
Förster

Dipólová (Coulombická) interakce

Mechanismy přenosu energie

Dexter

Výměna elektronů



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

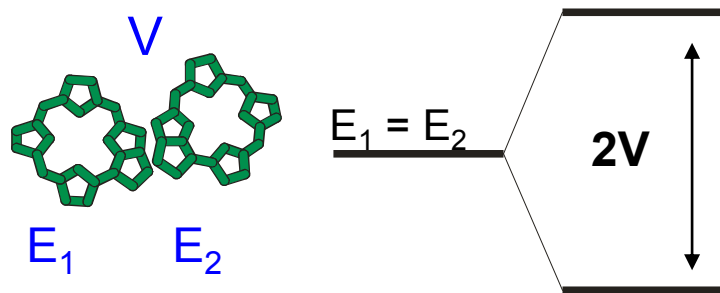
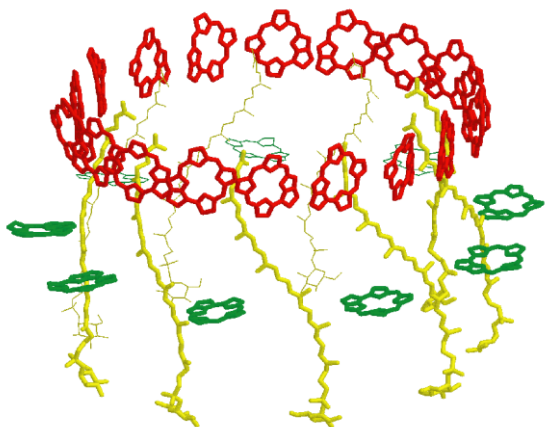
Střední vzdálenosti (10-100 Å)
 Střední velikosti dipólů
 Beze změny spinu

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

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

Malé vzdálenosti (<10 Å)
 Malé dipóly
 Změna spinu

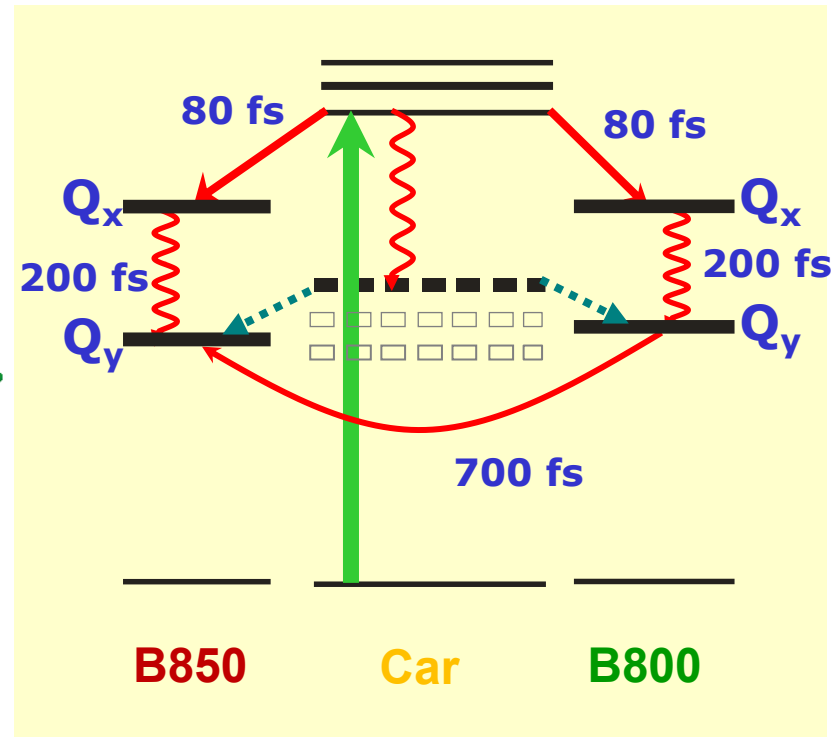
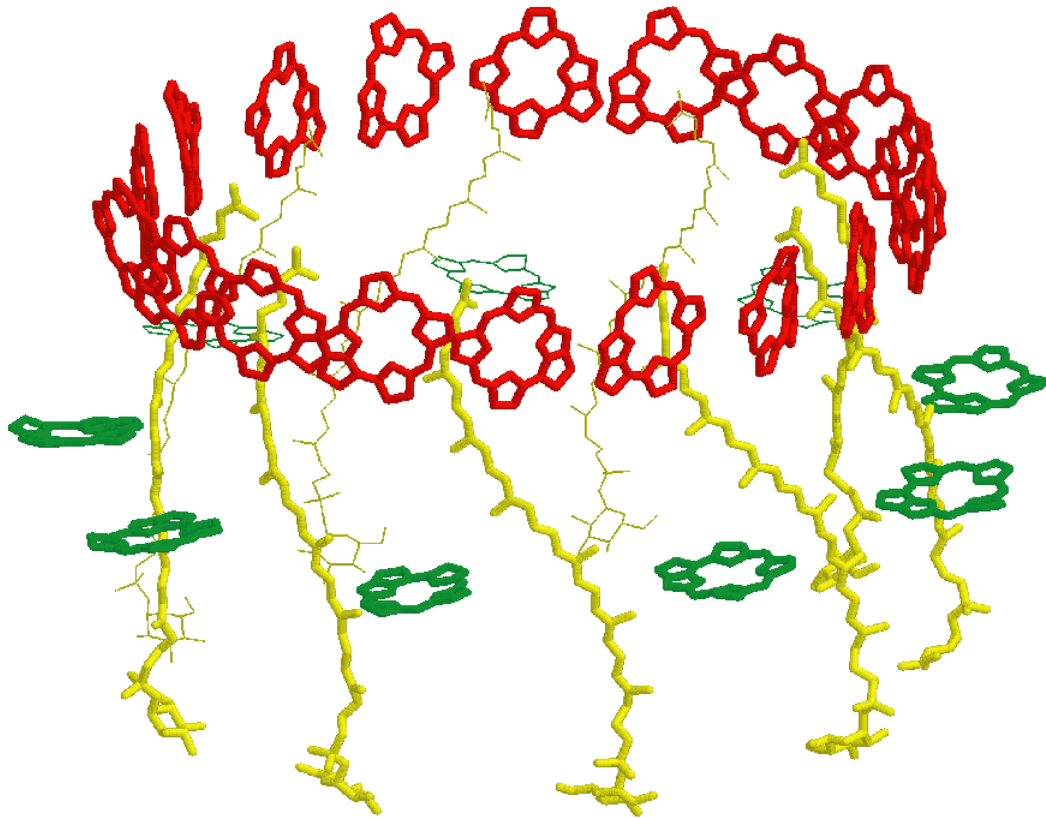
Excitonová interakce:



Malé vzdálenosti, Velké dipóly

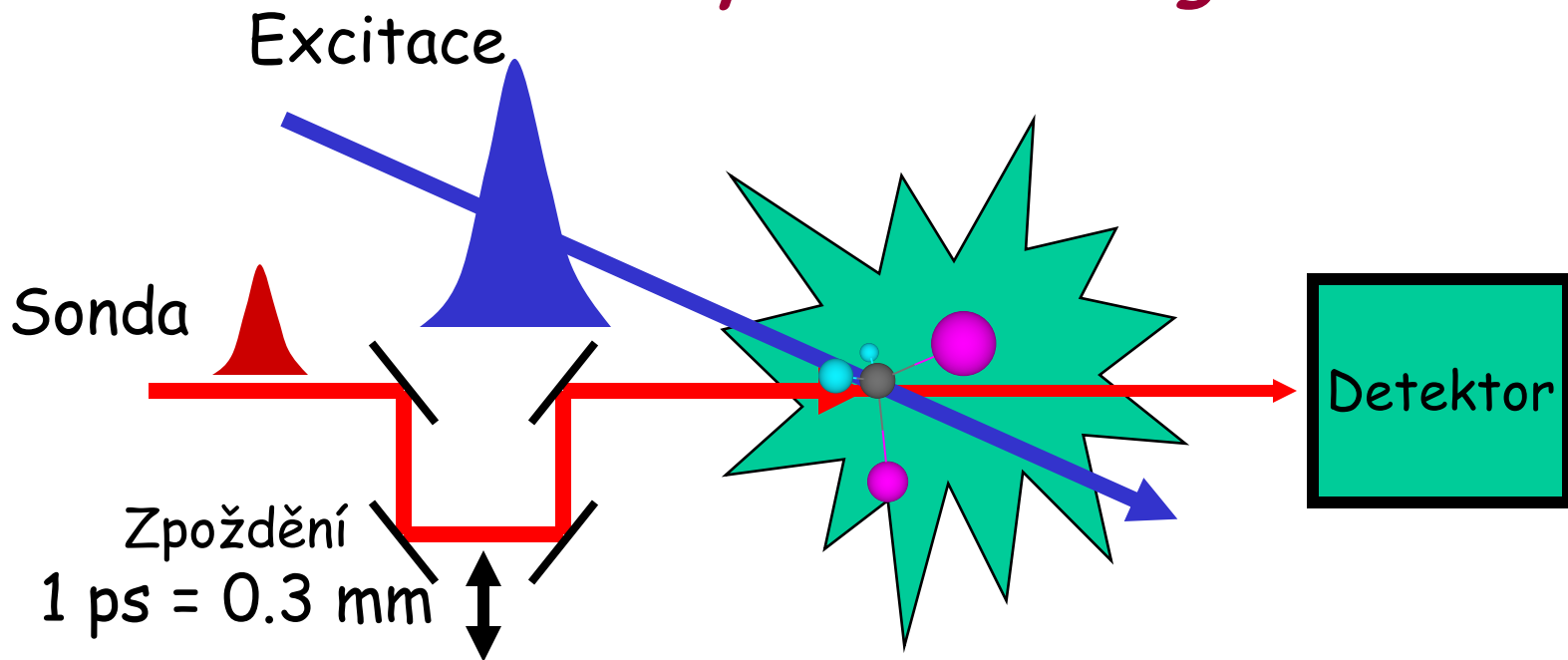
Už nelze mluvit o donoru a akceptoru, díky excitonové interakci se chovají jako jedna molekula

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 \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

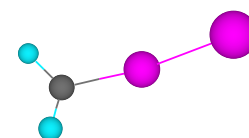
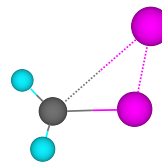
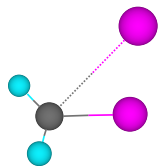
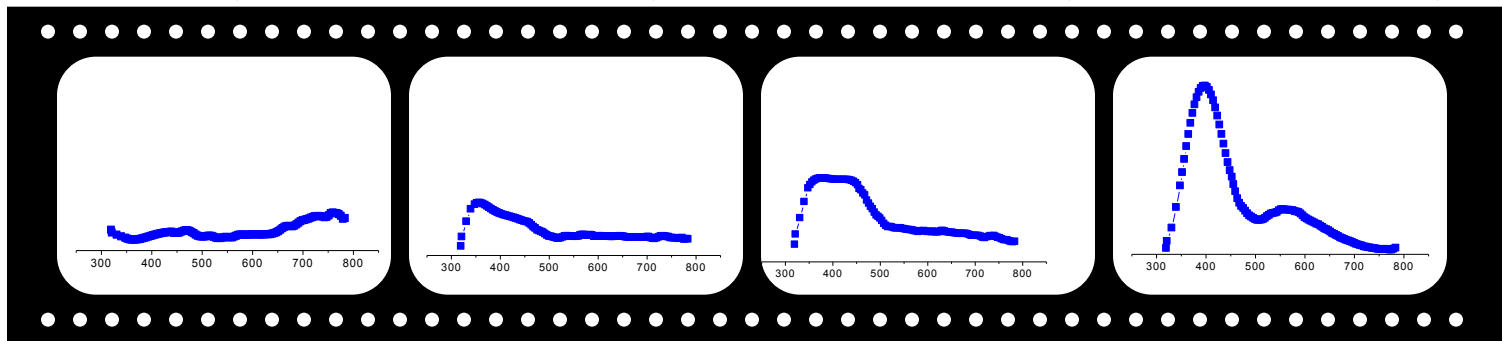


0 fs

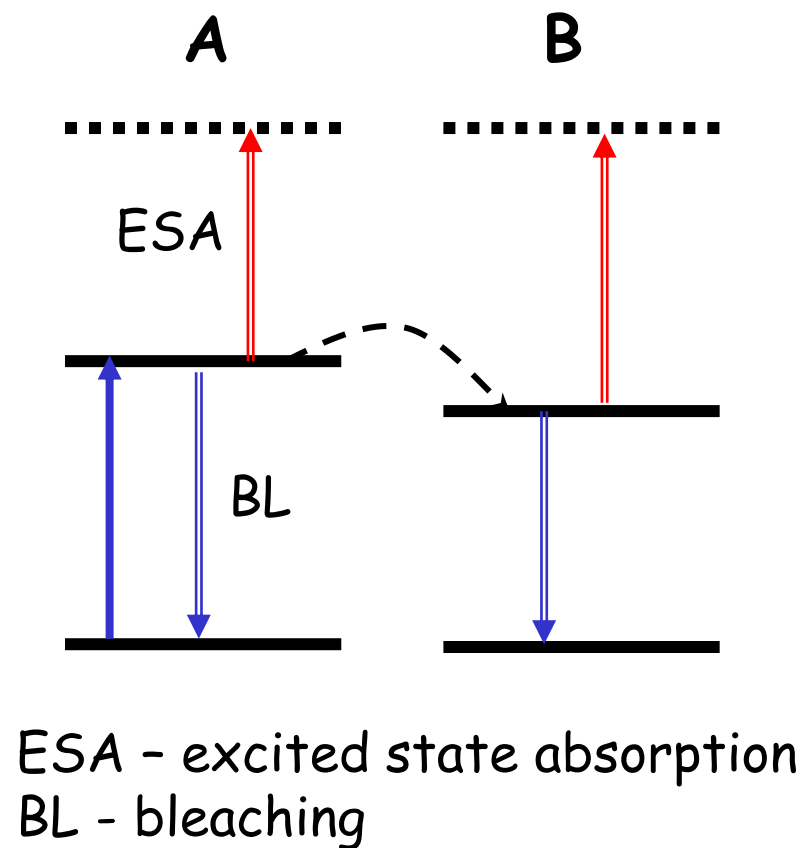
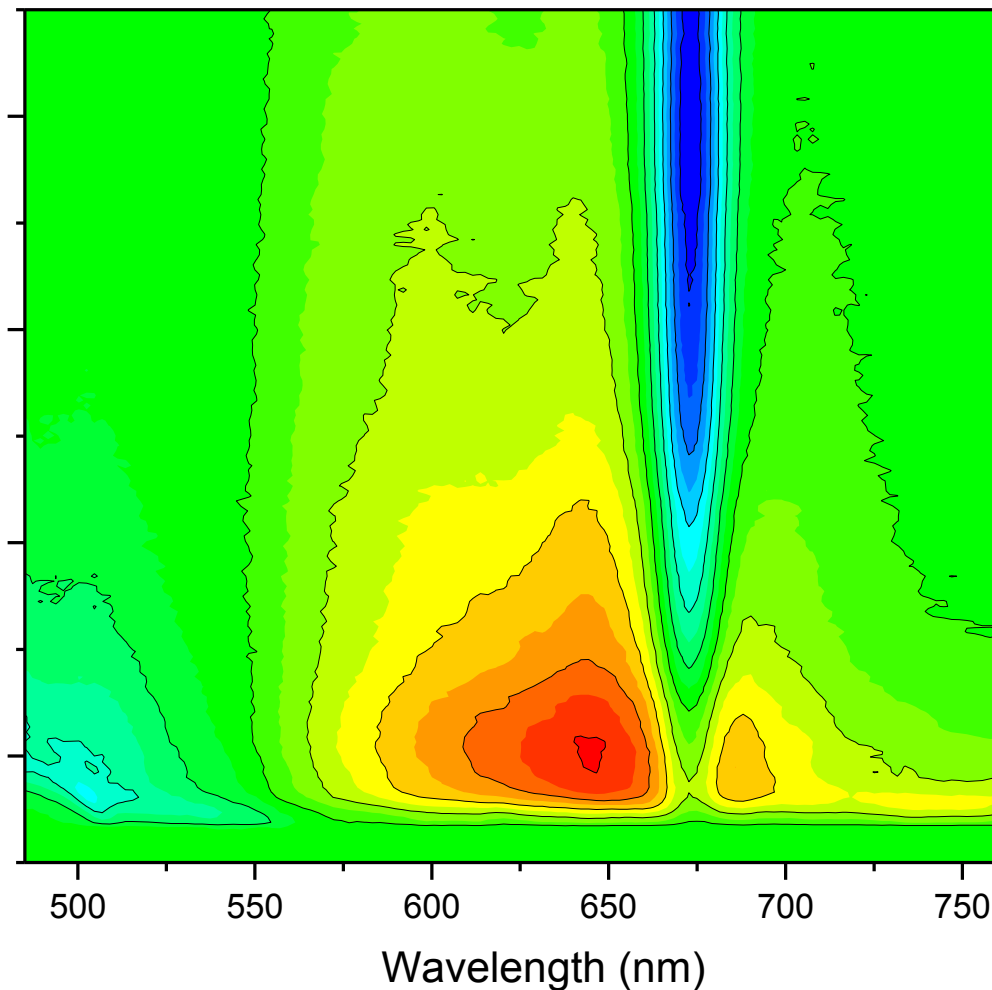
500 fs

3 000 fs

50 000 fs



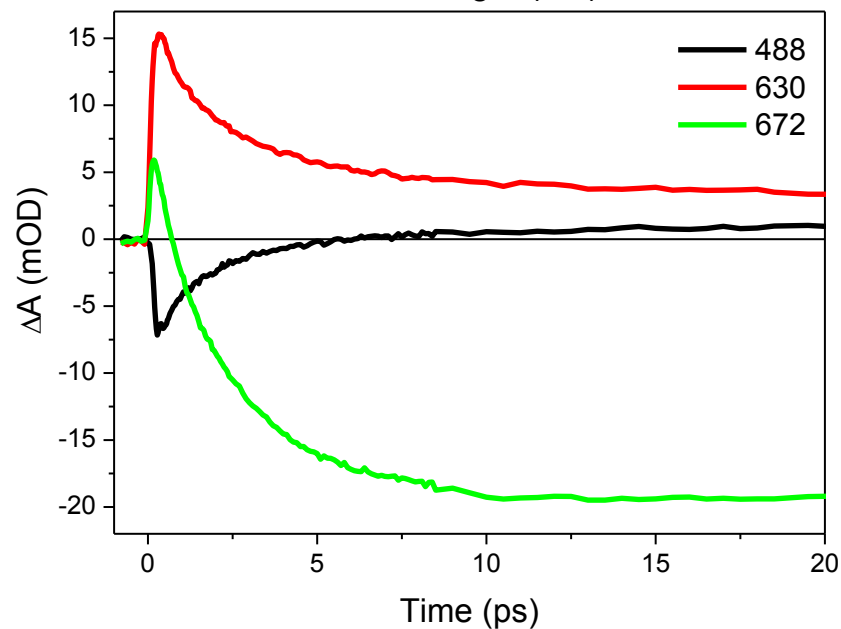
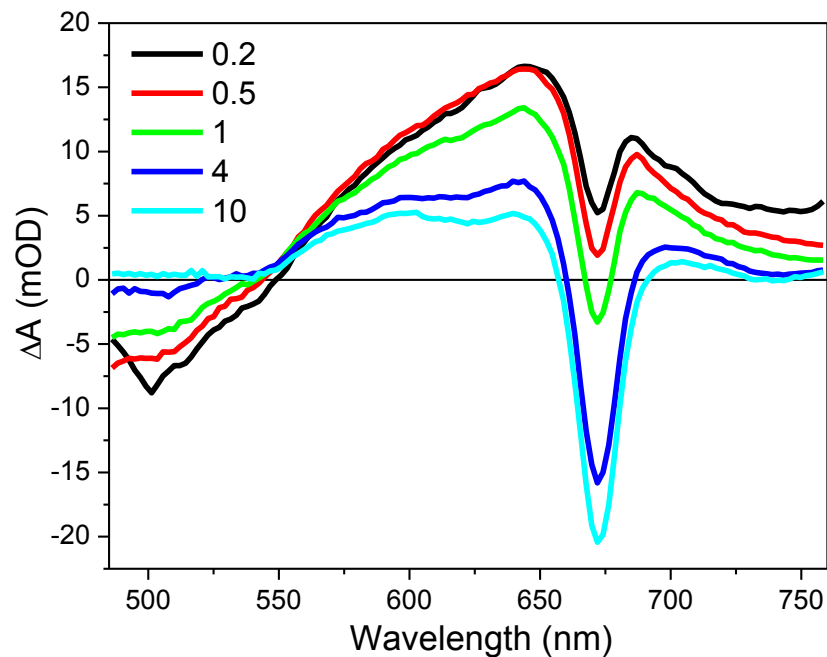
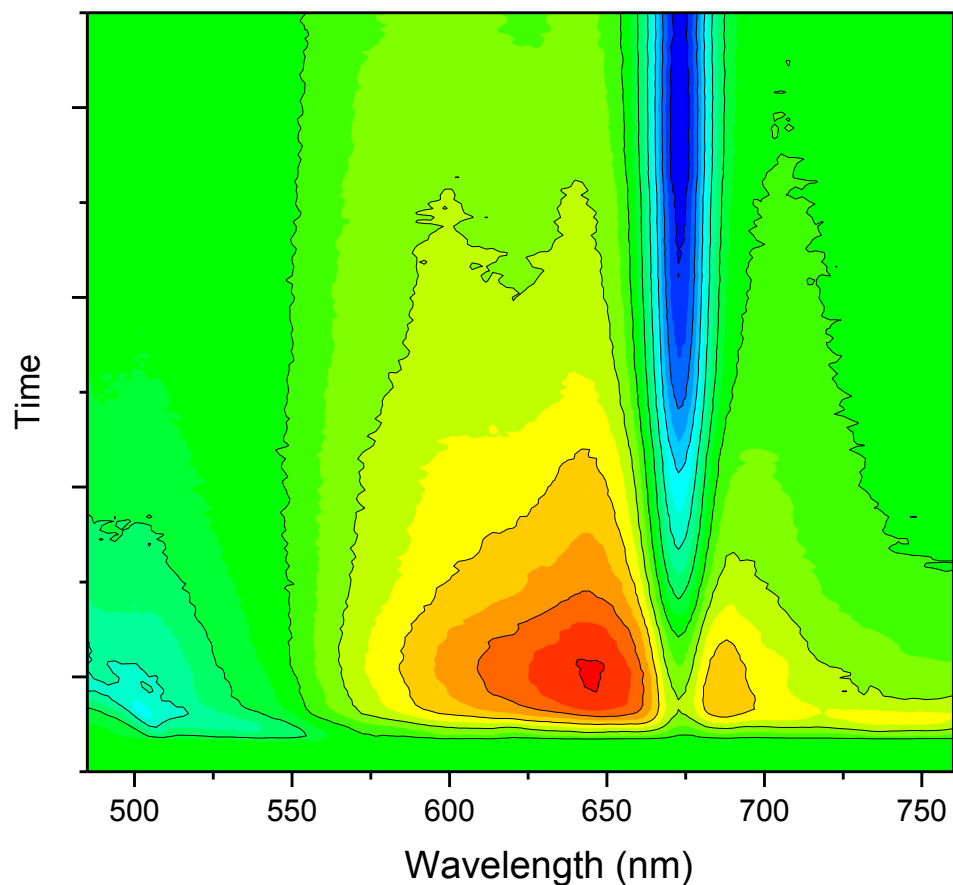
Měření přenosu energie



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

Časová škála: 50 fs až 1 ns

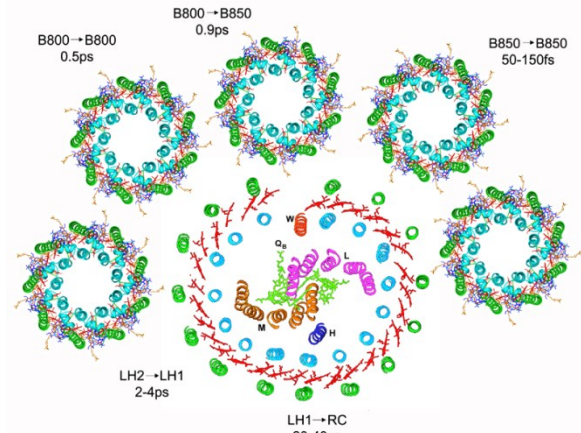
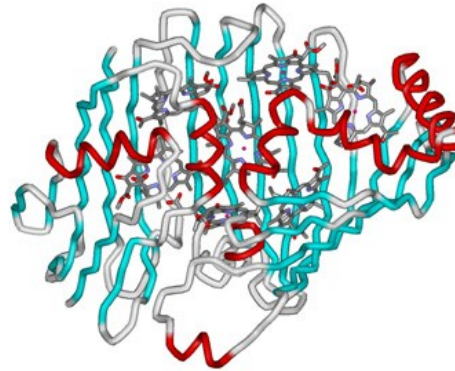
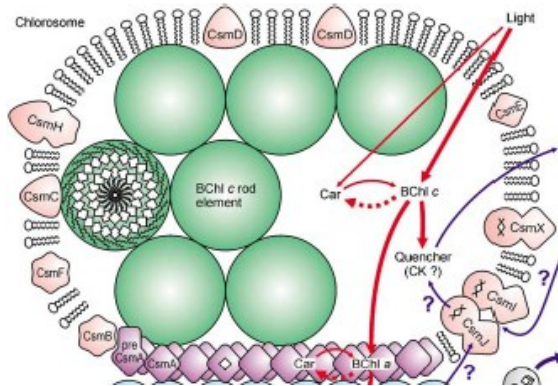
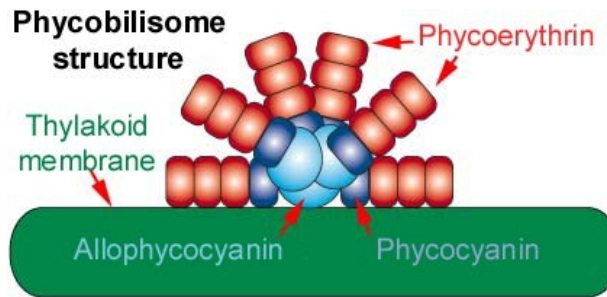
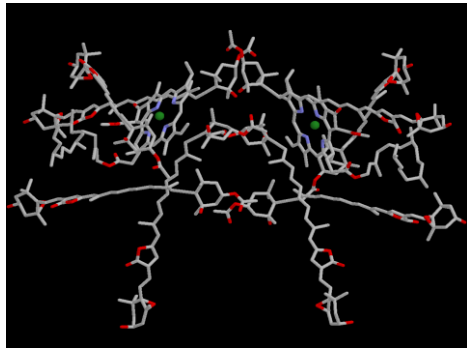
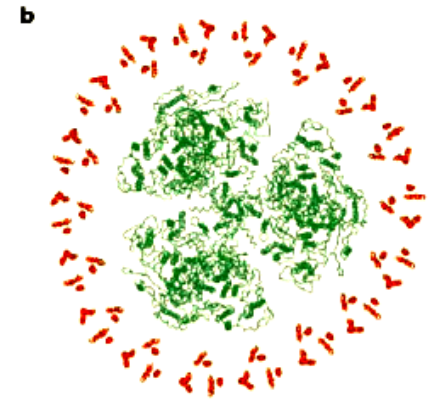
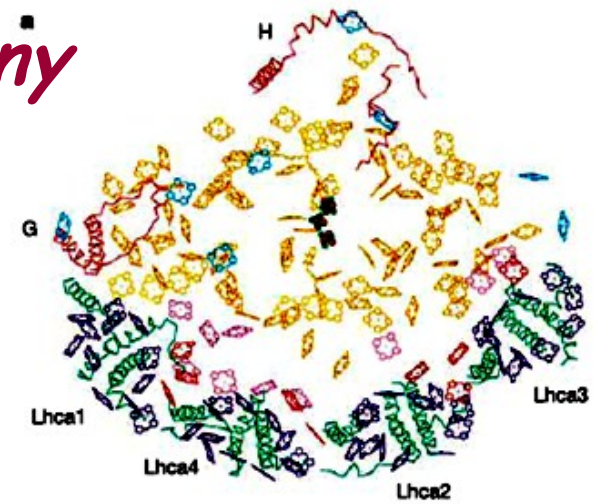
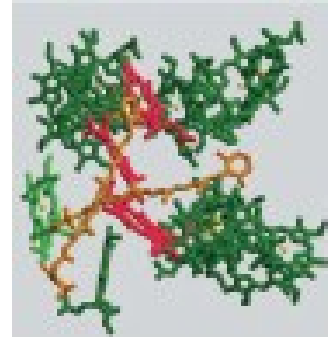
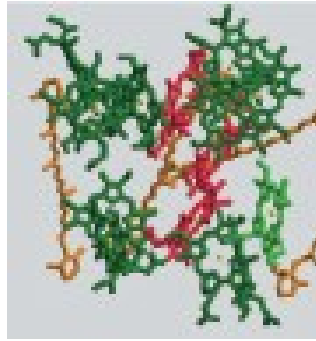
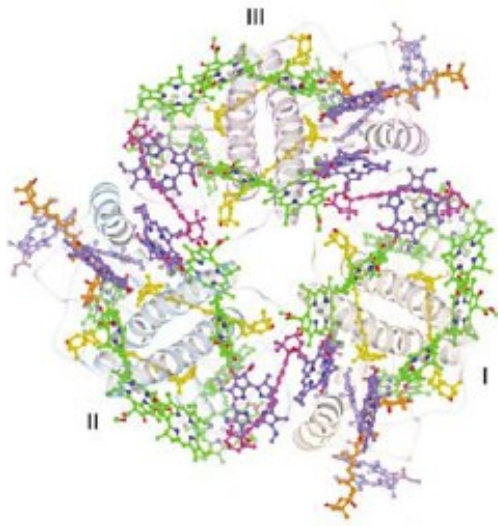
Měření přenosu energie



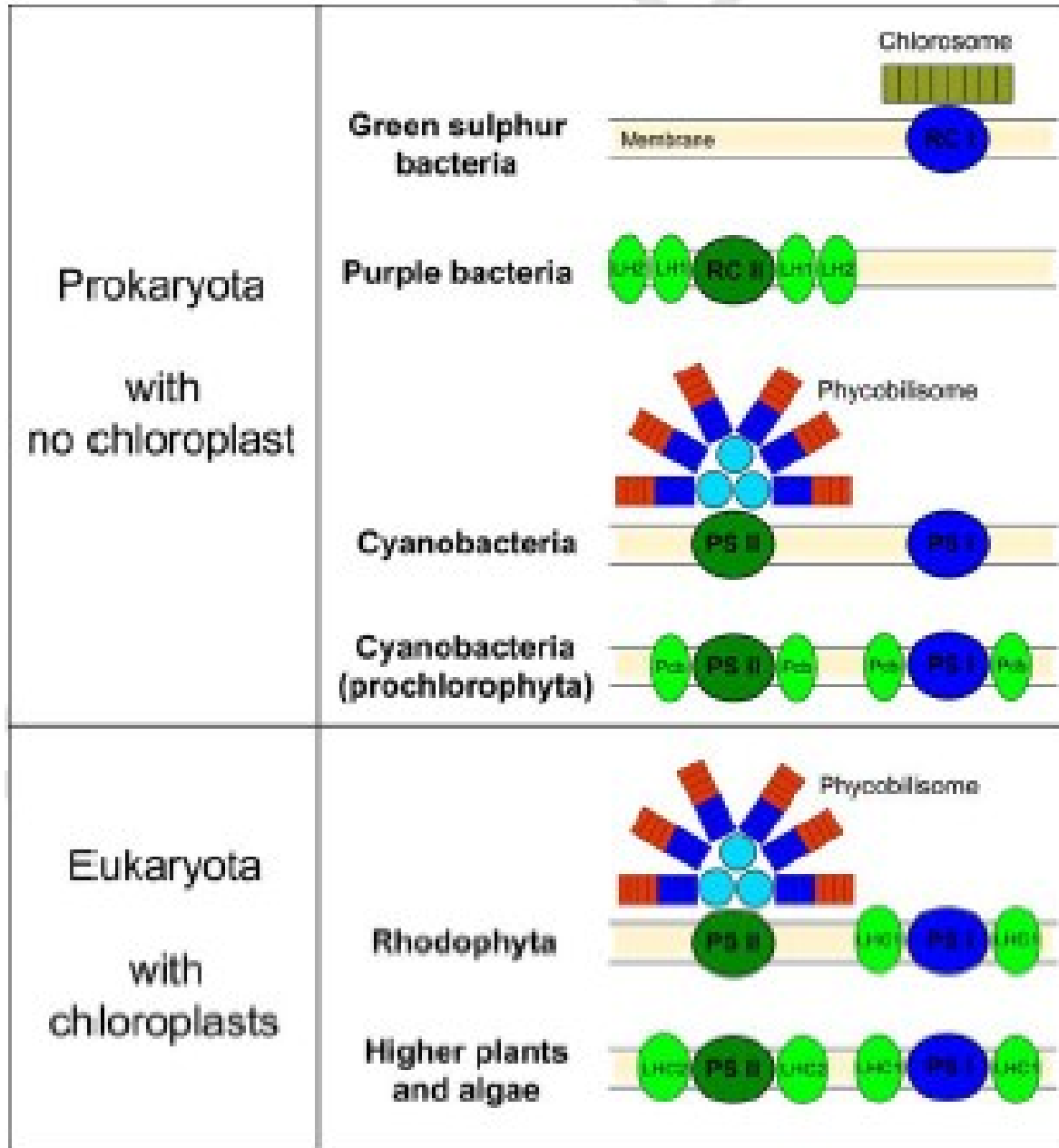
Global fitting

Simultánní fitování kinetik na všech měřených vlnových délkách

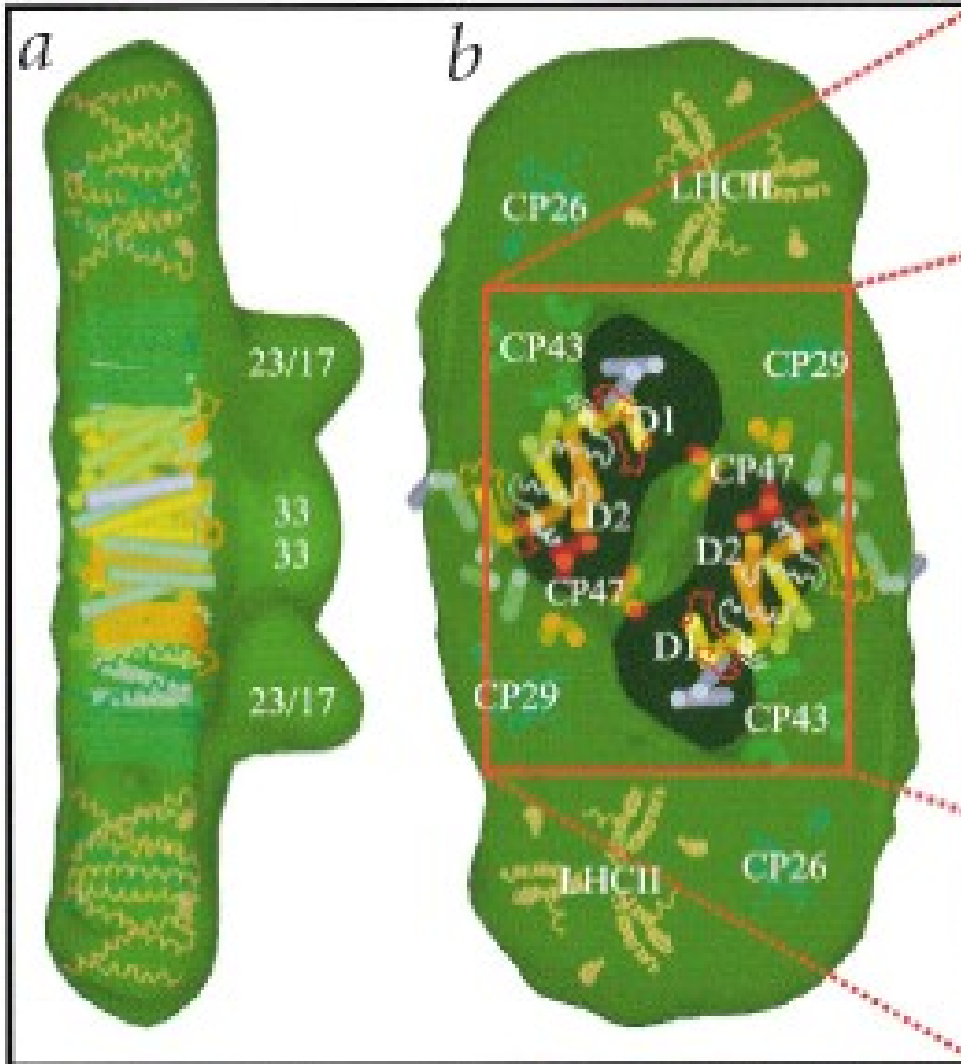
Fotosyntetické antény



Taxonomie antén



Anténní systém fotosystému II



Nield et al. Nature 2000

Anténní pigmenty/RC:

99 Chlorofylů

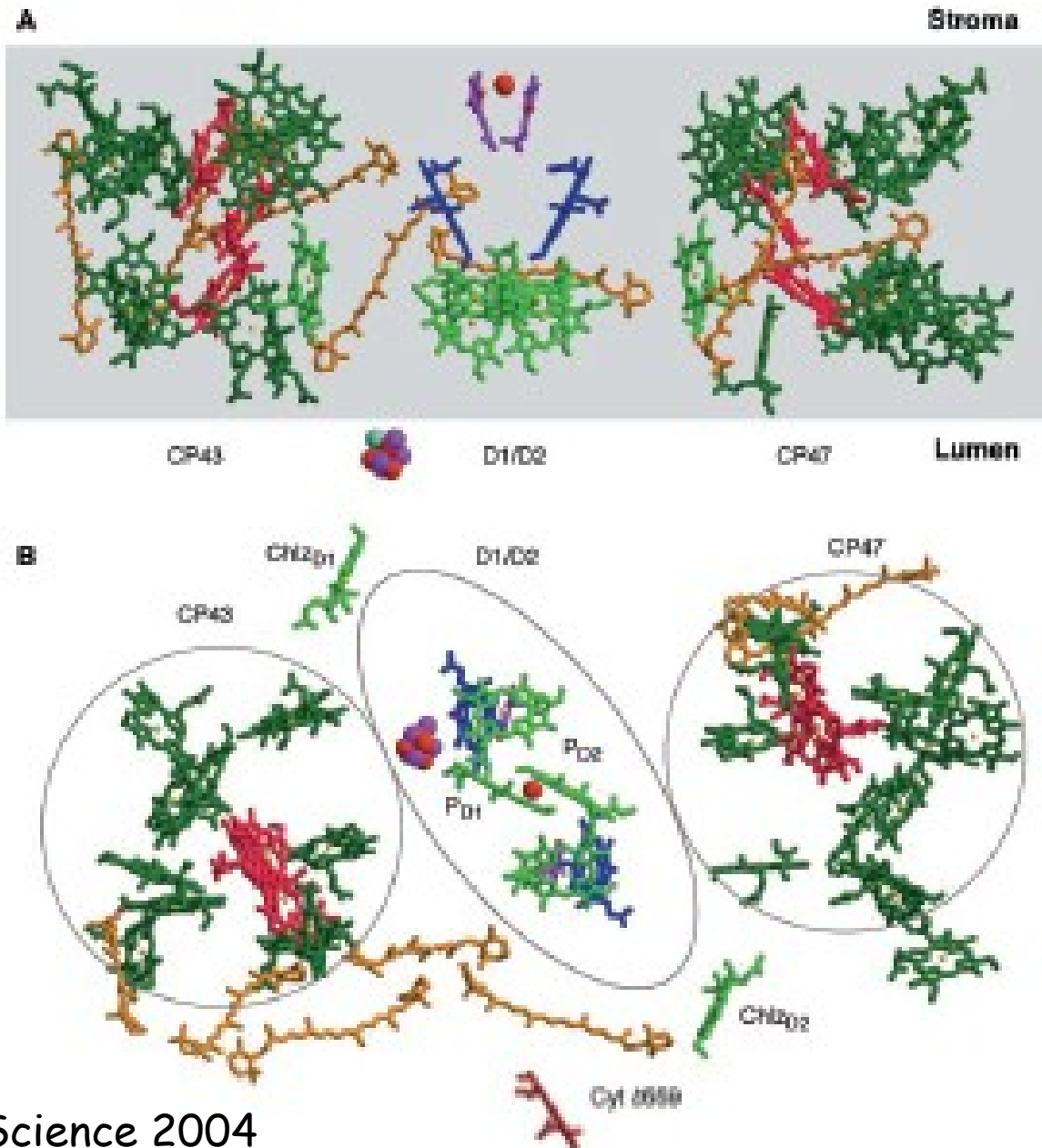
71 Chl-a + 28 Chl-b

25 Karotenoidů

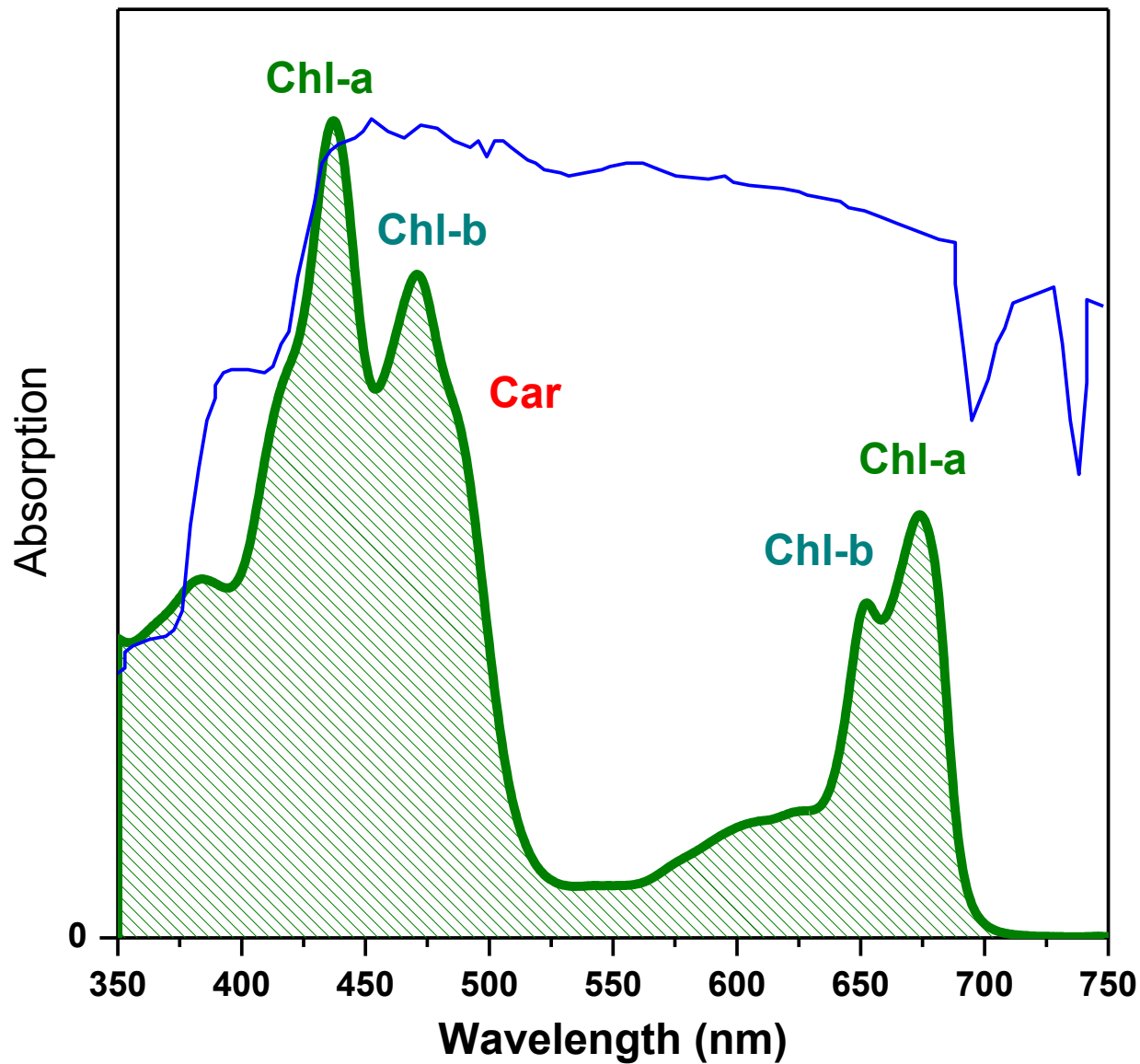
LHCII	24a + 18b
CP29	6a + 2b
CP26	6a + 3b
CP24	5a + 5b
CP43	14a
CP47	16a

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

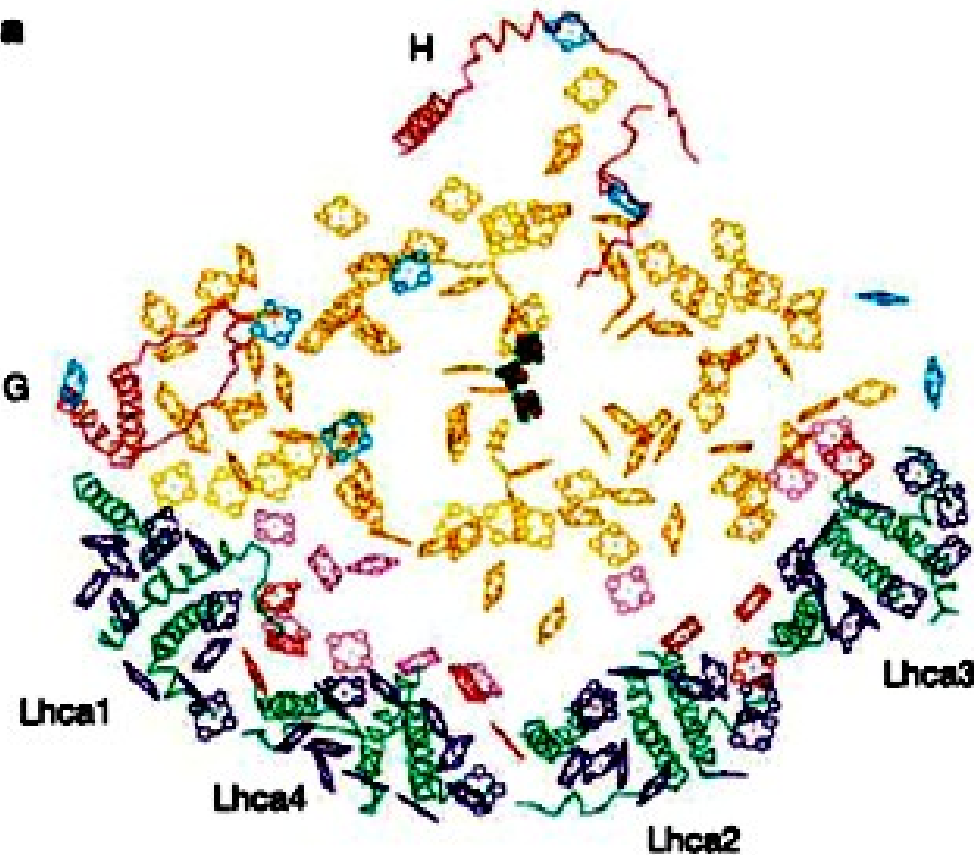
PSII vnitřní anténa (CP43 a CP47)



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

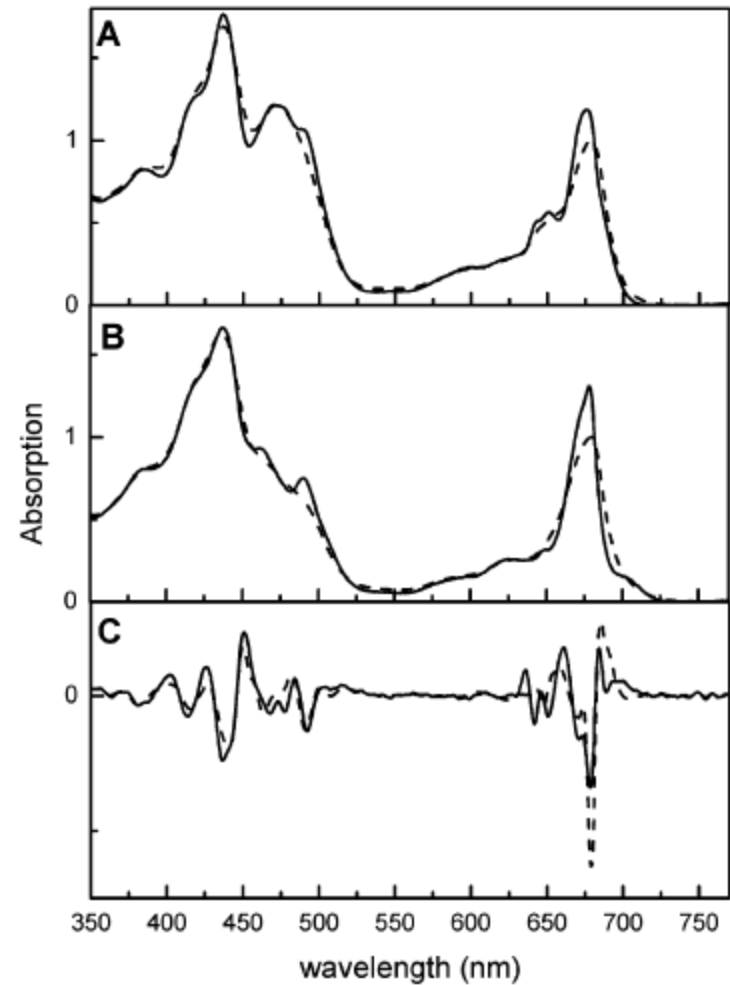
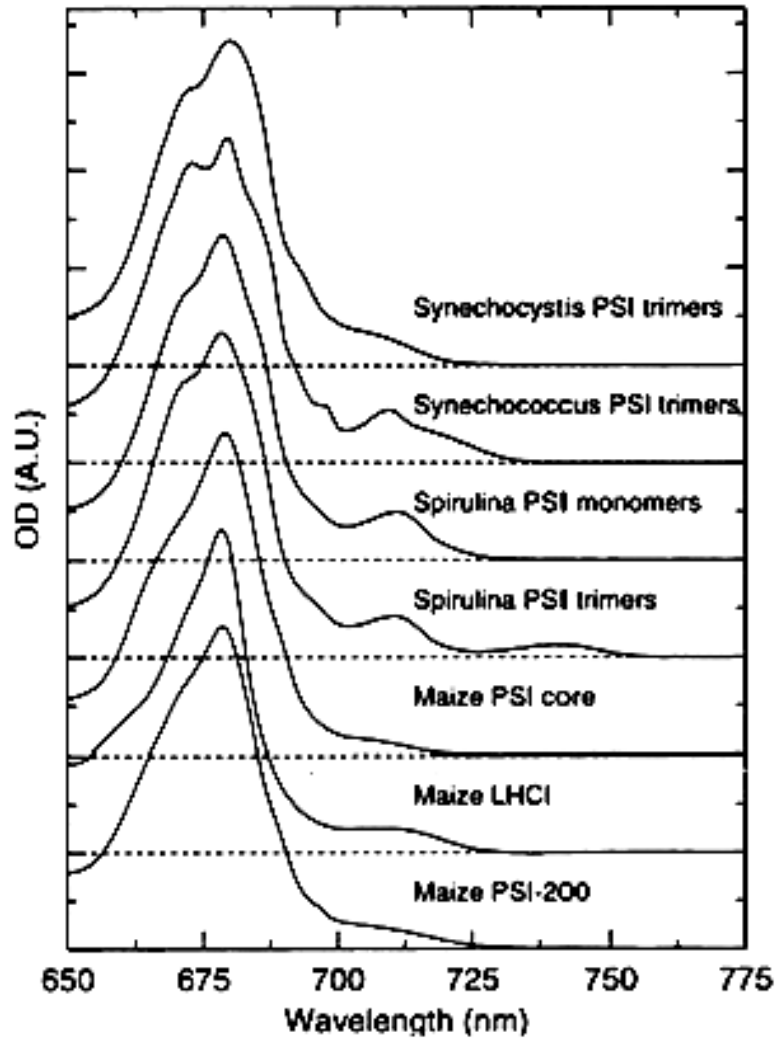
Lhca2 6.5a + 3.5b

Lhca3 8.5a + 1.5b

Lhca4 7a + 3b

Lhca proteiny tvoří vnější anténu - pouze u eukaryot

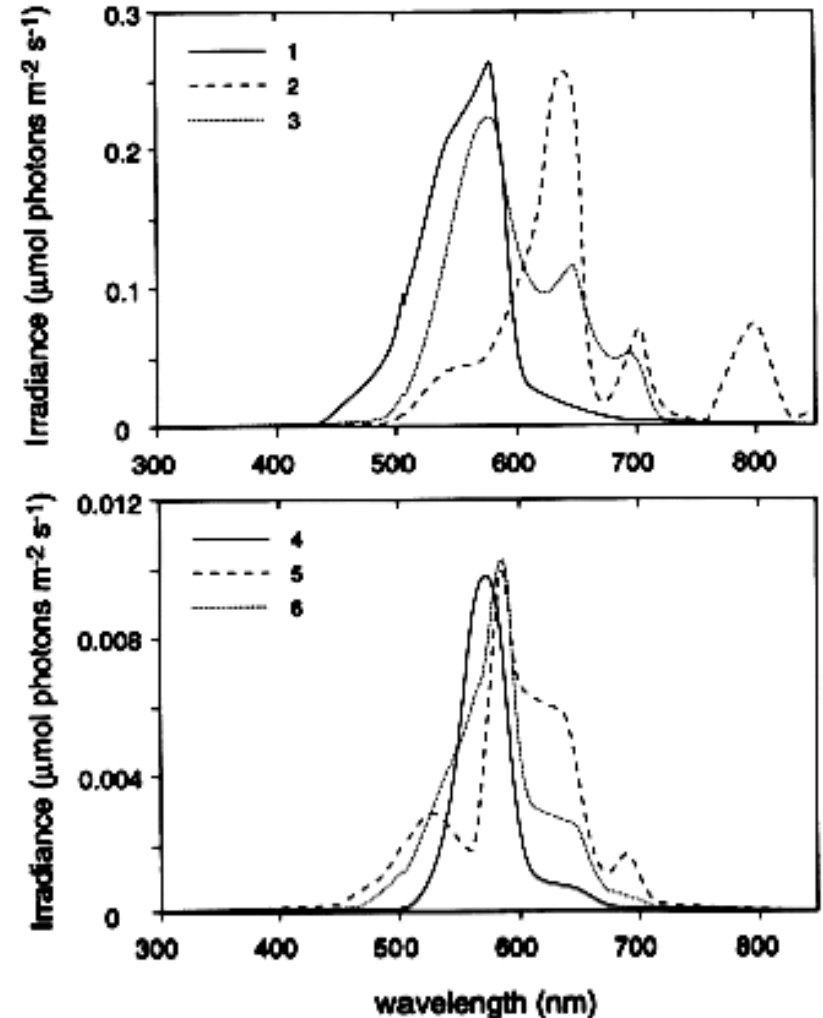
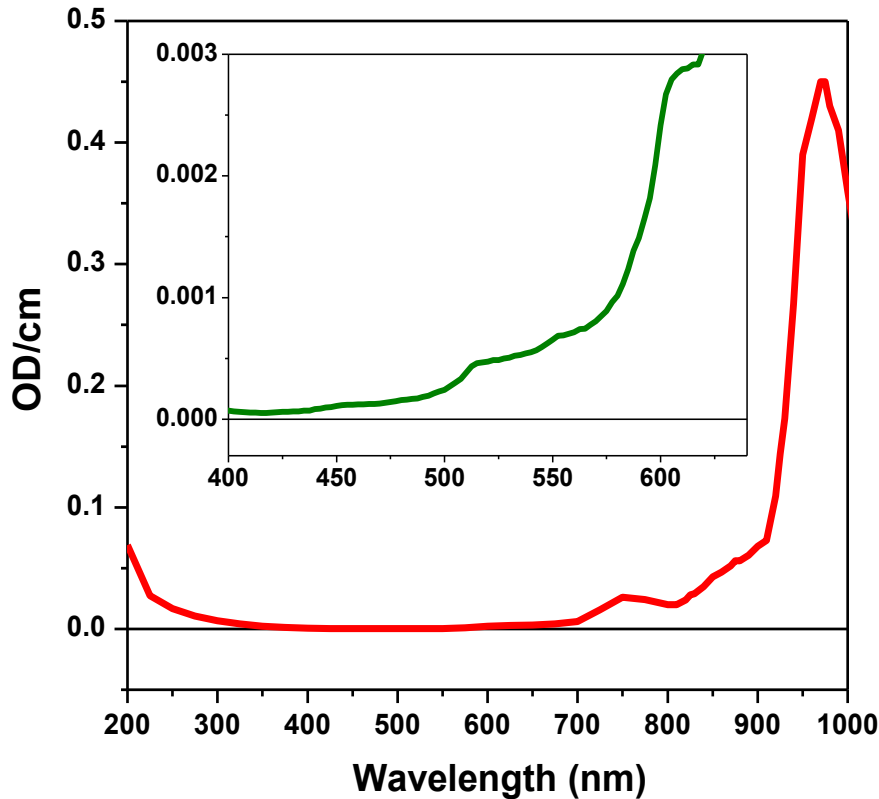
Absorpční spektrum PS I



„Červené“ chlorofyly - k čemu jsou dobré?

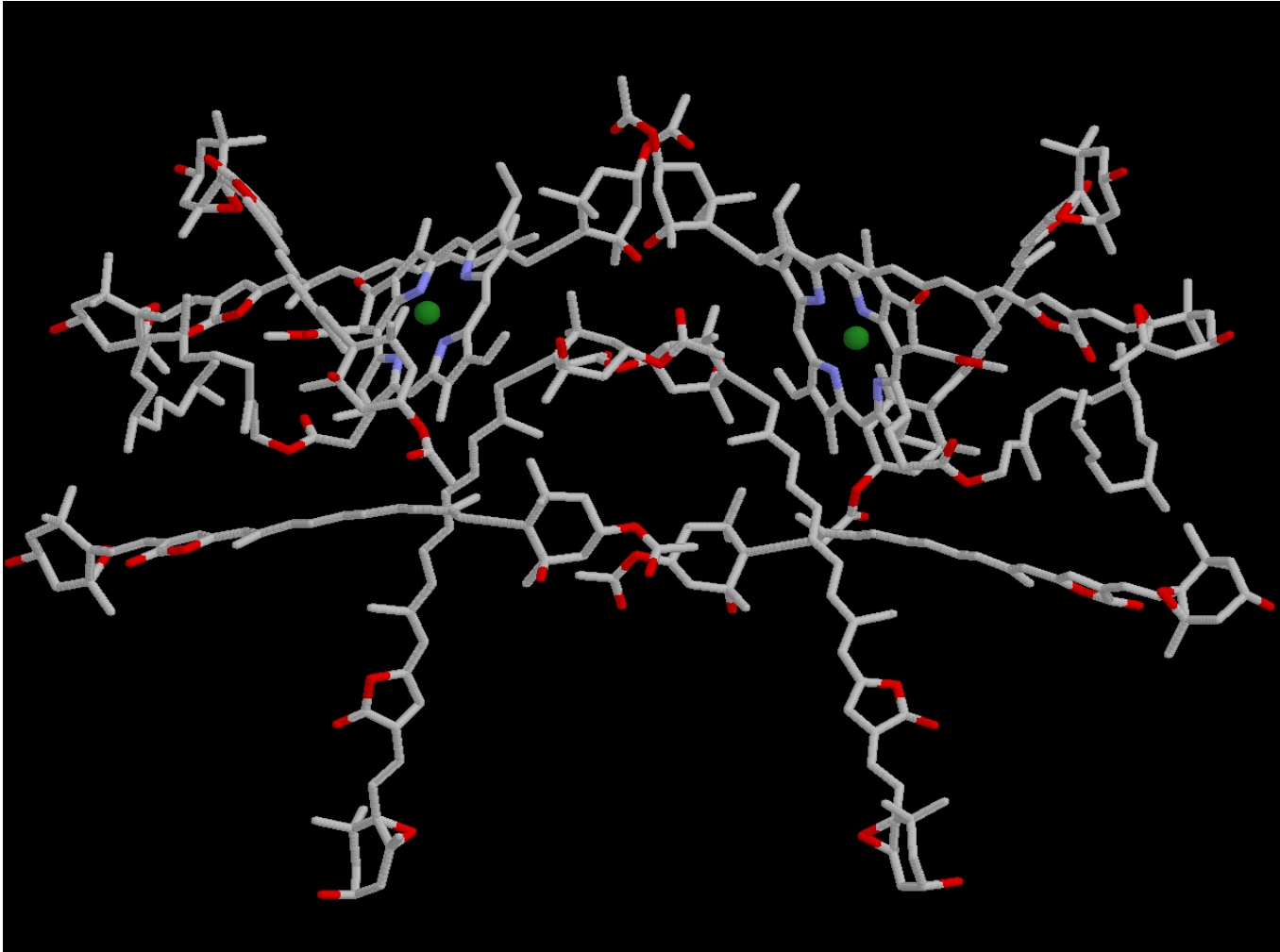
Fotosyntéza ve vodě

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



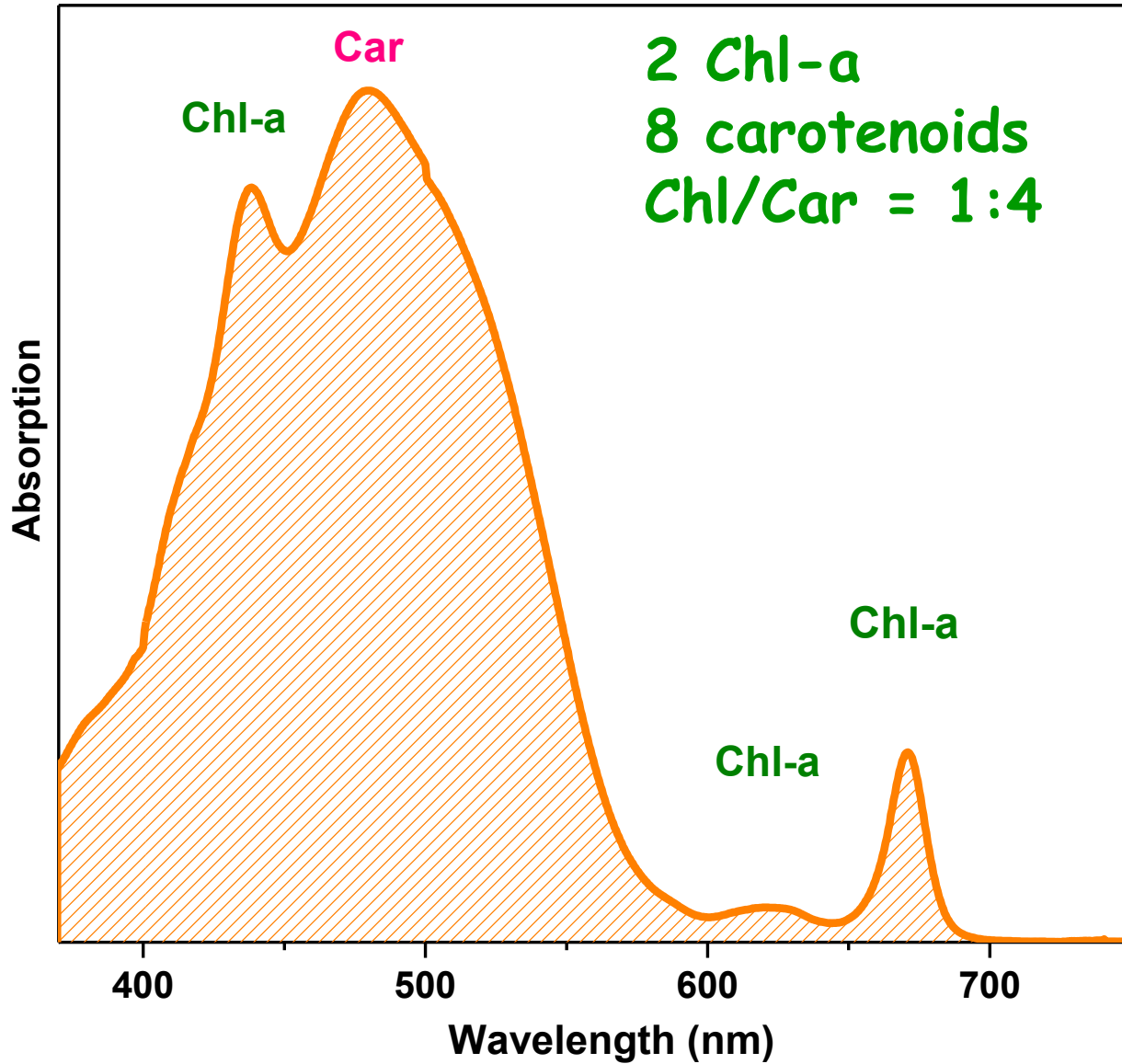
Fotosyntéza ve vodě by měla být optimalizována na sběr „zelenožlutých“ fotonů

Peridinin chlorofyl-a protein (PCP)

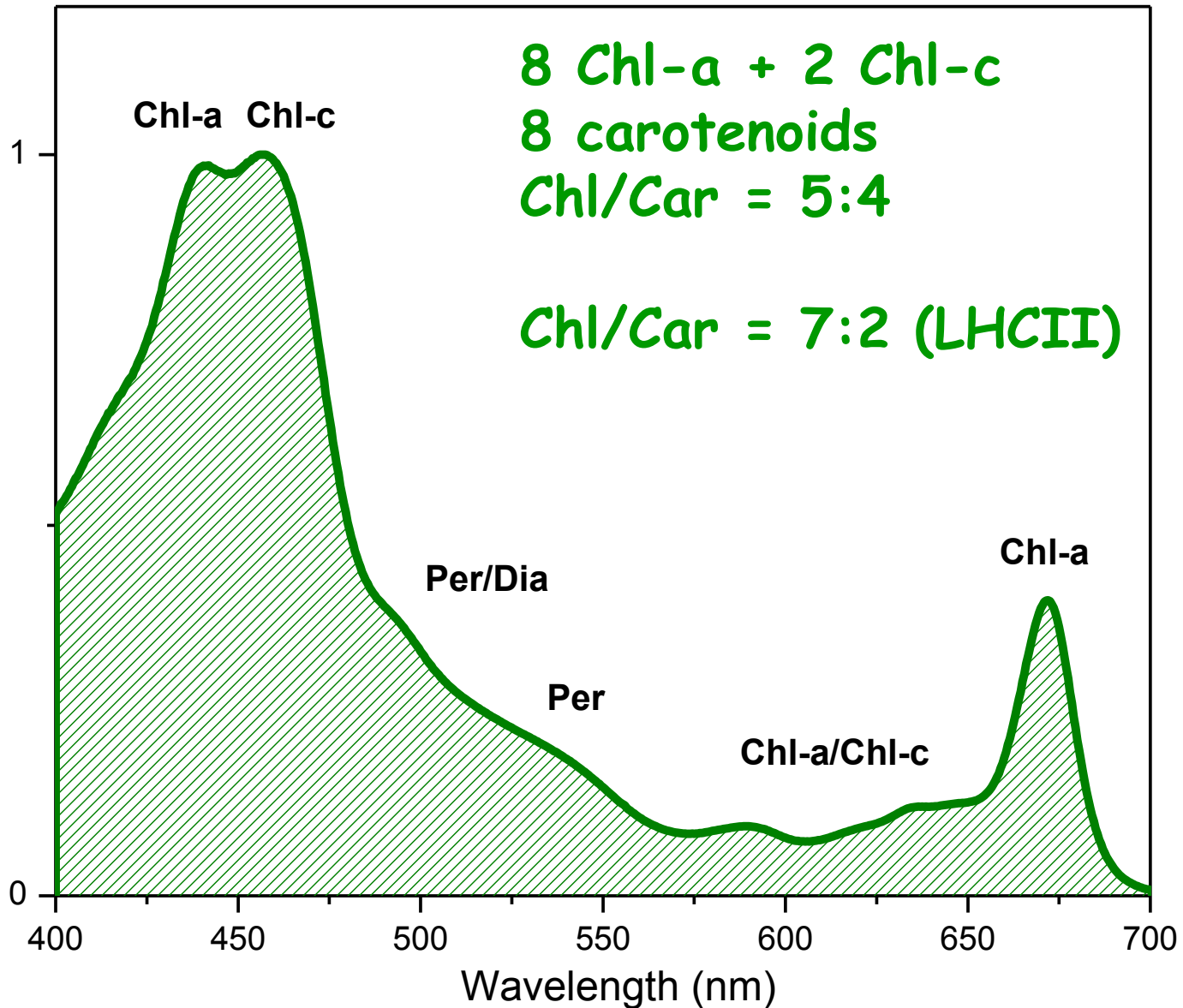


Vnější anténa připojená na stromatální straně tylakoidní membrány

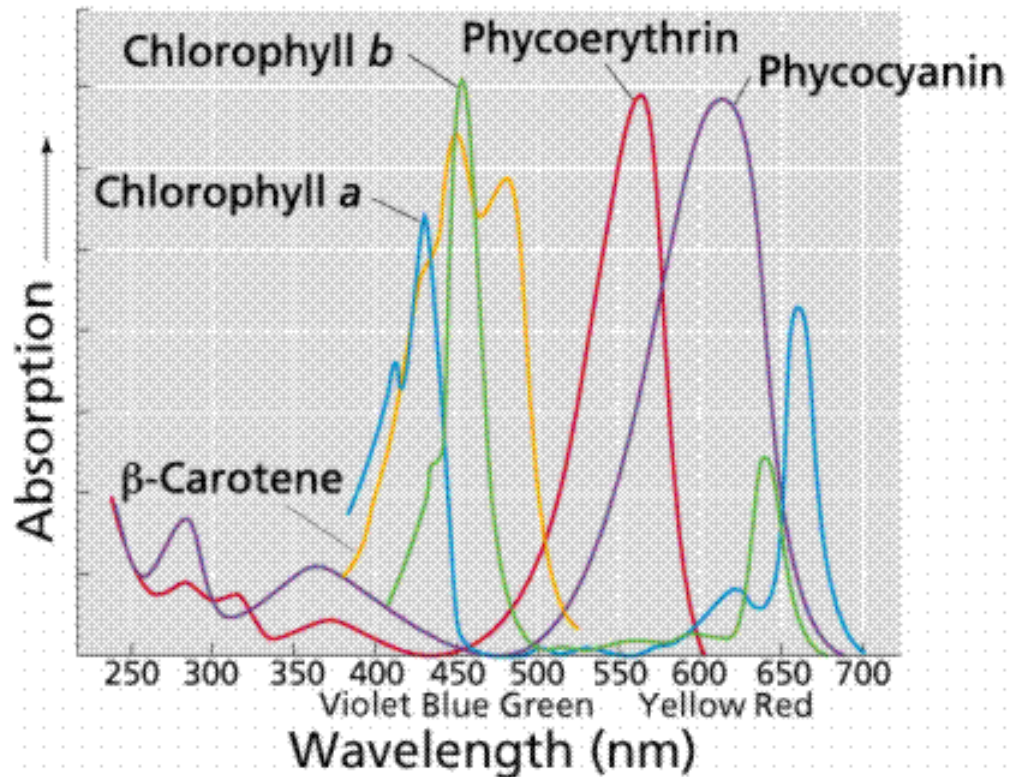
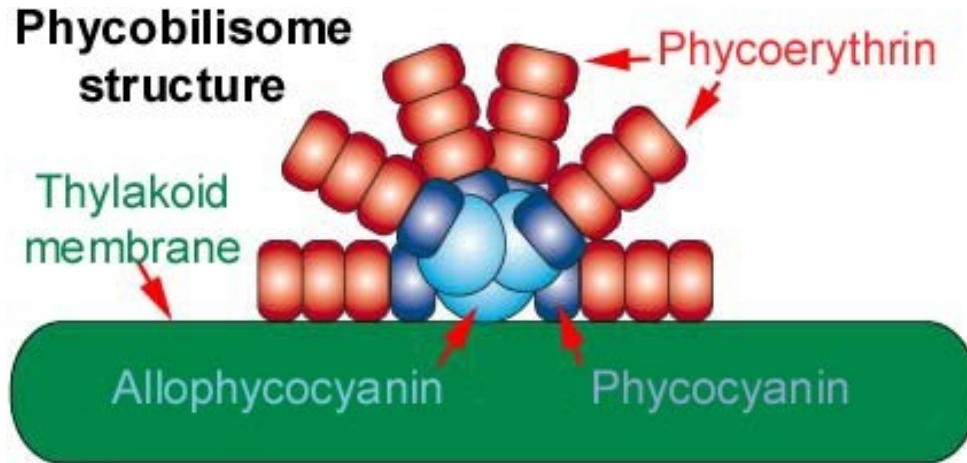
PCP spektrum



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	Palmelloid green, <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

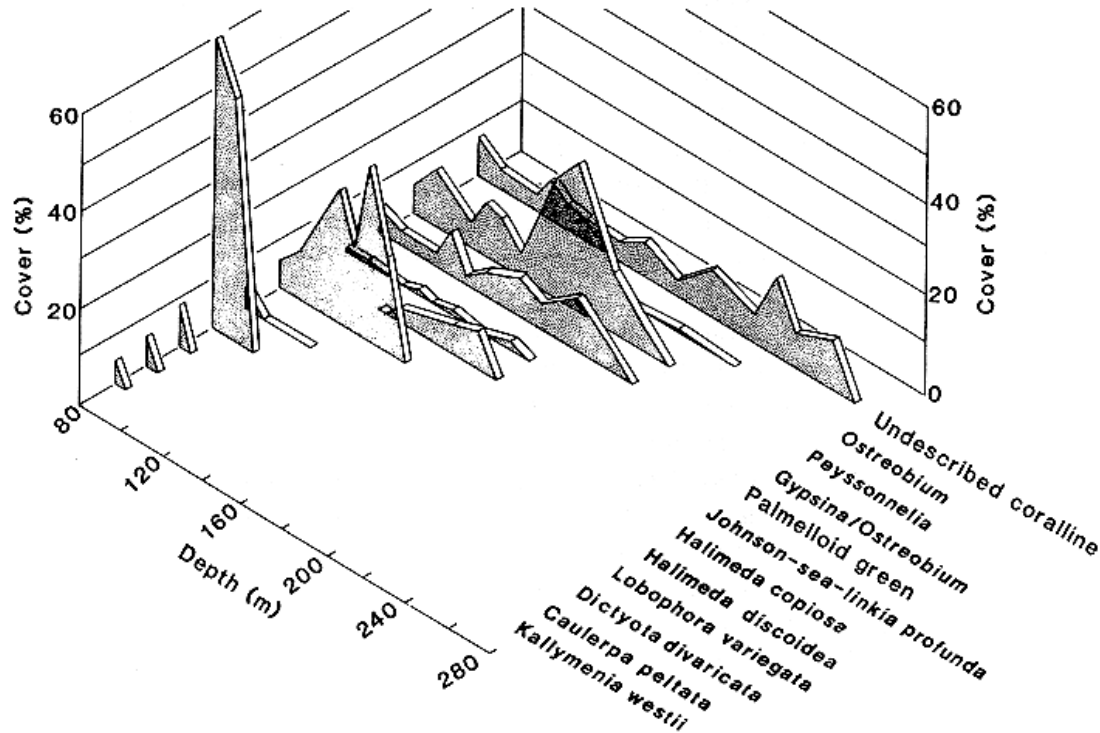
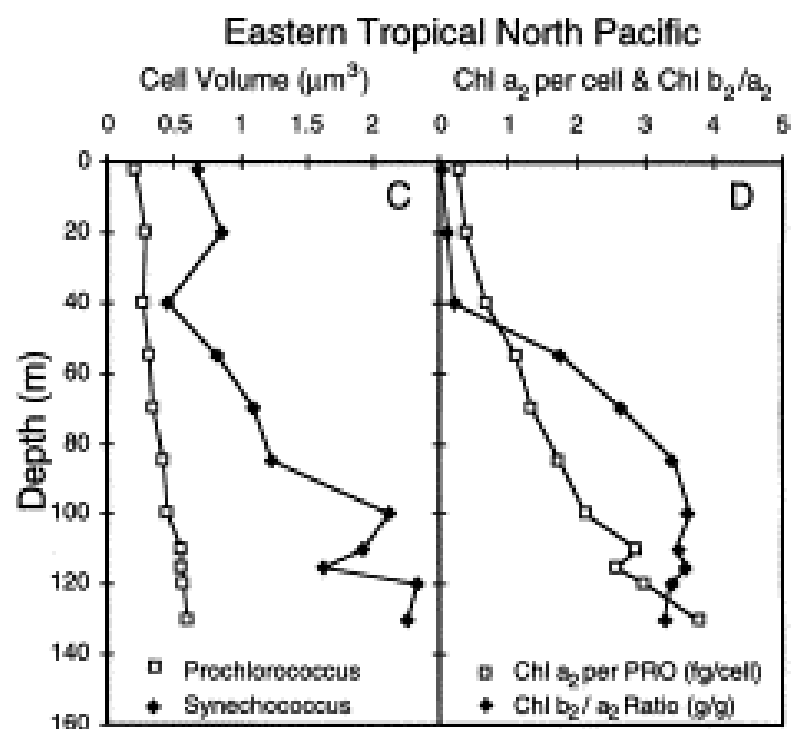
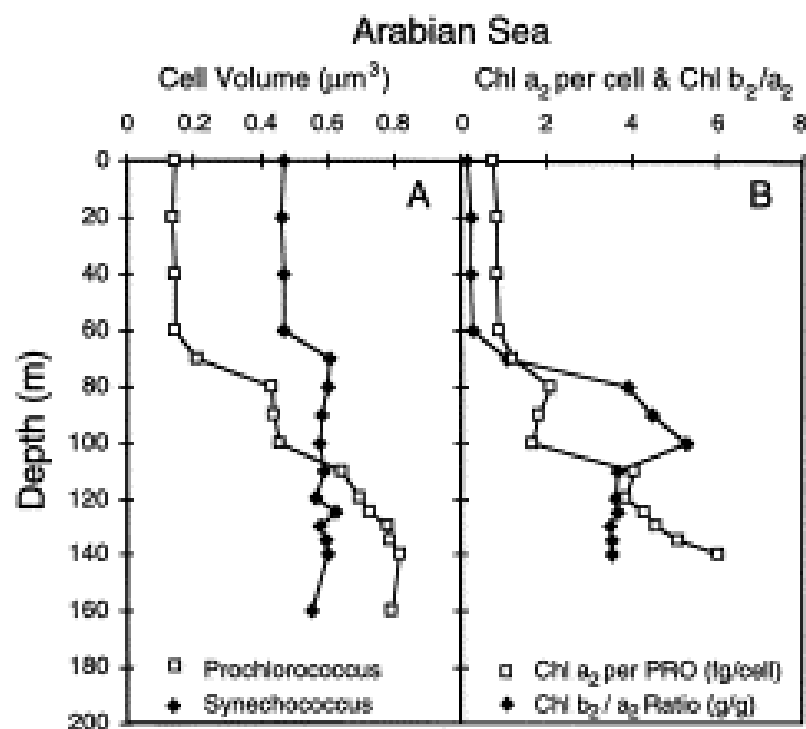
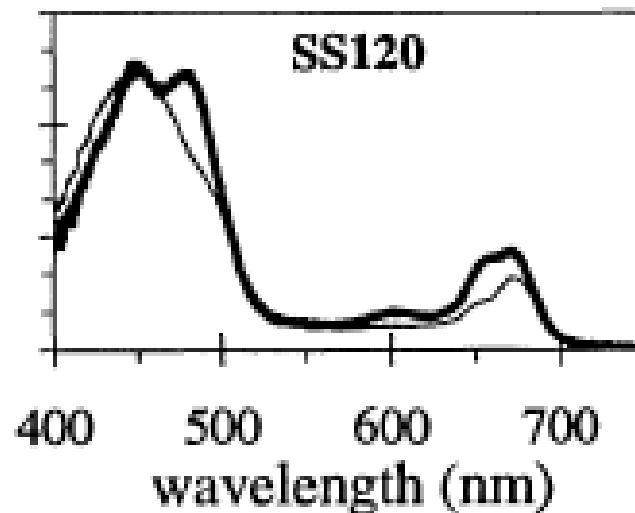


Fig. 2. Distribution and abundance patterns of the major plant cover.

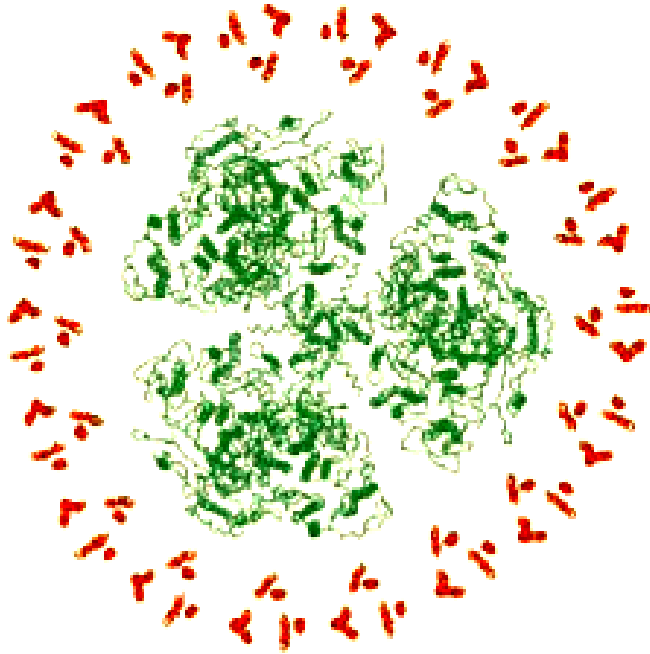
Strategie za nízkého osvětlení

1. Zvýšení poměru Chl-b/Chl-a (zvýšení účinného průřezu v maximu spektra slunečního záření)
2. Syntéza Chl-a₂ and Chl-b₂ (divinyl Chl-a, Chl-b, lepší pokrytí v maximu spektra slunečního záření)



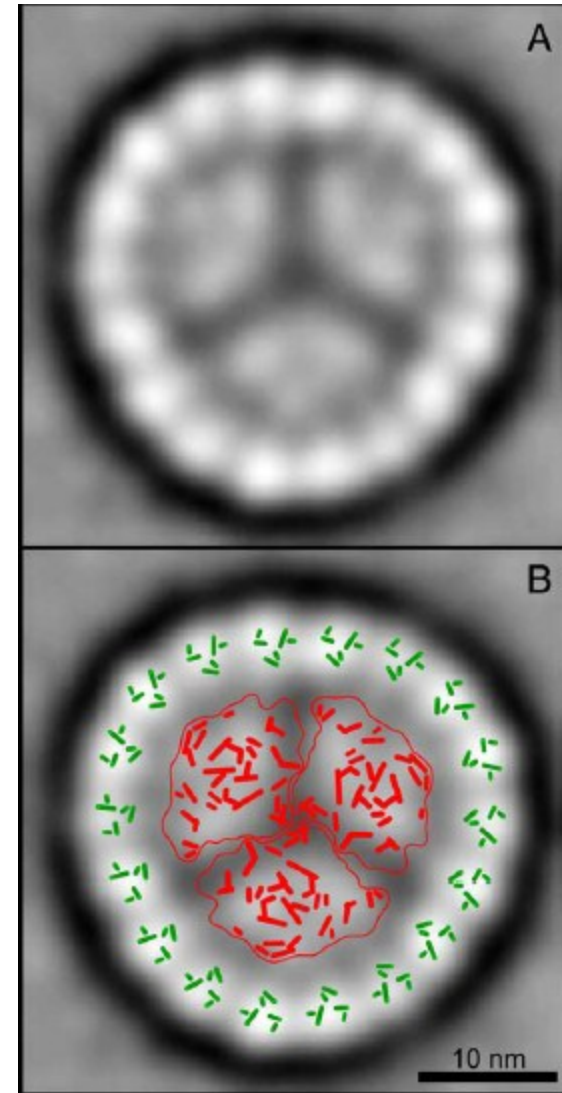
Přídavné antény u prochlorofyt

b



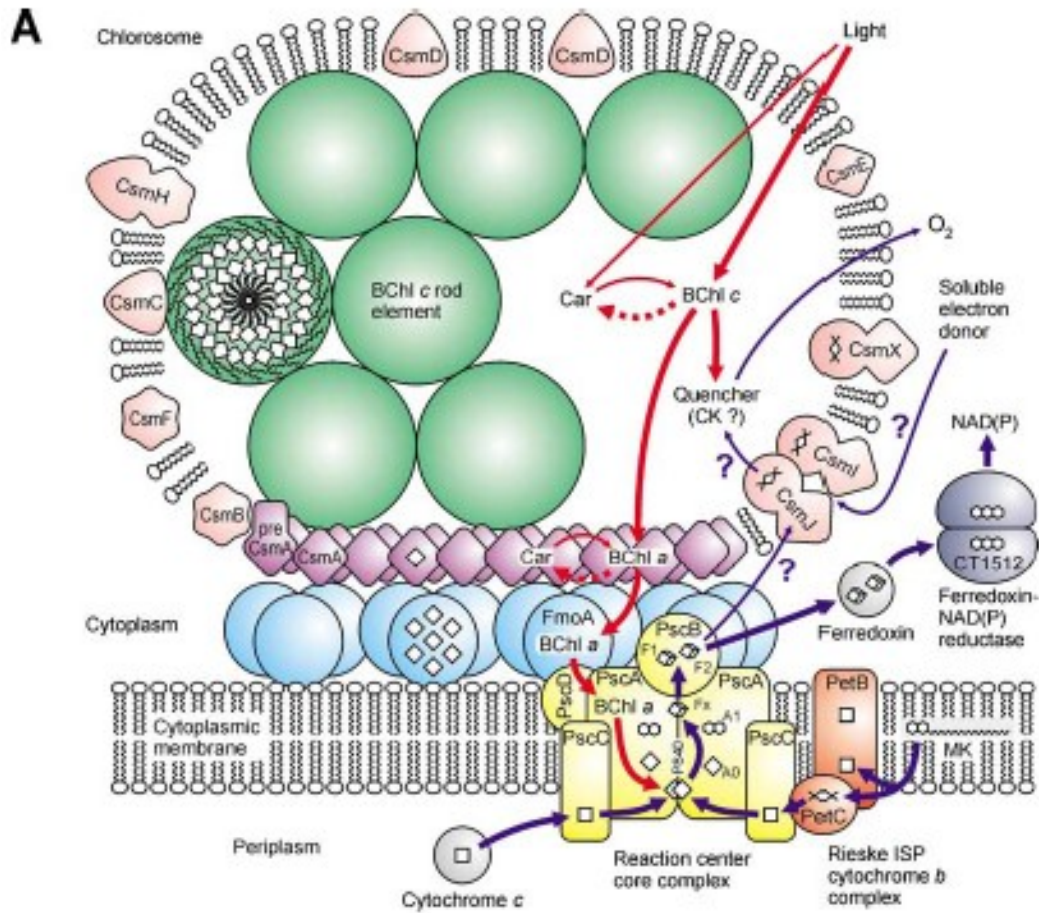
Prochlorococcus SS120
Bibby et al., Nature 2001

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



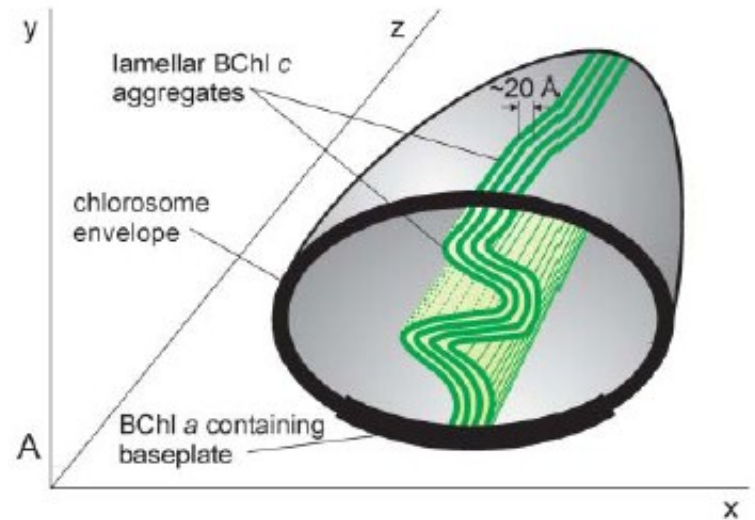
Prochlorotrix hollandica
Bumba et al., BBA 2005

Chlorosomy zelených sírných bakterií

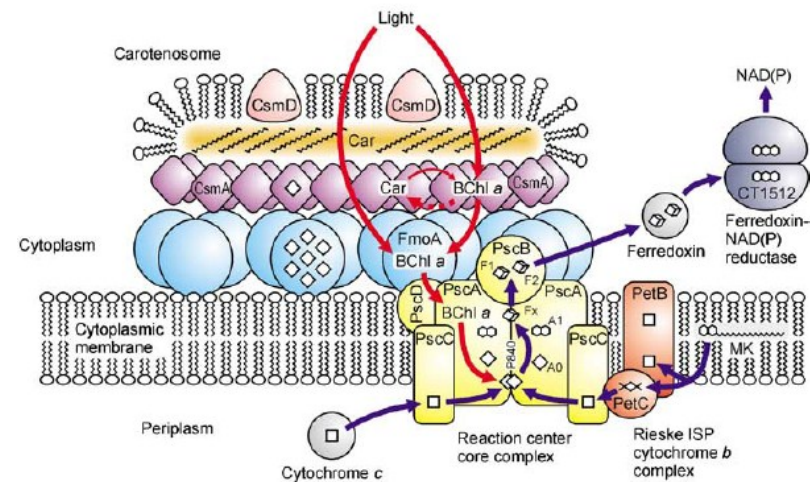


Frigaard et al. Photosynth. Res. 2003

10⁶ anténních molekul na RC!!



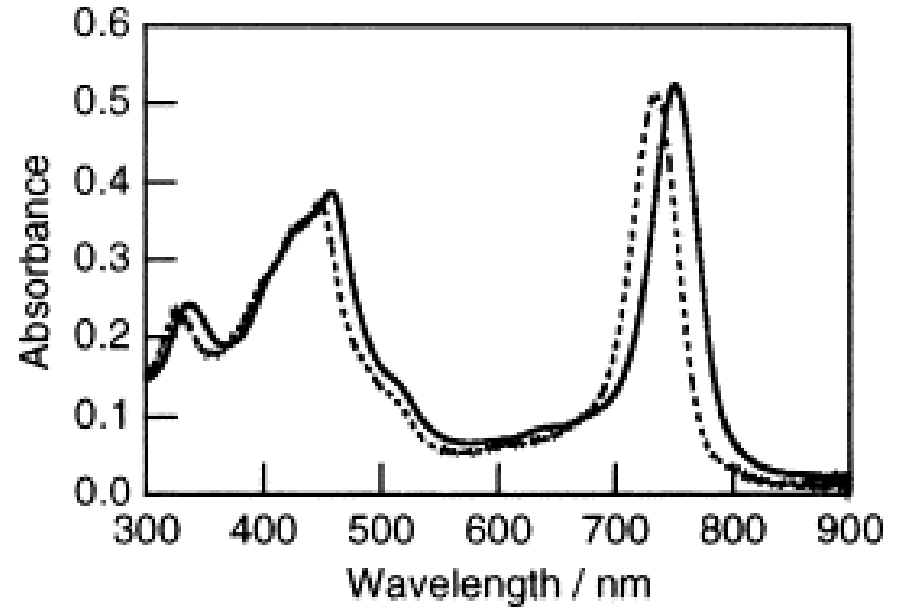
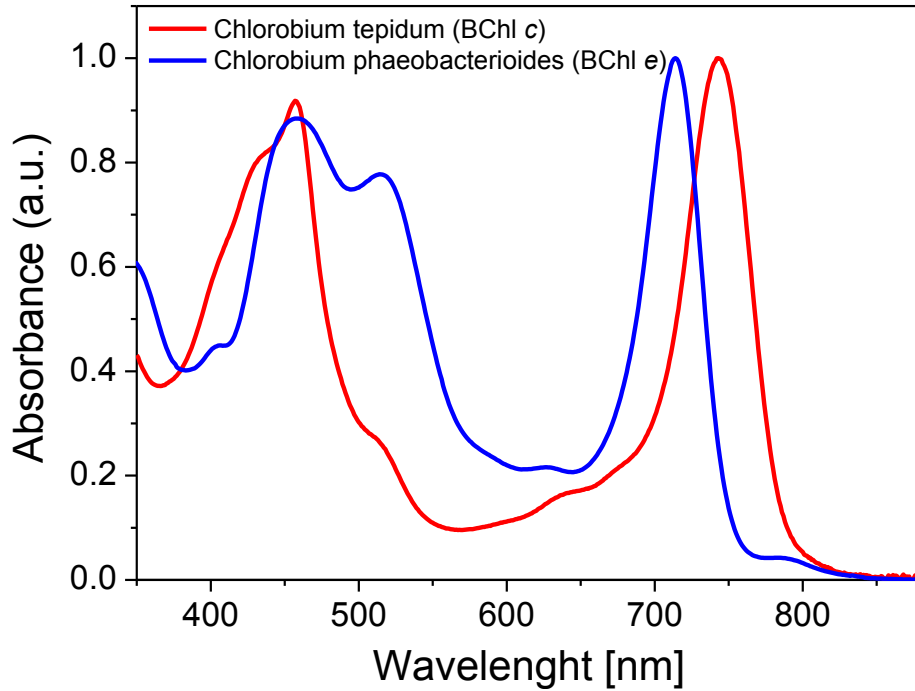
Pšenčík et al. Biophys. J. 2004



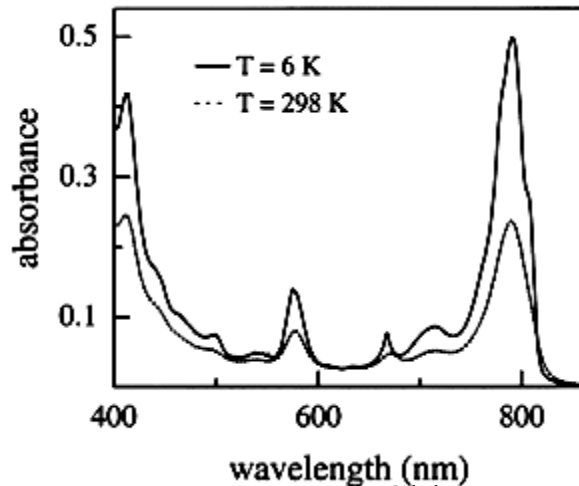
Frigaard et al. J. Bacteriol. 2002

Absorpční spektra chlorosomů

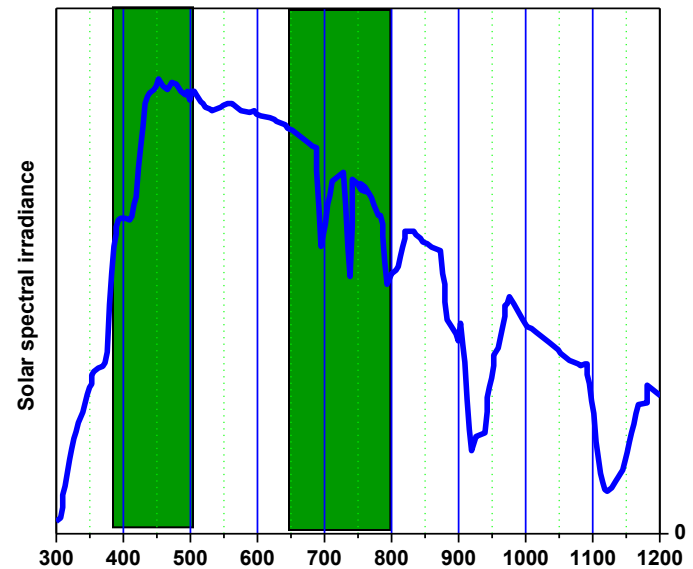
Absorption spectra of chlorosomes



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



BChl-g, Neerken BBA 2001

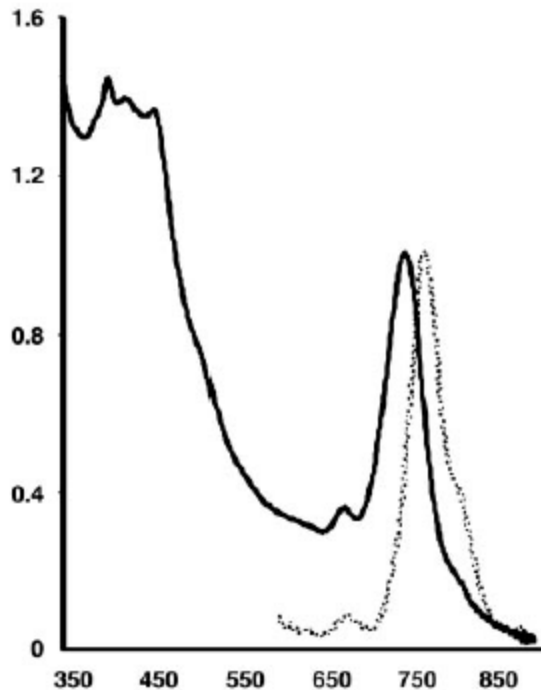


Extrémní fotosyntéza

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

J. Thomas Beatty^{††}, Jörg Overmann[‡], Michael T. Lince[§], Ann K. Manske[‡], Andrew S. Lang^{*¶}, Robert E. Blankenship[§], Cindy L. Van Dover^{||}, Tracey A. Martinson[¶], and F. Gerald Plumley^{¶**}

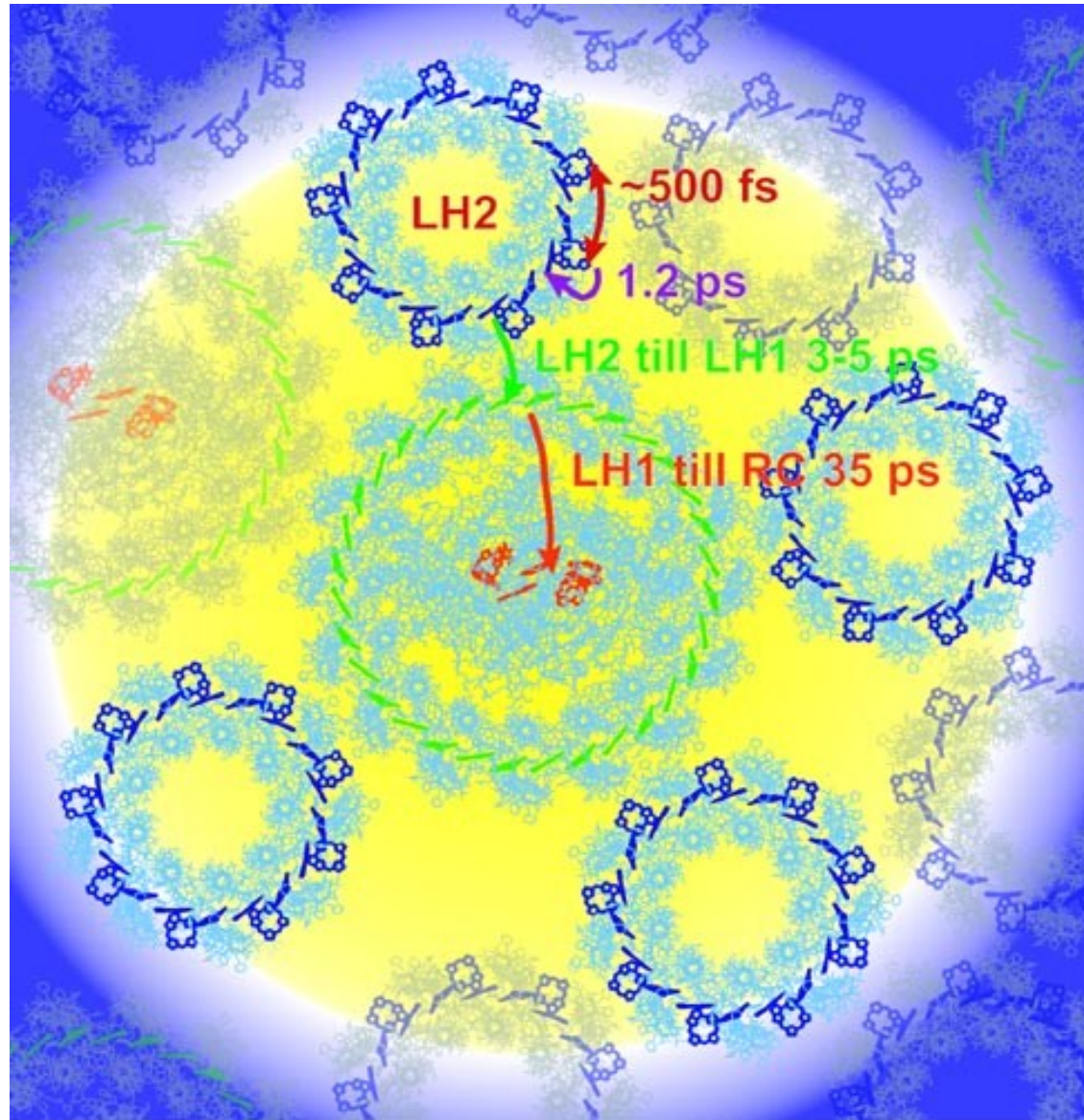
sulfur compounds to reduce CO₂ to organic carbon, and are capable of photosynthetic growth at extremely low light intensities. We describe the isolation and cultivation of a **previously unknown green sulfur bacterial species from a deep-sea hydrothermal vent, where the only source of light is geothermal radiation that includes wavelengths absorbed by photosynthetic pigments of**



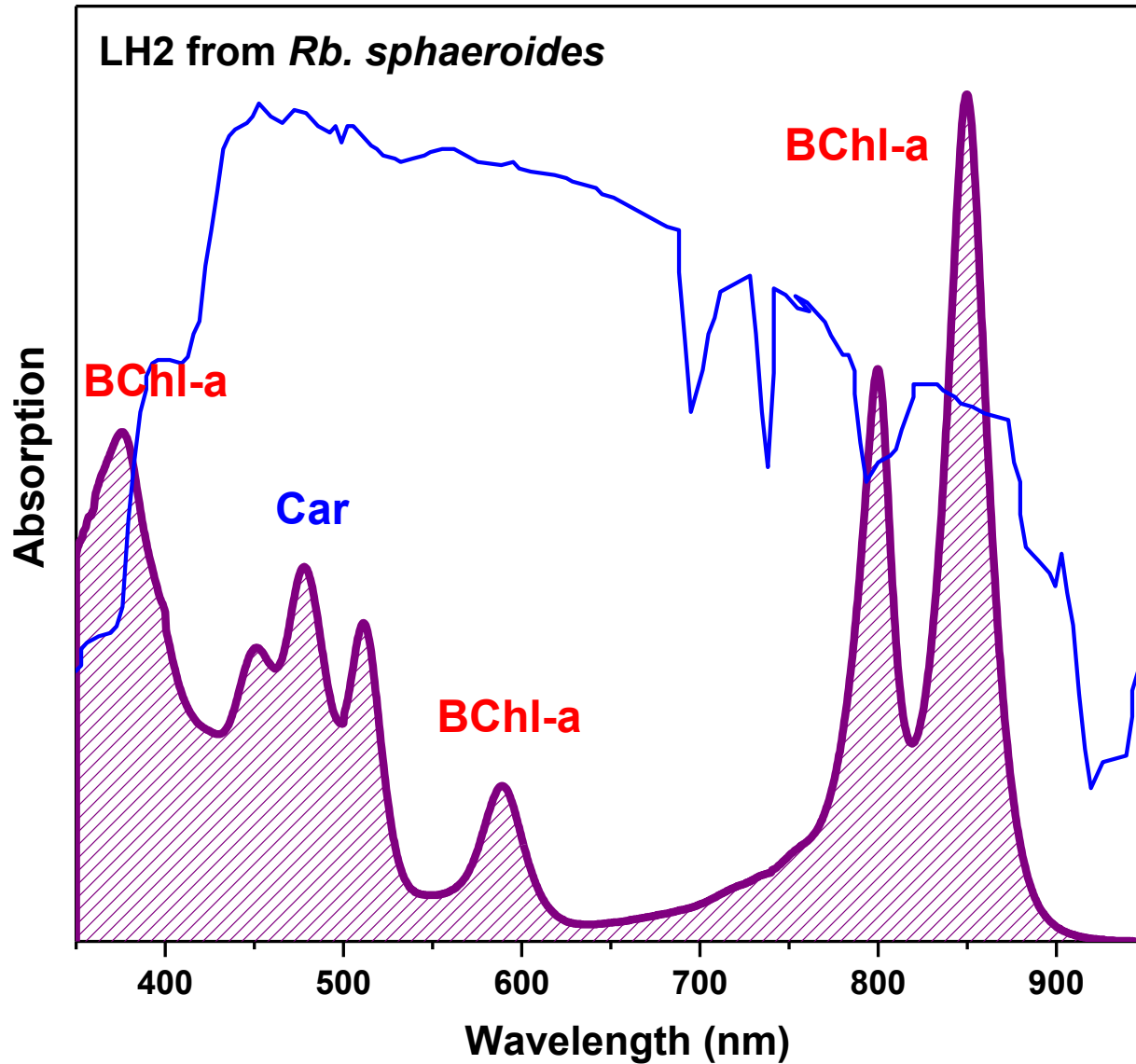
On this cruise, we visited the East Pacific Rise, which is an area of high volcanic activity with a variety of vents that support characteristic ecosystems (2, 21). A water sample was obtained directly from the effluent plume within 50 cm above the orifice of the TY black smoker (**2,391 m in depth**;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

Zelená sírná baktérie, BChl-c jako hlavní pigment

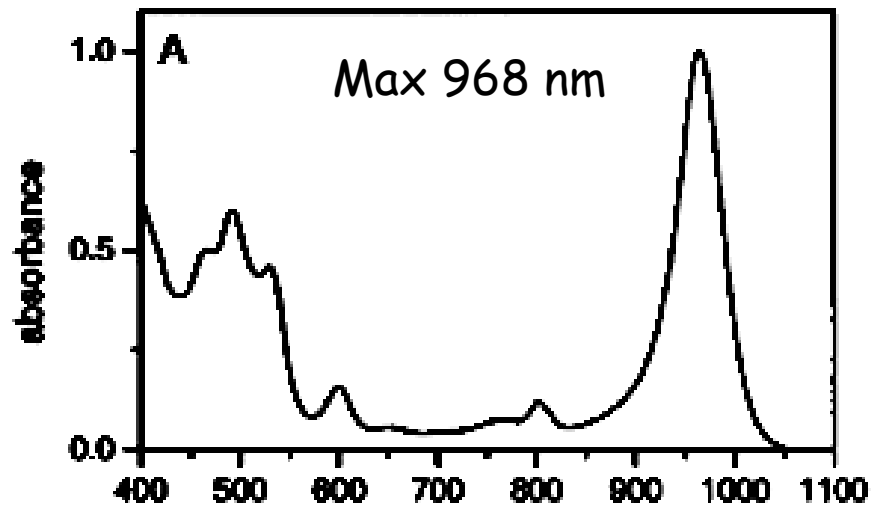
Purpurové baktérie



LH2 spektrum



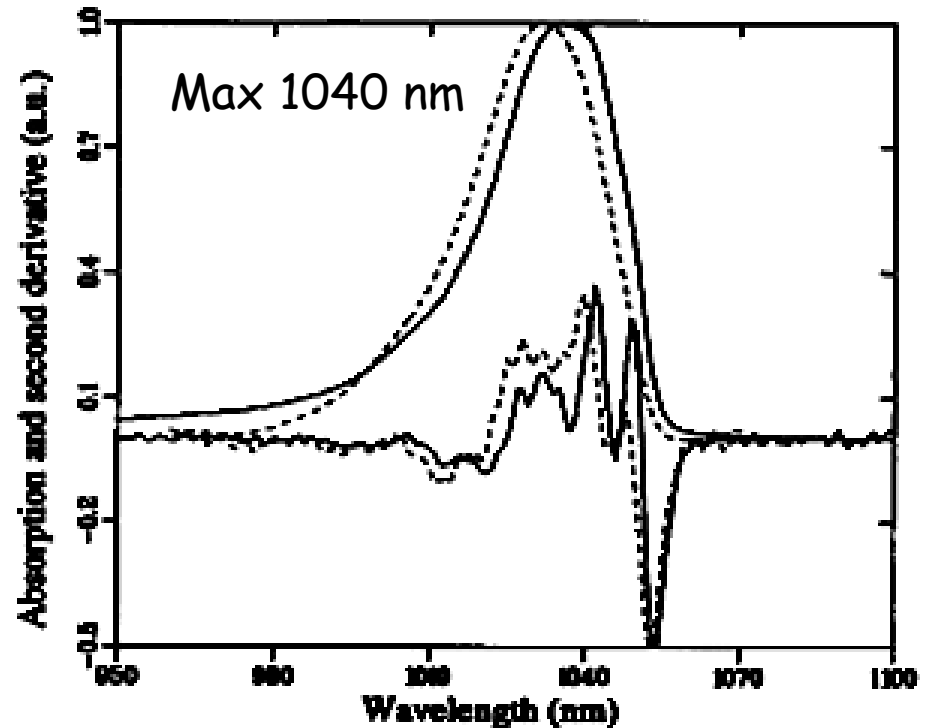
Purpurové bakterie - dál do infračervené oblasti



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

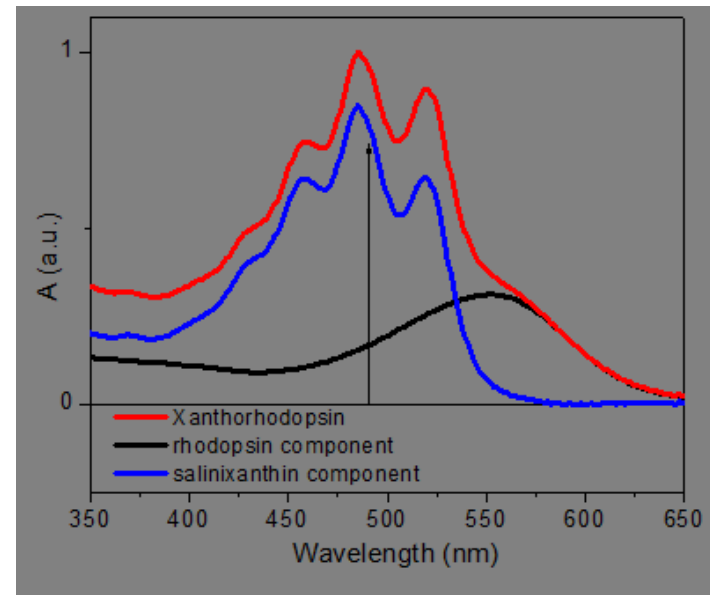
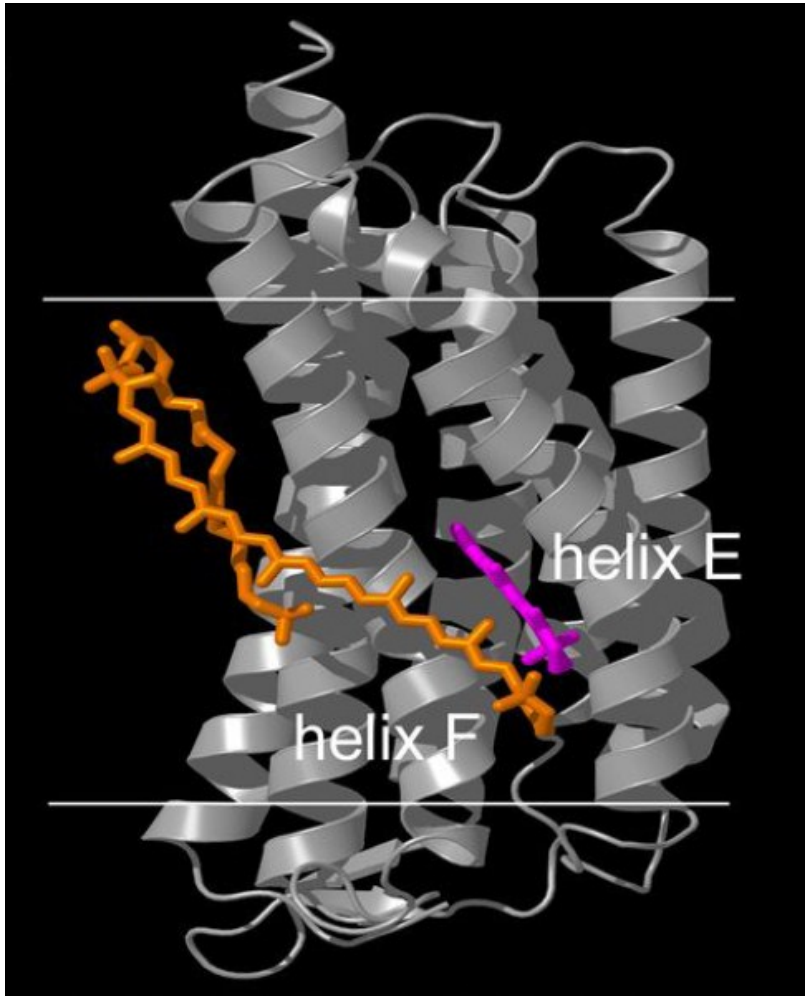
790 nm v roztoku, 1040 nm v proteinu

Xanthorhodopsin

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

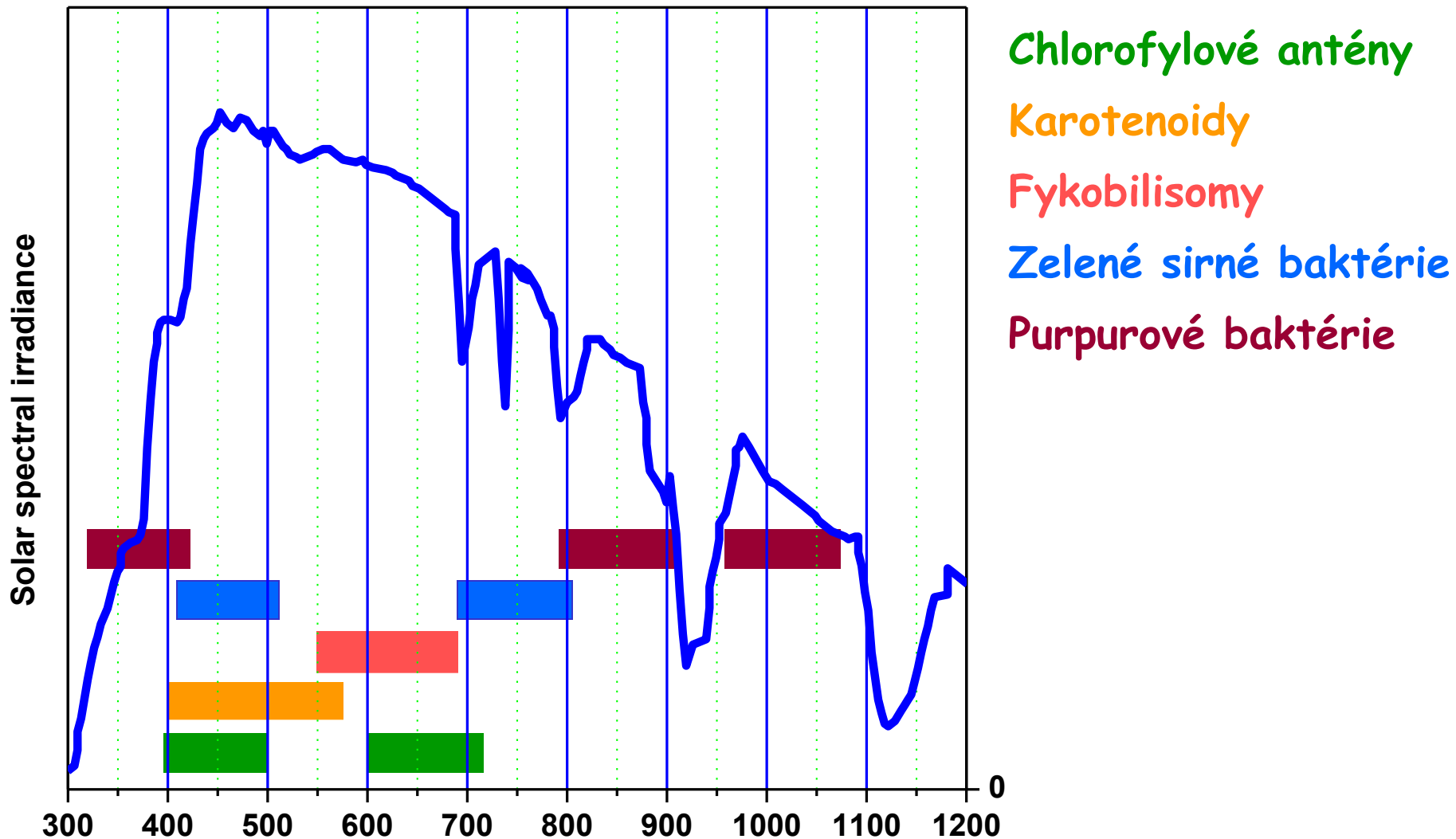
Není to „typická“ fotosyntéza

Anténní funkce xanthorhodopsinu objevena 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

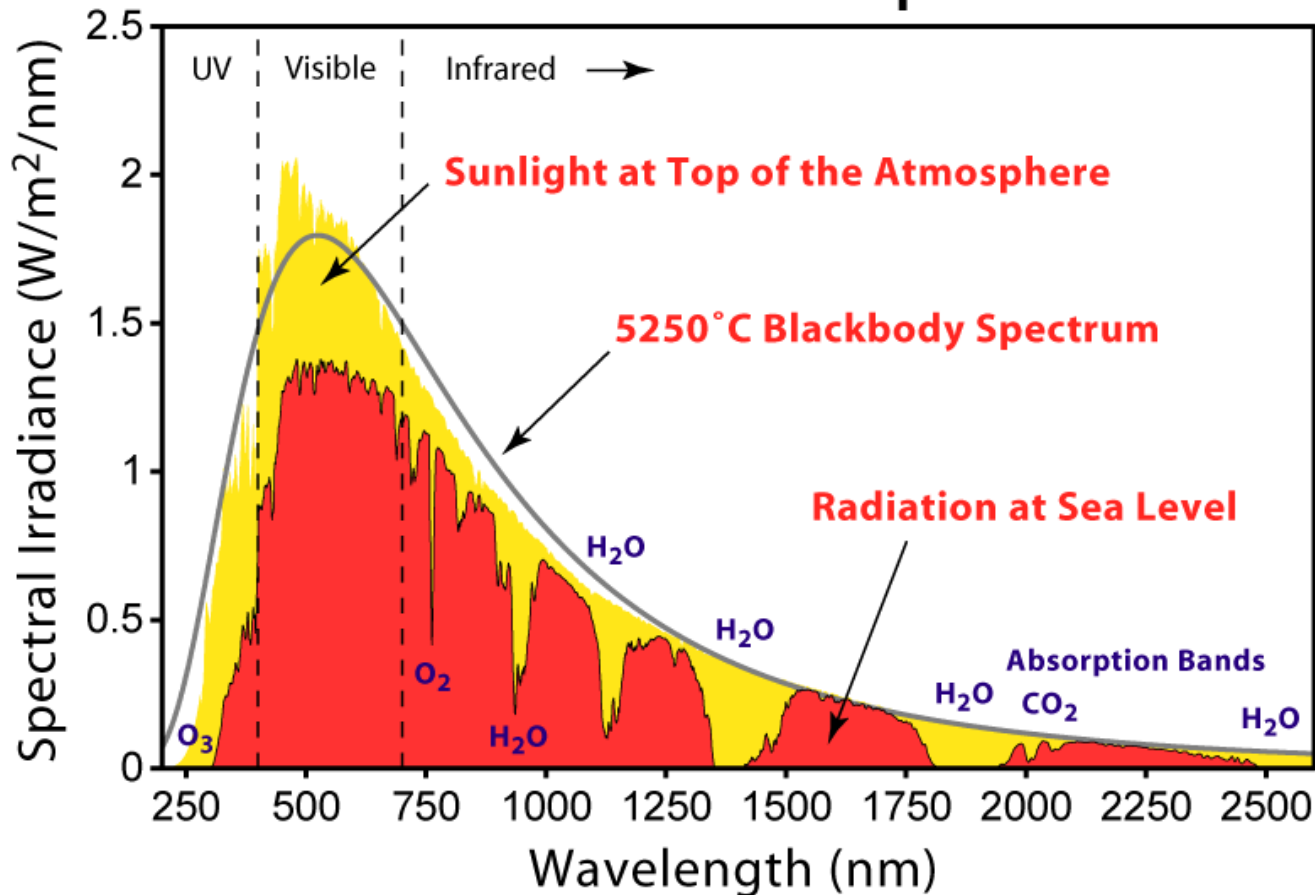


Umělá fotosyntéza



Parametry slunečního záření

Solar Radiation Spectrum



Solární konstanta

$1366 Wm^{-2}$

174 000 TW

$345 Wm^{-2}$

44 000 TW

K získání 1 GW energie
je zapotřebí $3 km^2$

+ 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 W/m²

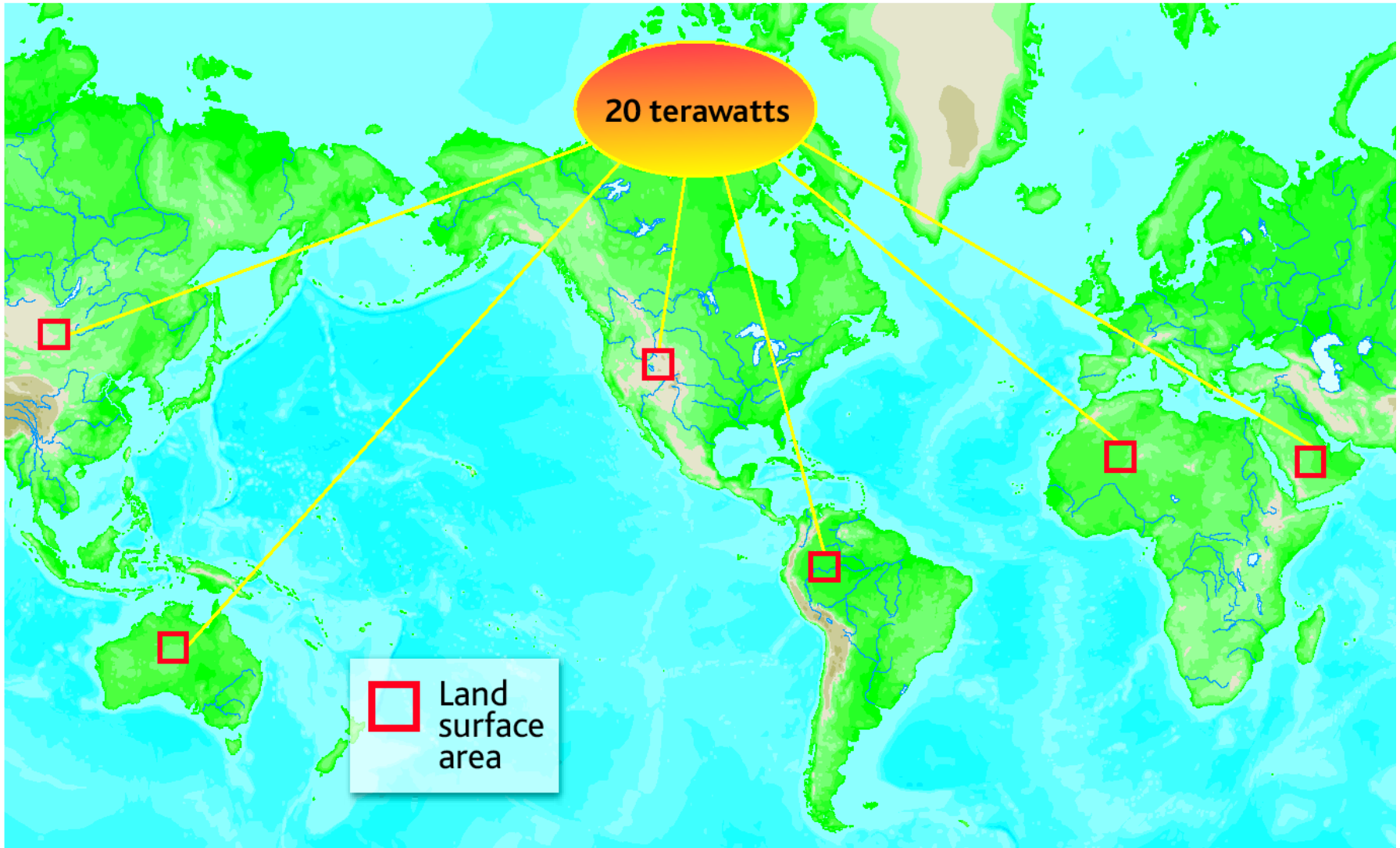
Problém hustoty energie

1 ha fotovoltaických článků = 1 dm³ jaderného paliva

1645W/m²

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

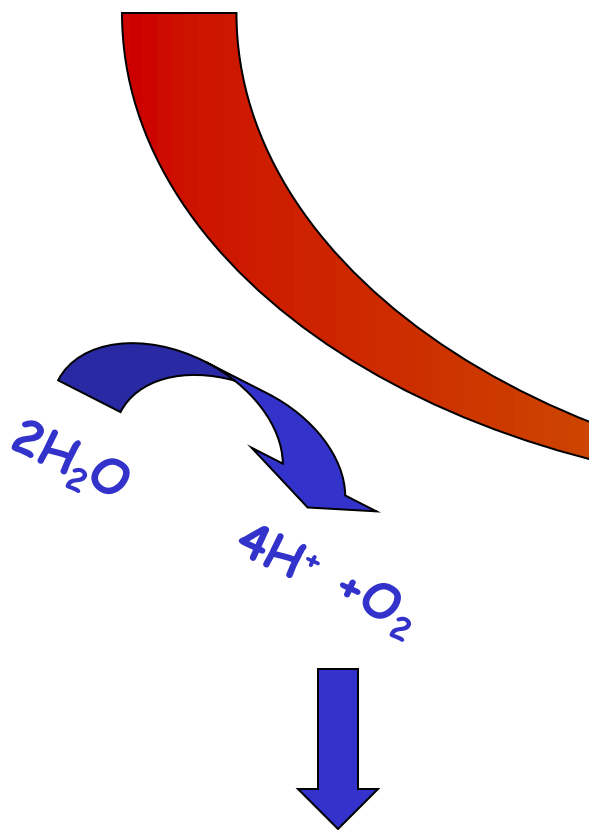
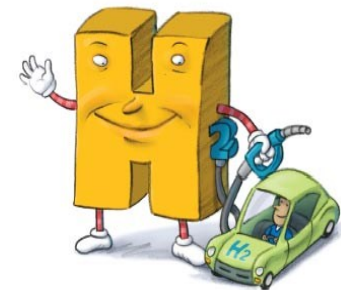
Využít obnovitelných zdrojů k výrobě skladovatelné formy energie - **paliva**

Umělá fotosyntéza



Fotosyntéza

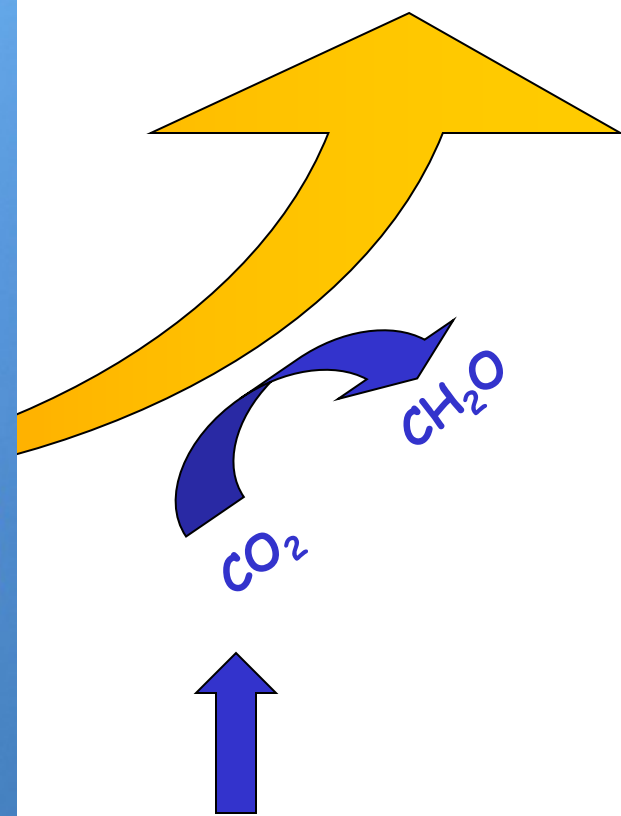
Primární zdroj energie v biosféře



Atmosférický
kyslík

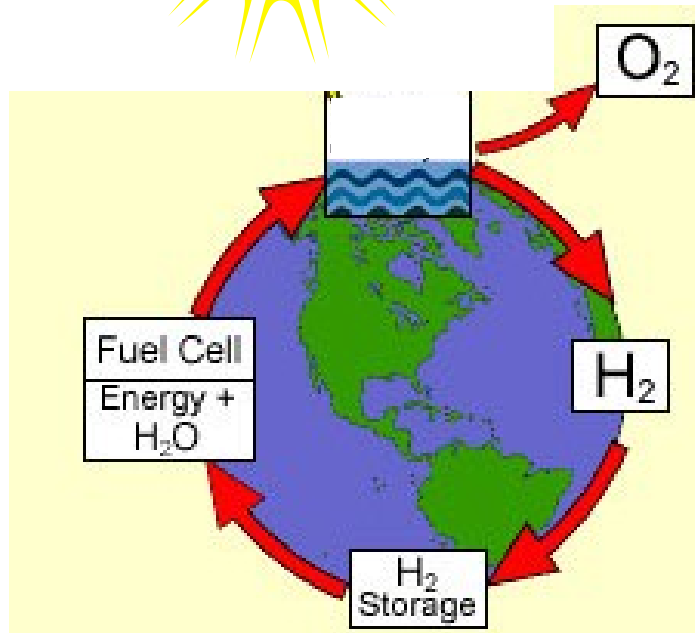


Účinnost ~0.2%



Atmosférický
oxid uhličitý

Umělá fotosyntéza



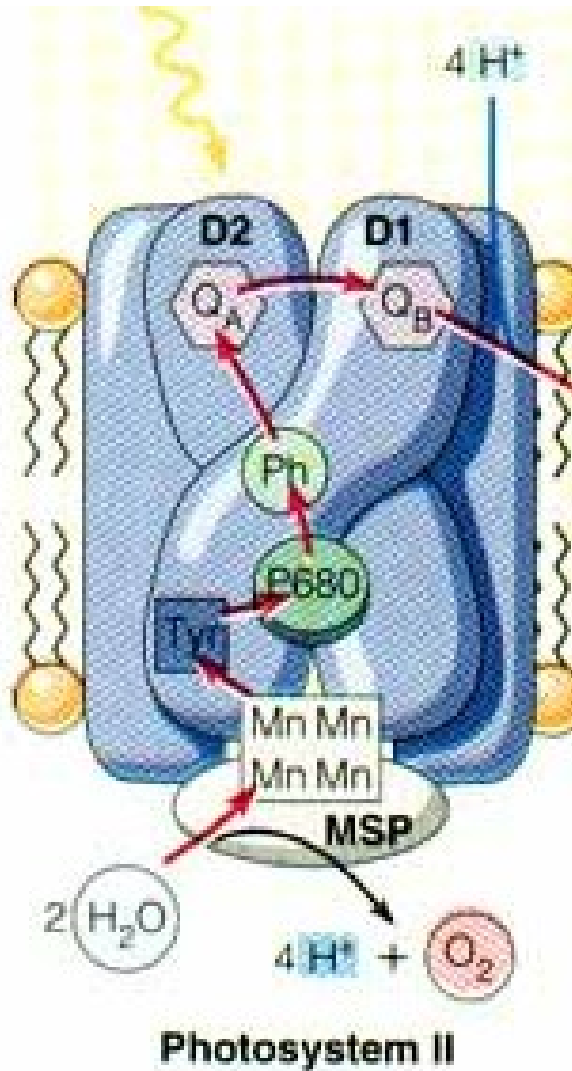
- Napodobení a modifikace přírodních dějů
- Čistý a obnovitelný zdroj energie
- Zatím technologicky nedostupný

Jules Verne, 1875



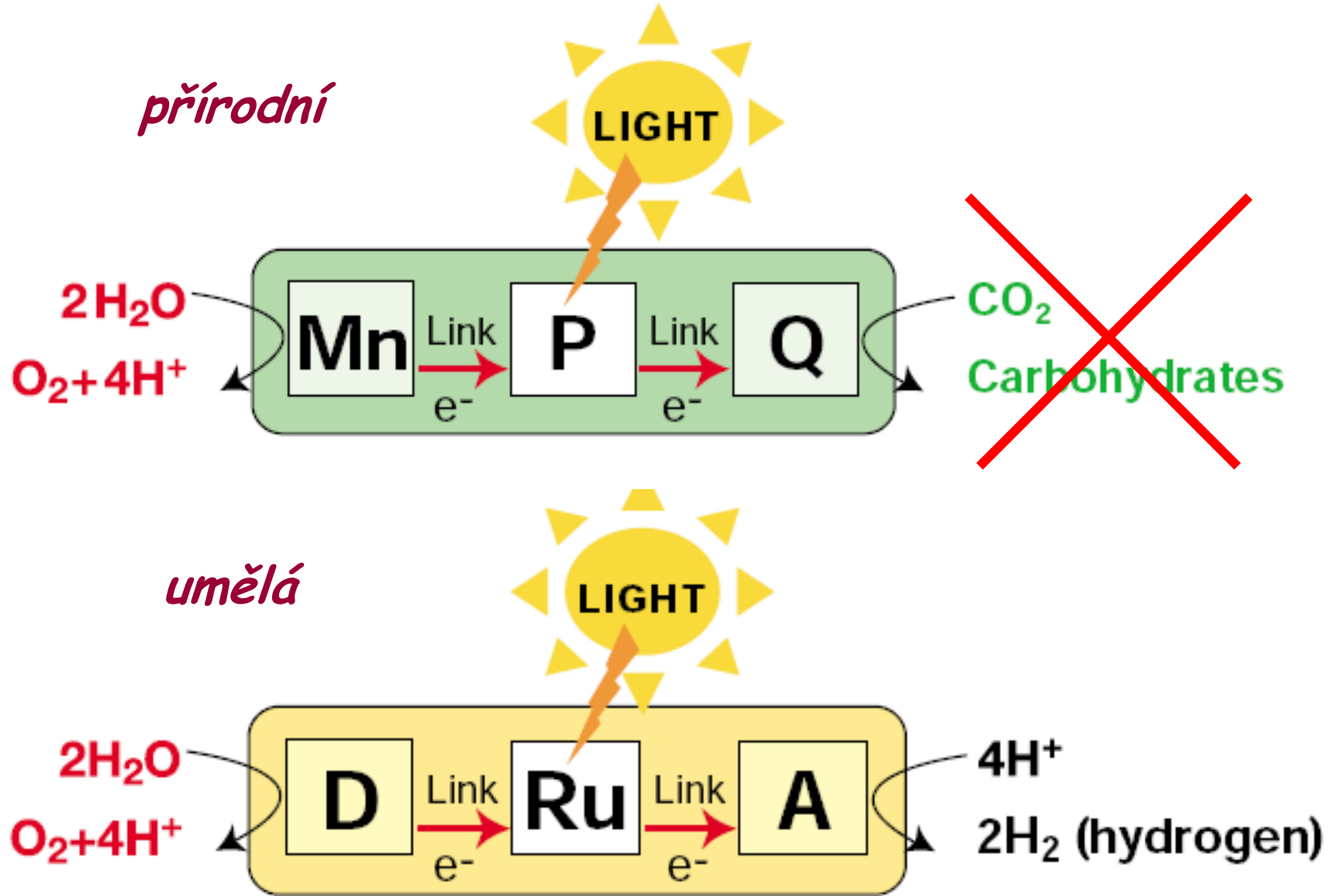
umělá fotosyntéza vodíku a kyslíku

Fotosystém II - přenos elektronu

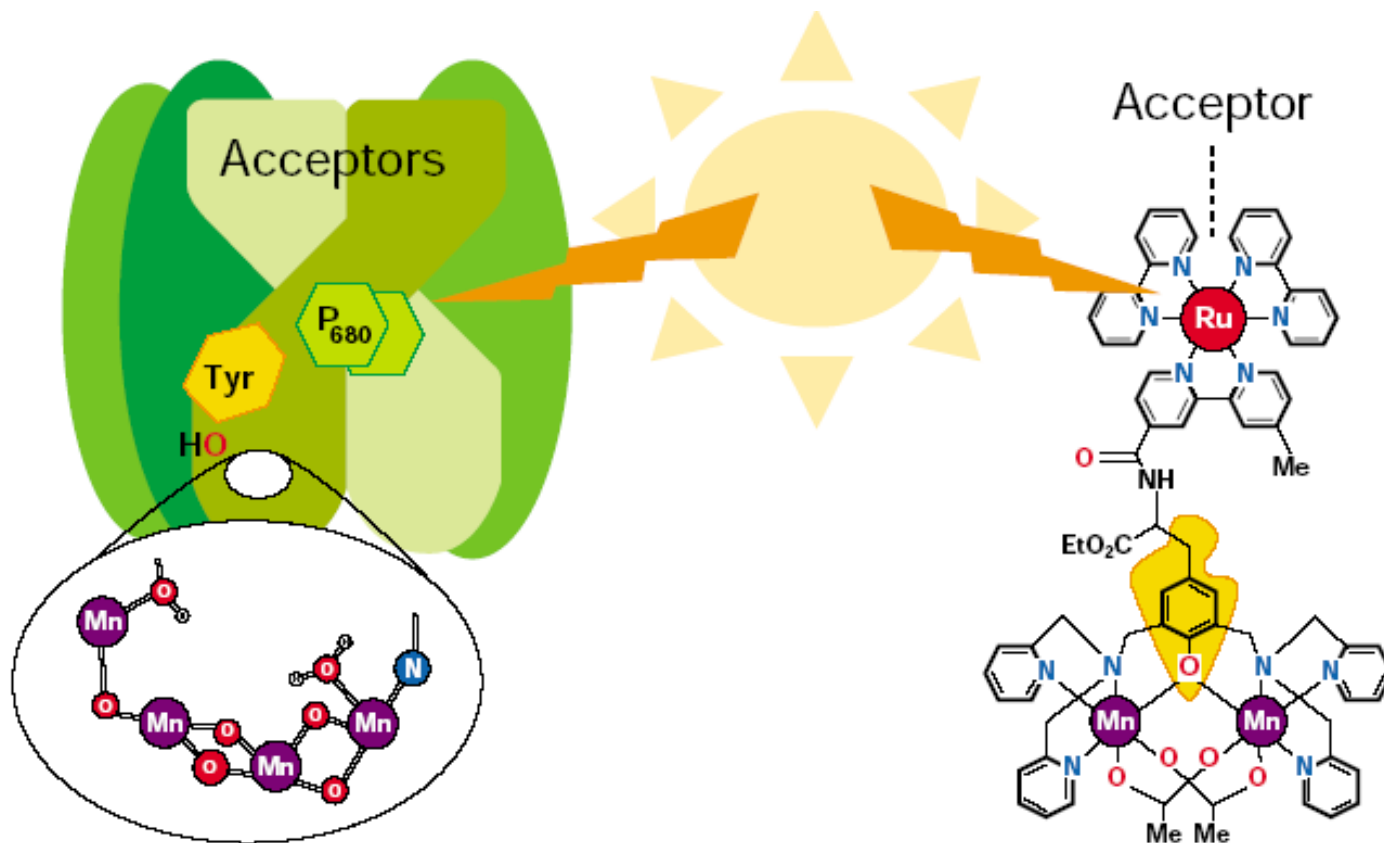


- **P680** - tzv. primární donor, chlorofyl-a, maximum absorpce 680 nm
- **Ph** - pheophytin, první akceptor elektronu
- **Q_a, Q_b** - chinony, sekundární akceptory elektronu
- **Tyr** - tyrosin, poslední přenašeč elektronu na donorové straně
- **Mn** - manganový klastr

Jak napodobit přírodní procesy



Přírodní vs. umělá fotosyntéza



Ruthenium tris-bipyridyl:

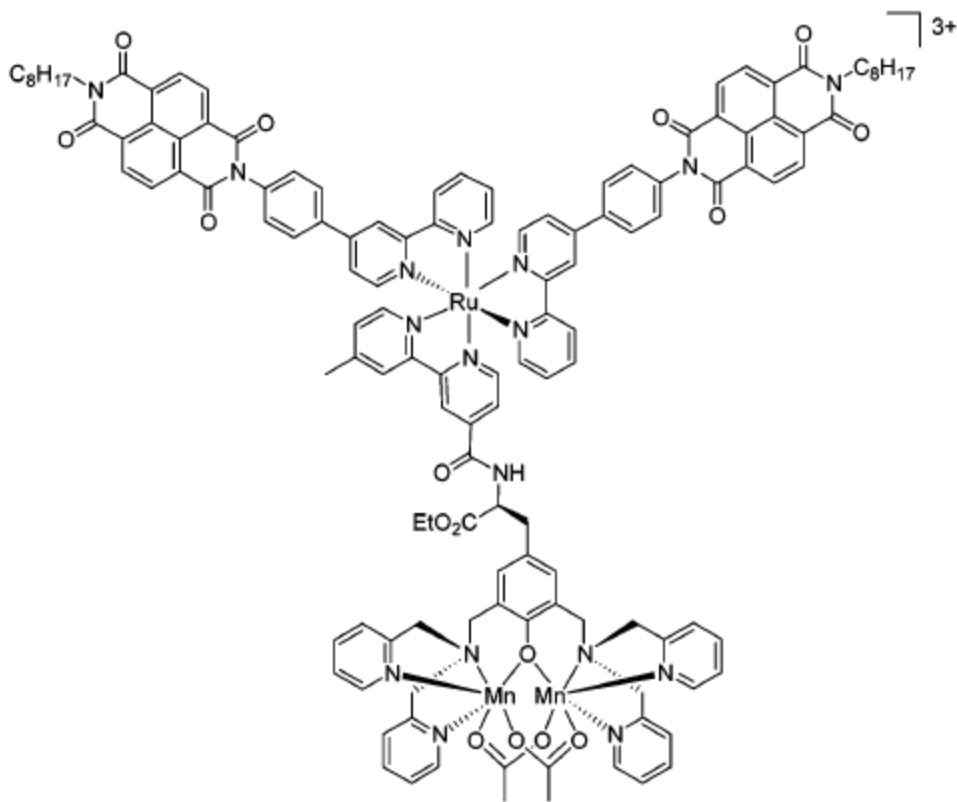
Tyrosin:

Manganový komplex:

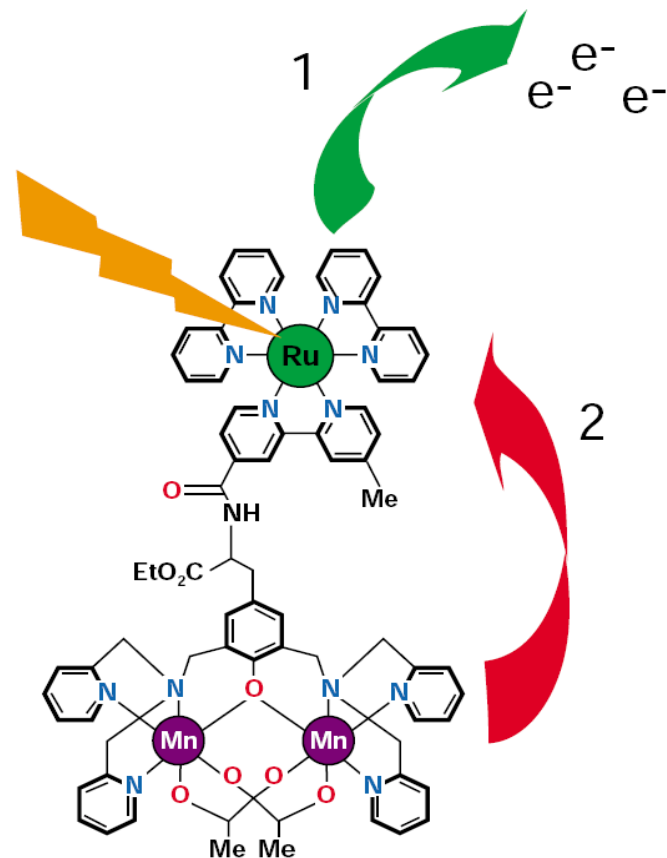
Akceptor:

primární donor, fotochemicky stabilní,
snadno chemicky modifikovatelný
intermediální přenašeč elektronu
oxidace vody
např. TiO_2

Modely umělého reakčního centra



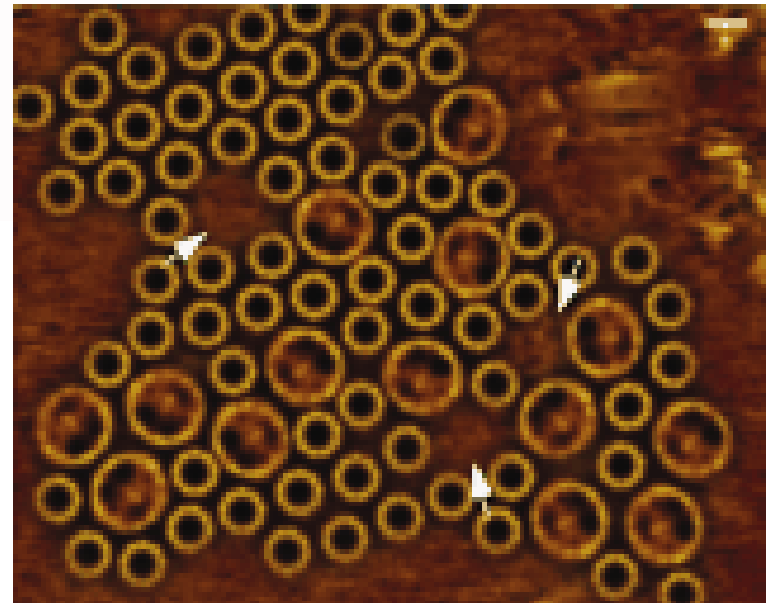
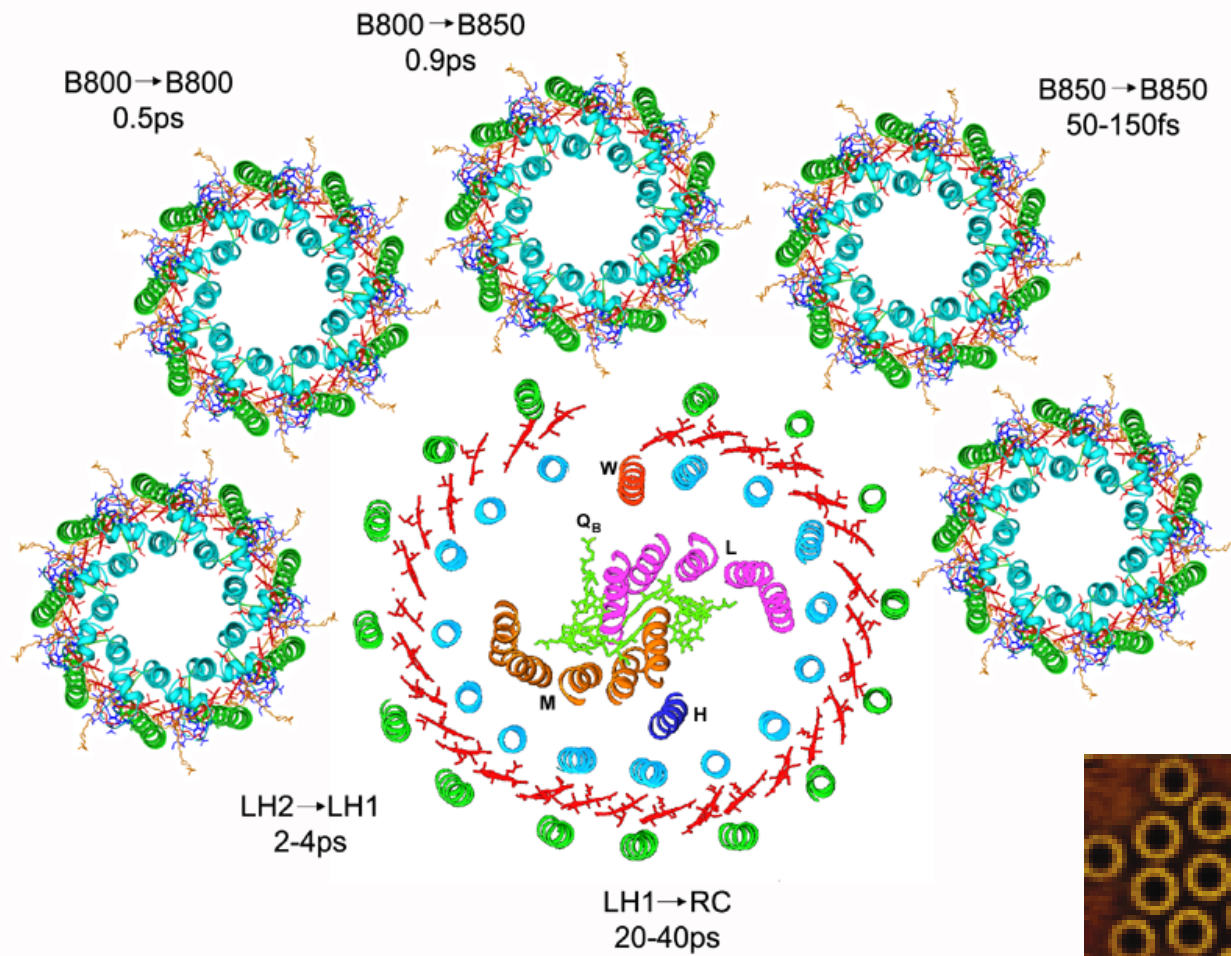
Borgstrom, JACS 2005



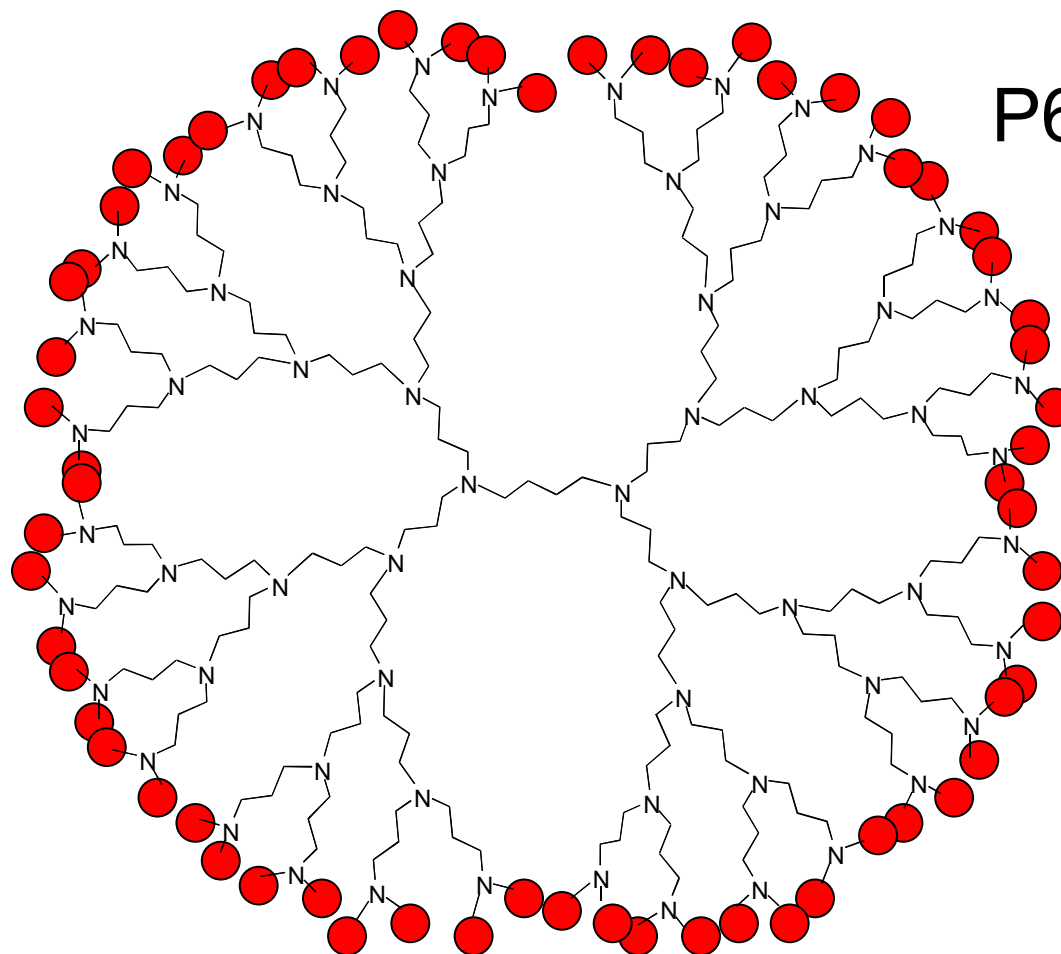
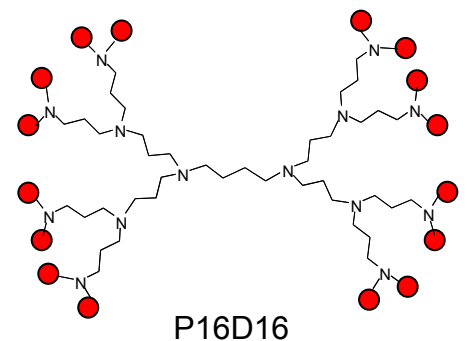
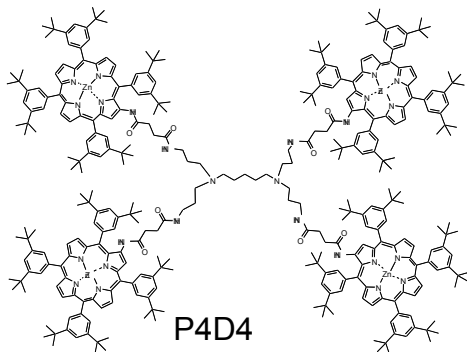
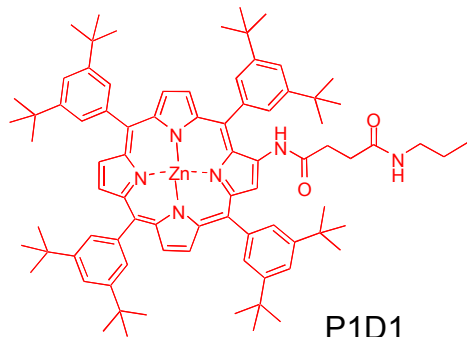
Huang, JACS 2002

Zatím neexistuje systém schopný účinného štěpení vody pomocí světla

Purpurové baktérie

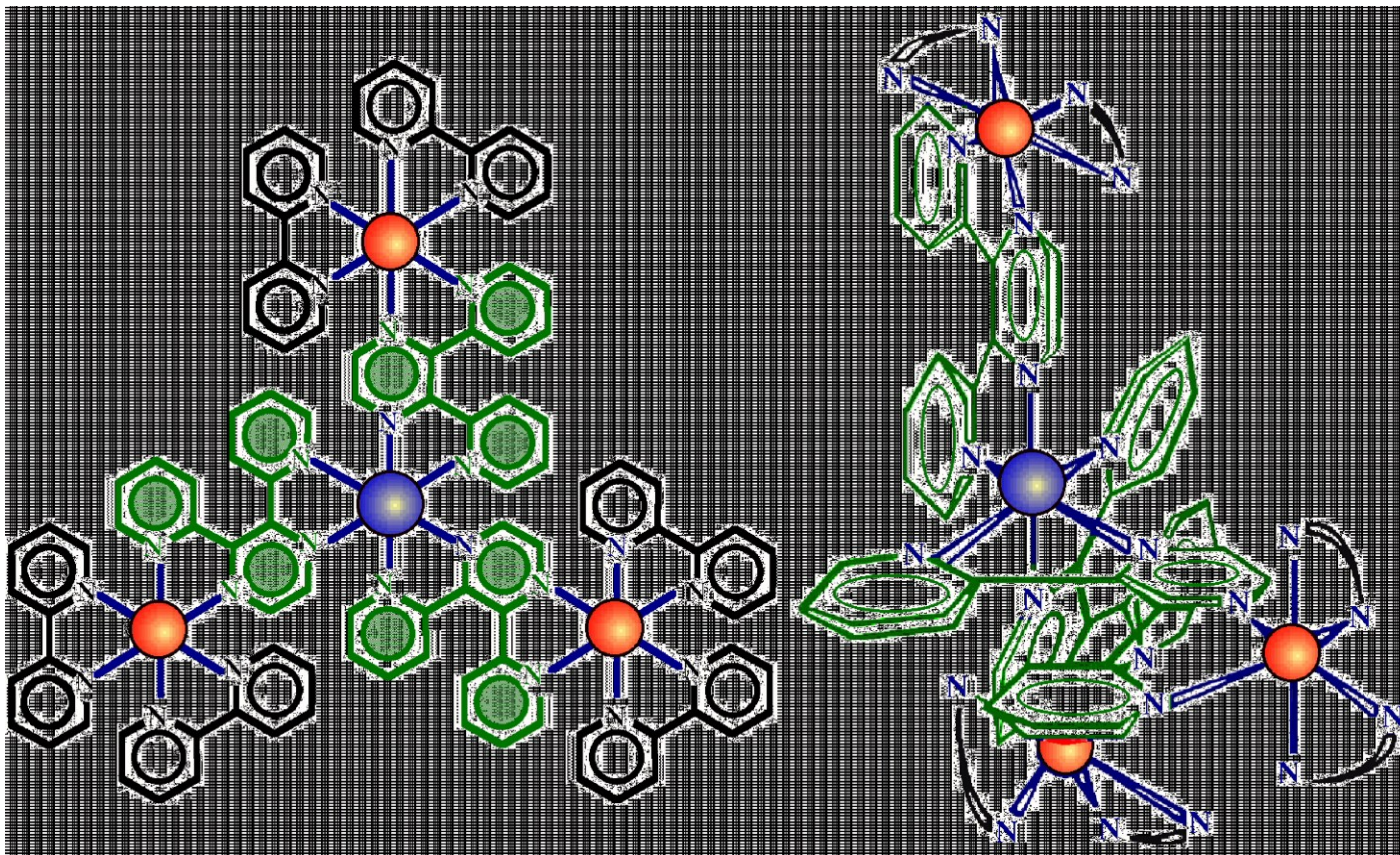


Umělé anténní systémy



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

Umělé anténní systémy



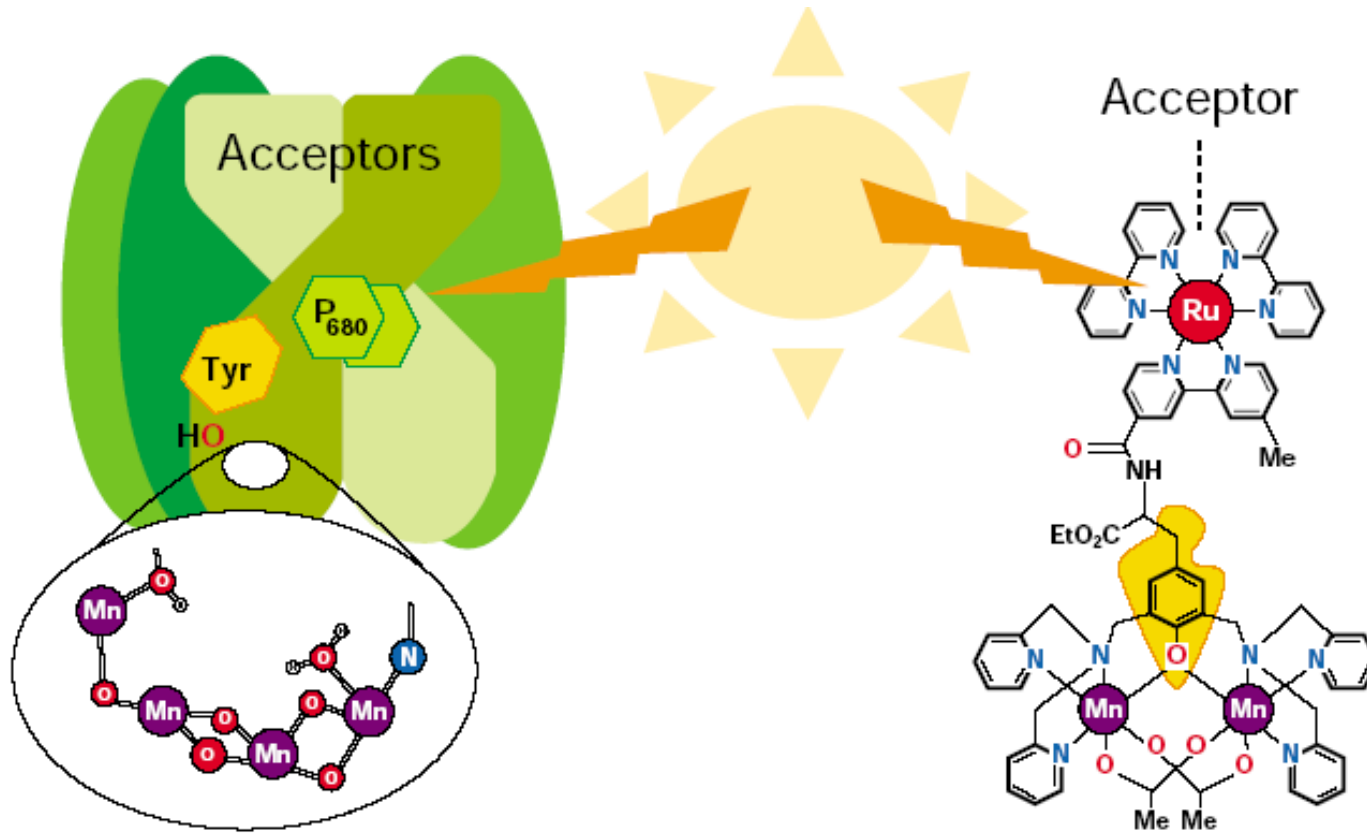
Komplexy přechodových kovů (Ru, Os)

Abs. 400-700 nm

Nízký účinný průřez, rychlý přenos energie

Sebastiano Campagna, University of Messina

Funkční problémy



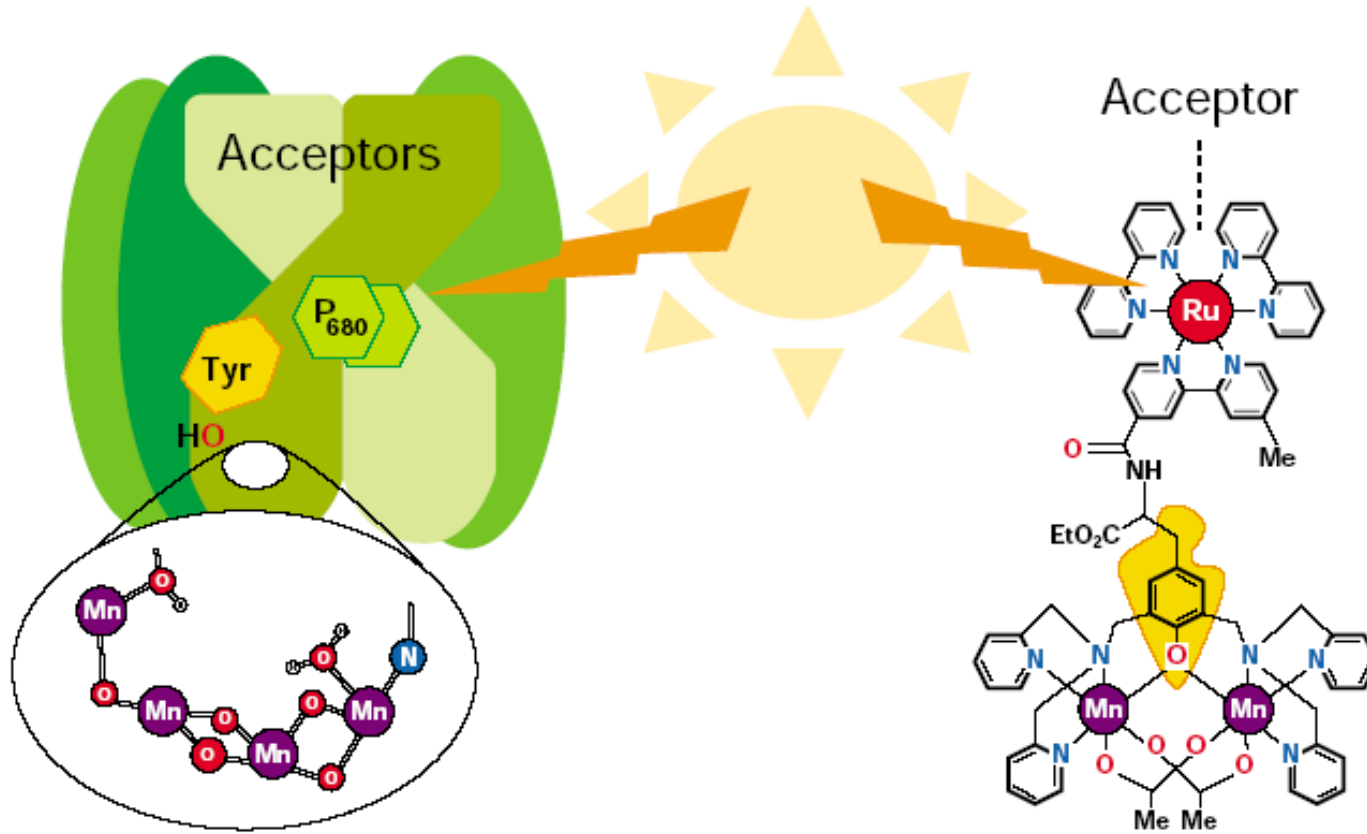
Problém struktury

Přítomnost proteinu jako nosné struktury zabraňuje tvorbě izomerů a konformerů

Možné řešení

Fixace umělých komplexů na pevné podložky nebo do nanotrubic

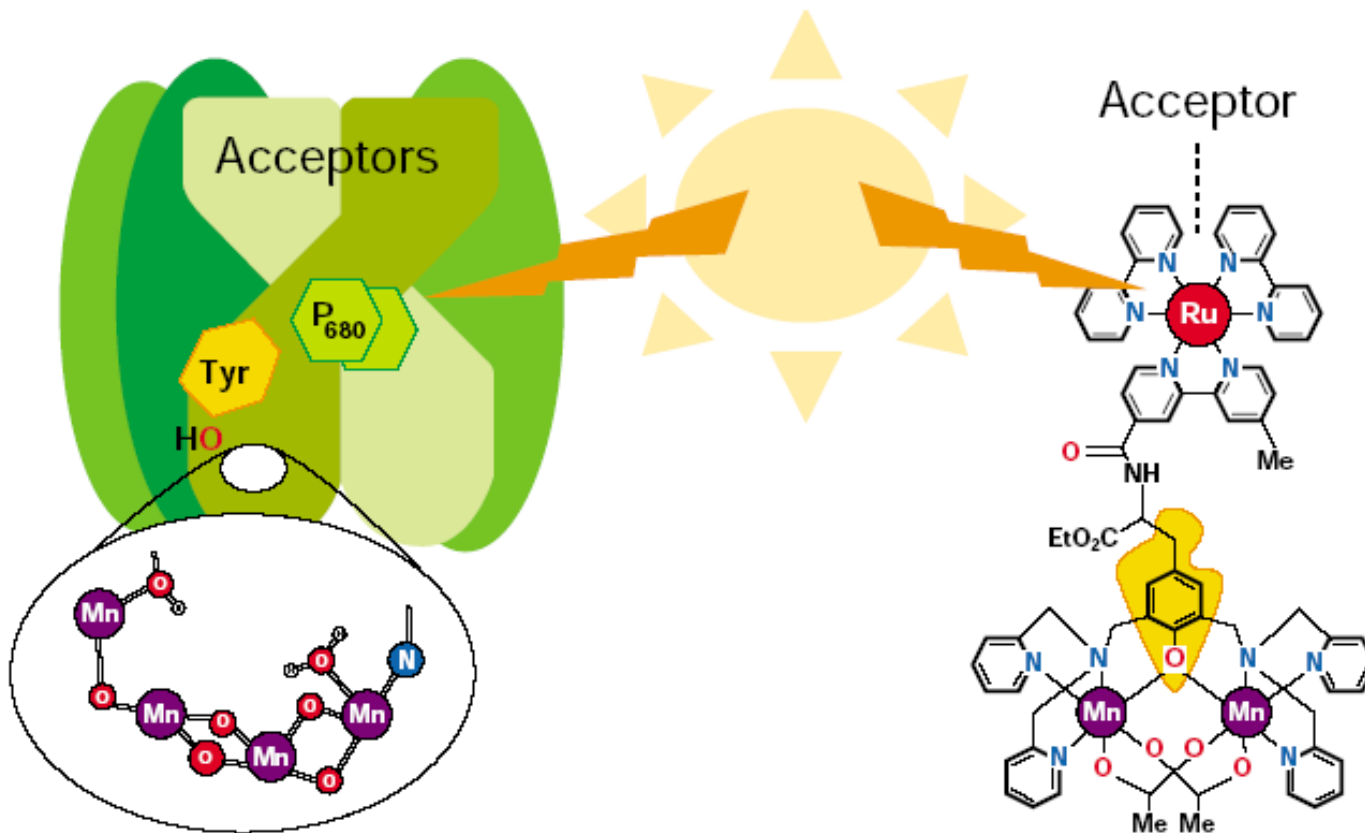
Funkční problémy



Problém znalostí

Některé funkční a strukturní detaily přírodních systémů stále neznáme

Funkční problémy



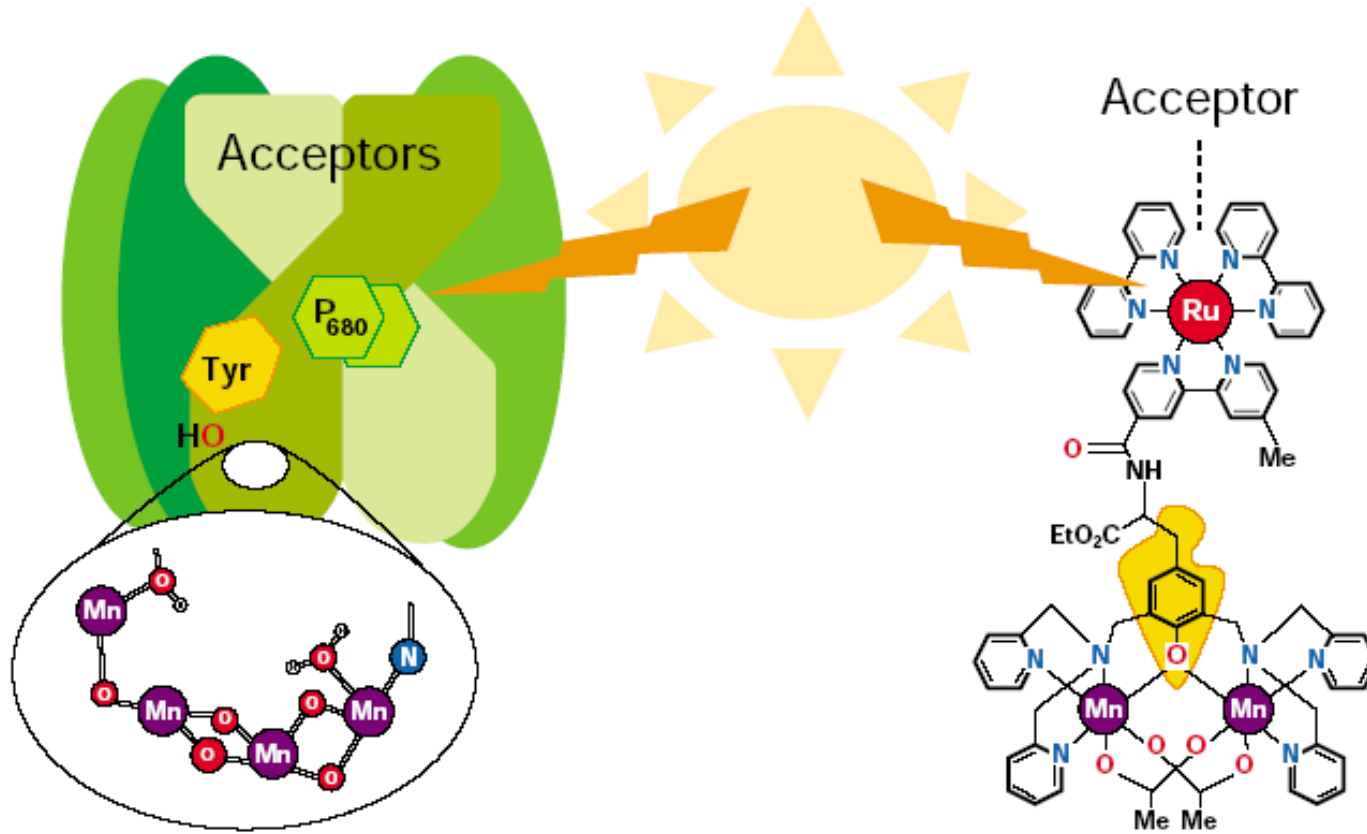
Problém účinnosti

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

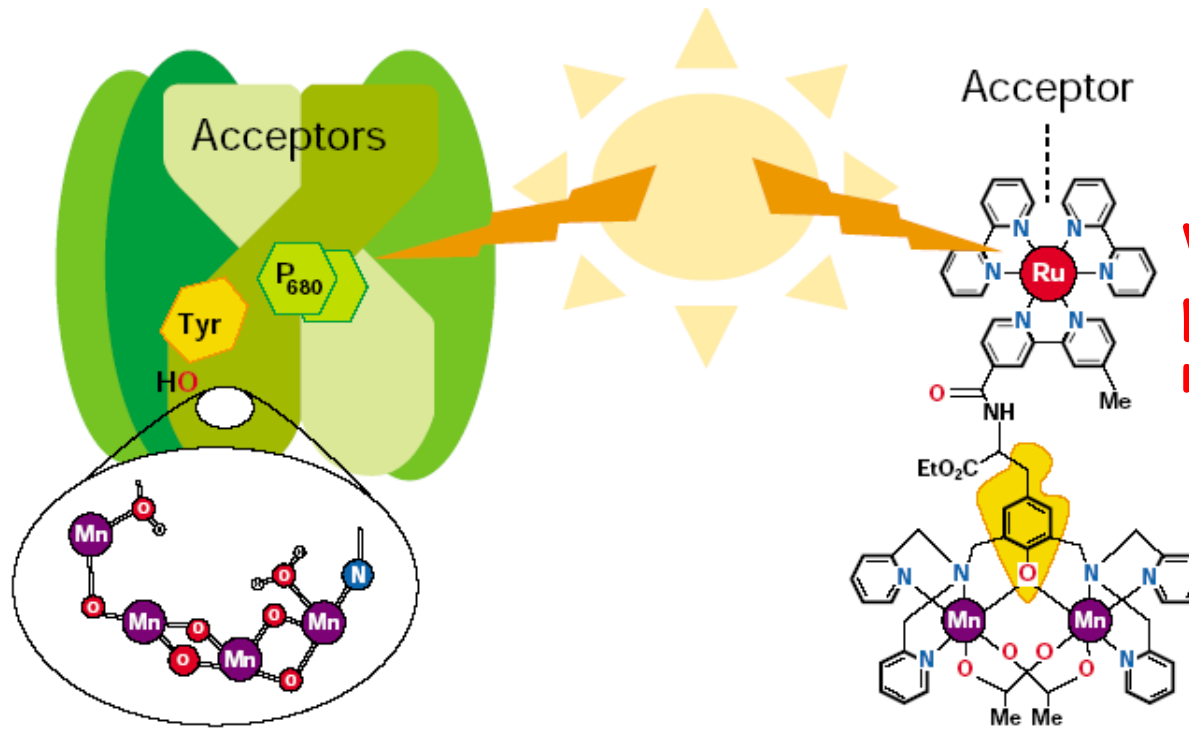


Problém konektivity

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