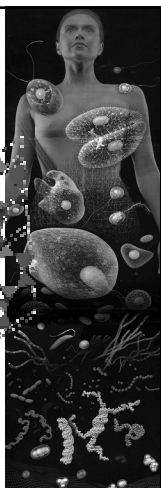
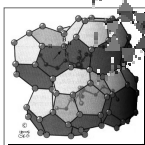


Stavební kameny života ...

... aneb co život potřebuje na fyzikálně-chemické bázi

Vladimír Kopecký Jr.

Fyzikální ústav
Matematicko-fyzikální fakulty
Univerzity Karlovy v Praze
<http://biomolecules.mff.cuni.cz>
kopecky@karlov.mff.cuni.cz



Jedinečnost uhlíku

Proč uhlík a ne něco jiného?

■ Prvky tvořící více vazeb a řetězce: B, C, N, Si, P

■ Bor

- méně valenčních elektronů (3) než sloupek (4)
- nestabilní sloučeniny

■ Dusík

- bohatý na elektrony, N–N (171 kJ/mol)
- redukována vazebná energie, řetězce nestabilní

■ Uhlík

- C–C (368 kJ/mol)
- stabilní jednoduché, dvojné a trojné vazby
- Heteronukleární vazby (proteiny: C–N–C, cukry: C–O–C, nukleové kyseliny: C–O–P–O–C) jsou méně stabilní než C–C

■ Křemík

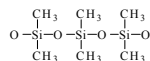
- Si–Si – slabé, dvojné a trojné nestabilní
- Si–O–Si–O (452 kJ/mol) – inertní

■ Fosfor

- mnohem nestabilnější než N

Elementární složení lidského těla

C	61,7
N	11,0
O	9,3
H	5,7
Ca	5,0
P	3,3
K	1,3
S	1,0
Cl	0,7
Na	0,7
Mg	0,3



polydimethylsiloxan

Jedinečnost uhlíku

Základní charakteristiky

- Uhlík je schopen vytvářet **stabilní struktury ve velkém teplotním rozsahu** s „většinou“ prvků
- Tvoří **stabilní dvojné i trojné vazby**, vytváří aromatické kruhy s rezonanční π -vazbou
- Stabilita uhlíkatých molekul díky tomu, že **vazebná energie C–C je mnohem větší než u jiných nekovových prvků** a je zároveň srovnatelná s vazbou C–H a C–O
- Střední hodnota elektronegativity C vede primárně k tvorbě **kovalentních vazeb**
- **Vysoká aktivační energie** (chybí volné e^- páry nebo volné valenční orbitály) stabilizuje C–H a C–X vůči vodě a kyslíku
- Výborně si vyhovuje s H_2O , má vysokou vazebnou entalpii s H, i silnou vazbu s O

Uhlík vs. křemík

Vazebné energie

Typické vazebné energie pro uhlík a křemík s jinými prvky, udáváno jako vazebná entalpie (kJ/mol)

Atom	s uhlíkem	s křemíkem
vodík	435	393
kyslík	~360	452
dusík	~305	322
chlor	351	381
uhlík	368	360
křemík	360	340

■ D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) p. 79.

Uhlík vs. křemík

Fyzikální vlastnosti

■ Některé fyzikální vlastnosti plně redukované a oxidované formy uhlíku a křemíku

Vlastnost	CH ₄	CO ₂	SiH ₄	SiO ₂
Mol. hmotnost	16,04	44,01	32,12	60,09
Bod tání [°C]	-182,50	-56,60	-185,00	1713
Bod varu [°C]	-161,50	-75,00	-112,00	2950
Hustota [g/ml]	0,424 (-164 °C)	1,03 (-20 °C, 19,7 bar)	0,68 (-186 °C)	2,65

■ D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) p. 80.

Život na bázi křemíku?

Fyzikální vlastnosti

- Křemík může tvořit dlouhé řetězce ve formě silanů, silikonů a silikátů; tvoří však **vzácně dvojné a trojné vazby**
- Křemík má větší poloměr, čili vytváří relativně slabší vazby s lehkými prvky
- Stínící efekt Si zabraňuje tvorbě π -vazeb a tudíž Si **nemůže tvořit aromatické sloučeniny**
- Si **silně reaguje s kyslíkem**, dokonce i ve vodě Si vytváří křemičitanové obálky (reakcí s kyslíkem v H₂O)
- Si **nevytváří chirální sloučeniny**
- Křemík je důležitým stopovým prvkem v živých soustavách (kyselinu křemičitou organismy užívají ke stavbě skořápek, vlasů, nehtů atp.)
- Role křemíku při vzniku života zůstává nejasná...

Život na bázi křemíku?

Život na bázi silanů

- **Silany jsou sloučeniny založené na Si–H a Si–Si vazbách**
- Silanové polymery mohou snadno v přítomnosti O přejít na křemičitany (jejich **atmosféra musí být redukční**)
- **Nesnesou přítomnosti H_2O** (z důvodu oxidace) – musí existovat za nízkých teplot
- Průběh reakcí silanů vyžaduje nízké teploty a vysoké tlaky
- V přítomnosti uhlíku by byl křemík ze sloučenin vytěsněn
- Silanové polymery se nenacházejí v meteoritech, což tuto možnost života silně diskvalifikuje

Život na bázi křemíku?

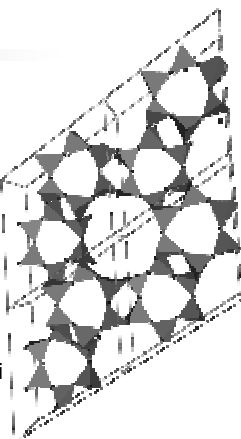
Život na bázi silikonů

- **Silikon je organo-křemičitý polymer s Si–O kostrou, fundamentální jednotkou je $(R_2SiO)_n$**
- Uhlíkaté atomy mohou být přítomny v řetězci
- Silikon je odolný vůči oxidaci a UV záření
- Silikon odpuzuje vodu, je třeba jiné rozpouštědlo, např. methan
- Reakce vyžadují vyšší teploty 50–400 °C a tlaky
- Nika pro silikonový život může být kolem teplot 200–400 °C, kde uhlíkaté makromolekuly disintegrují, v takových podmínkách se ale těžko hledá rozpouštědlo

Život na bázi křemíku?

Život na bázi silikátů

- **Silikáty jsou sole obsahující anionty Si a kyslík, základní jednotkou je Si–O tetrahedron**
- Silikáty jsou za normálních teplot inertní, pomalu reagující polymery
- Reakce vyžadují teploty >1000 °C, jsou velmi rychlé
- **Zeolity** patří nižší teplotou tání a dalšími vlastnostmi (semipermeabilitou) mezi nejlepší kandidáty
- Nejlepší podmínky pro život na bázi zeolitů (např. v lávě) jsou na Zemi, jenže nic nepozorujeme...



Uhlík vs. křemík

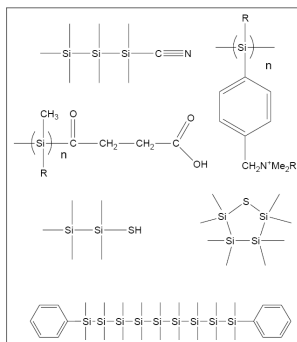
Může křemík nahradit uhlík?

- Křemík je dostatečně hojný prvek (ale méně než C)
- Neumíme si představit biochemii křemíkového života!
- **Křemík může nahradit uhlík**, ale za velmi striktních podmínek:
 - Velmi málo, lépe vůbec žádný kyslík
 - Málo nebo vůbec žádná voda
 - Teploty $>493\text{ K}$ (silikony, silikáty) nebo $<273\text{ K}$ (silany)
 - Mnohem větší tlak než na Zemi
 - Přítomnost rozpouštědla jako je methan či methanol
 - Relativní nedostatek uhlíku

Uhlík vs. křemík

Může křemík pomoci uhlíku?

- Šance na křemíkový život jsou velmi malé
- Struktura polysilanů je ale velmi bohatá (mohou být i chirální)
- Si může tvořit **dobrou kostru pro C-Si chemii**
- Si tak mohl hrát **důležitou roli při vzniku života**
- Si mohl snad hrát i roli při vzniku chiralidy pozemského života



■ S. A. Benner et al., Curr. Opin. Chem. Biol. 8 (2004) 672-689.

Život potřebuje rozpouštědlo

Je opravdu nezbytný život v roztoku?

- Kategoricky nelze odmítnout život v pevné či plynné fázi (i když je krajně nepravděpodobný...)
- Život v kapalném prostředí má jisté výhody:
 - **Stabilní prostředí** pro udržení chemických vazeb
 - **Rychlá chemická výměna** látek a transformace energie
 - Schopnost **distribuce látek** rozpustné vs. nerozpustné
 - **Udržení dostatečné koncentrace látek** v jednom místě
 - Médium určující **teplotní a tlakové rozmezí** reakcí
 - **Tlumí výkyvy** prostředí

Život potřebuje rozpouštědlo

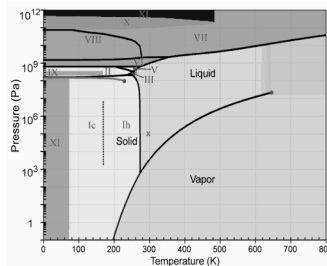
Jaké chceme vlastnosti rozpouštědla?

- **Kapalné** za podmínek na planetě převažující teploty a tlaku
 - Zahnuje teplotu tání, varu, kritickou teplotu (kapalina nemůže bez ohledu na tlak existovat) a kritický tlak (zkapalnění plynu za jeho kritické teploty)
- Dostatečná **stabilizační kapacita**
 - Specifikovaná entalpií tání a vypařování (kJ/mol energie potřebná ke změně skupenství)
- **Kapalné v co největším teplotním rozsahu**
- Vhodná **molekulární konfigurace**
 - Polarita rozpouštědla
 - Hustota a viskozita
 - Elektrická vodivost

Voda = univerzální rozpouštědlo

Základní vlastnosti H₂O

- Trojný bod vody se nachází blízko podmínek průměrných na Zemi
- **Vytváří H-můstky** (20 kJ/mol)
- Má **velký dipólový moment** (1,83 D)
- **Vytváří iontové formy** (H₃O⁺, OH⁻), které zvyšují rozpustnost
- Plně utuhne až při <-21 °C
- Existuje více než 100 známých uspořádání molekul H₂O
- Voda má ca. 40 anomálií, z nichž je značná část důležitá pro život



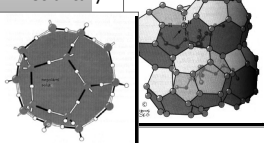
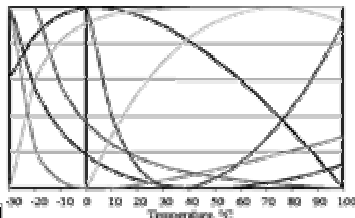
Fázový diagram vody. Křížkem vyznačeny normální podmínky, římská čísla označují různé struktury ledu.

■ M. F. Chaplin: Water structure and behaviour. <http://www.lsbu.ac.uk/water/>

Voda = univerzální rozpouštědlo

Anomálie H₂O

- Nezvykle vysoký bod tání a varu, kritický bod
- Nezvykle vysoká viskozita
- **Nejvyšší H₂O hustota při 3,984 °C** (D₂O 11,185 °C, T₂O 13,4 °C)
- Voda vytváří v roztoku neobvykle pravidelné struktury

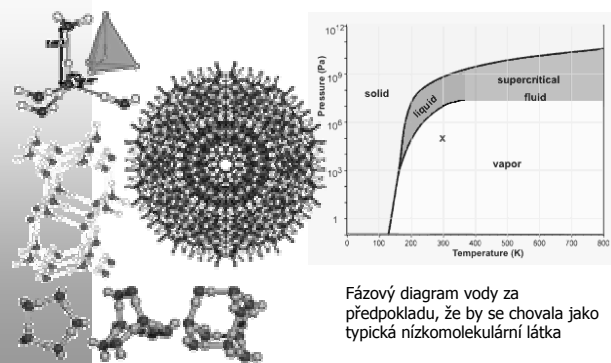


Anomálie vody v závislosti na teplotě. Barevné přiřazení je následující: **hustota, viskozita, viskozita za vysokého tlaku, kompresibilita, rychlost zvuku, specifické teplo, teplotní expansivita**

■ M. F. Chaplin: Water structure and behaviour. <http://www.lsbu.ac.uk/water/>

Voda = univerzální rozpouštědlo

Co kdyby voda měla správné vlastnosti?



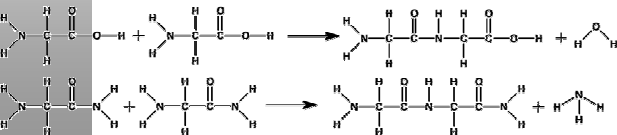
■ M. F. Chaplin: Water structure and behaviour. <http://www.lsbu.ac.uk/water/>

Polární rozpouštědla

Potenciální kandidáti

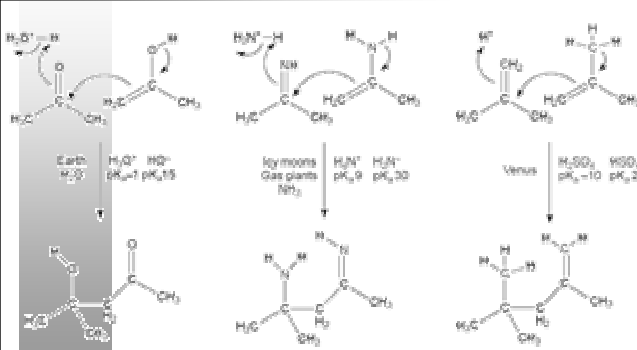
■ Amoniak NH_3

- Údajně nejlepší kandidát v náhradě vody
- Umíme si představit biochemii založenou na amoniaku
- Má horší vlastnosti, tj. větší objem, menší dipólový moment, je kapalný v malém rozsahu, není dobrým rozpouštědlem
- Disociace na N a H neposkytuje ochranu před UV zářením
- Má třetinové povrchové napětí ve srovnání s vodou, tudíž špatně koncentruje biomolekuly
- Ačkoli je amoniak ve vesmíru běžný, většinou bude působit jak kryoprotektant ve vodných roztocích



Polární rozpouštědla

Jiná chemie a přeci podobná



■ S. A. Benner et al., Curr. Opin. Chem. Biol. 8 (2004) 672–689.

Polární rozpouštědla

Potenciální kandidáti

■ Kyanovodík HCN

- Struktura velmi odlišná, vlastnosti relativně podobné, malý rozsah kapalnosti (26 °C) a v něm kompetice s vodou, nevhodná interakce s biomolekulami
- Disociuje na H^+ a CN^- , stíní před UV
- Reakce $3HCN + 2H_2O + UV \rightarrow C_2H_5O_2N + CN_2H_2$ vede ke vzniku prekursoru kyanamidu CN_2H_2 vedoucímu ke vzniku aminokyselin
- HCN slouží jako výchozí látka při vzniku purinů

■ Kyselina fluorovodíková HF

- Velmi podobná vodě co do vlastností
- Disociuje na HF_2^- (nahrazuje OH^-) a H^+ , pak F_2^{2-} může nahradit O^{2-} v oxidačních reakcích a fluorizace se může stát primárním zdrojem energie
- Fluor je 1000× méně než C, N, O

Polární rozpouštědla

Potenciální kandidáti

■ Sirovodík H_2S

- Nemá vhodnou tepelnou kapacitu, je kapalný v rozsahu pouze 26 °C, má nízký dipólový moment, disociuje na iontové formy
- Teoreticky možný kandidát v prostředí měsíce Io

■ Methanol CH_3OH

- Má vhodné vlastnosti, tj. dipólový moment, lepší tepelnou kapacitu, zůstává kapalný v širokém rozsahu od -94 °C do +65 °C
- Neexistuje ve velkém množství ve sluneční soustavě, v mezihvězdném prostoru ano

■ Hydrazin N_2H_4

- Dle vlastností je excelentní náhradou za vodu (v mnohém ji předčí)
- Je extrémně reaktivní, především za přítomnosti kyslíku
- Je velmi vzácný jak ve sluneční soustavě tak v mezihvězdném prostoru

Voda & spol.

Porovnání vody s dalšími polárními rozpouštědly

	H_2O	NH_3	HCN	HF	H_2S	CH_3OH	N_2H_4
Mol. hmotnost	18,02	17,03	27,02	20,01	34,08	32,04	32,05
Hustota [g/ml]	0,997	0,696	0,684	0,818	1,393	0,793	1,004
Bod tání [°C]	0,000	-77,7	-13,29	-83,35	-85,5	-94,0	1,60
Bod varu [°C]	100,0	-33,3	26,0	20,0	-59,9	65	113,5
Rozsah kapalnosti [°C]	100	44,4	39,3	103,4	25,9	159	111
Kritická teplota [°C]	374	132	184	188	100	240	380
Kritický tlak [bar] ²¹⁵	111	54	64,8	88	78	14,2	
Enthalpie tání [kJ/mol]	6,0	5,7	8,4	4,6	2,4	2,2	37,6
Enthalpie vyp. [kJ/mol]	40,7	23,3	25,2	30,3	18,7	40,5	95,4
Dielektr. konst.	80,1	16,6	114,9	83,6	5,9	354	51,7
Viskozita [10^{-3} P] ^{9,6}	2,7	2,0	~4,3	4,3	5,9	9,8	
Dipólový moment [D]	1,85	1,47	2,99	1,83	0,98	1,6	1,9

■ D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) p. 103.

Nepolární rozpouštědla

Potenciální kandidáti

- Nepolární rozpouštědla, jako CH_4 a C_2H_6 , jsou zajímavou náhradou vody (jsou relativně hojná ve vesmíru)
- Podporují syntézu aminokyselin a jiných biomolekul (voda působí opačně)
- Poskytují ochranu před UV zářením
- Organismy by musely mít buněčné membrány „naruby“ a i další biochemie by musela vypadat odlišně
- Na **Saturnově měsíci Titan** se předpokládá methanový déšť a jezera ethanu
 - Fotochemicky produkováný acetylen může sloužit jako zdroj energie v reakci $\text{C}_2\text{H}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{CH}_4$
 - Reakce s radikály mohou také sloužit za zdroj energie $\text{CH}_2^* + \text{N}_2 \rightarrow \text{CN}_2\text{H}_2$ nebo $2\text{CH}^* + \text{N}_2 \rightarrow 2\text{HCN}$ (jde o špatně kontrolovatelné reakce)

Voda & spol.

Porovnání vody s nepolárními rozpouštědly

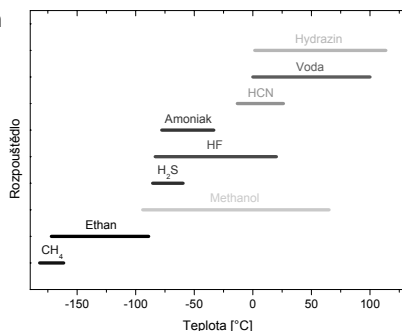
	H_2O	CH_4	C_2H_6
Mol. hmotnost	18,02	16,04	30,07
Hustota [g/ml]	0,997	0,426	0,572
Bod tání [°C]	0,000	-182,0	-172,0
Bod varu [°C]	100,0	-161,5	-89,0
Rozsah kapalnosti [°C]	100	20,5	83,0
Kritická teplota [°C]	374	-82,6	32,3
Kritický tlak [bar]	215	45,4	47,8
Enthalpie tání [kJ/mol]	6,0	0,94	2,7
Enthalpie vyp. [kJ/mol]	40,7	8,2	14,7
Dielektr. konst.	80,1	1,7	1,9
Viskozita [10^{-3} P]	9,6	0,009	0,011
Dipólový moment [D]	1,85	0,0	0,0

■ D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) p. 115.

Voda & spol.

Vzájemné porovnání rozpouštědel

Porovnání teplotních rozsahů za kterých se jednotlivá rozpouštědla vyskytují v kapalném skupenství (při normálním tlaku)



■ D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) p. 118.

Voda & spol.

Vzájemné porovnání rozpouštědel

Rozpouštědlo	Země	Ledové měsíce	Plynní obři	Io	Titan povrch	Titan pod povrchem
H ₂ O	+4	+3	+1	+1	+1	0
NH ₃	-1	+1	0	0	0	+3
HCN	+1	-1	0	-1	0	0
HF	-2	-1	-3	-2	-3	0
H ₂ S	-4	-3	0	0	-4	-2
CH ₃ OH	+1	+1	-3	0	+1	+2

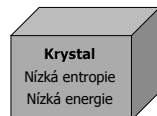
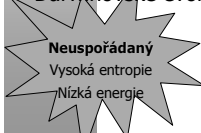
Bodová skóre: výskyt v kosmu (+ hlavní složka komet atp., – stopový), lokální výskyt (+ hlavní složka prostředí, – stopový), teplotní rozsah (+2 kapalný za lokálně převažujících podmínek, –2 pevný), entalpie vypařování (+ >40 kJ/mol, – <20 kJ/mol), dipólový moment (+ >2, – <1)

■ D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) p. 117.

Co je život?

Základní definice

- 1944 – **Erwin Schrödinger**: What is Life?
- 2002 – **Stuart Kauffmann**: „Fyzikální soustava schopná vlastní reprodukce a vykonání alespoň jednoho termodynamického pracovního cyklu“
- 2004 – **Schulze-Makuch et al.**: „Život je
 - tvořen vázaným prostředím v termodynamické nerovnováze s okolím,
 - schopný transformovat energii za účelem snížení entropie,
 - schopen uchovávat a přenášet informaci.“
- 2004 – **NASA panel**: „Život je chemický systém schopný Darwinovské evoluce“



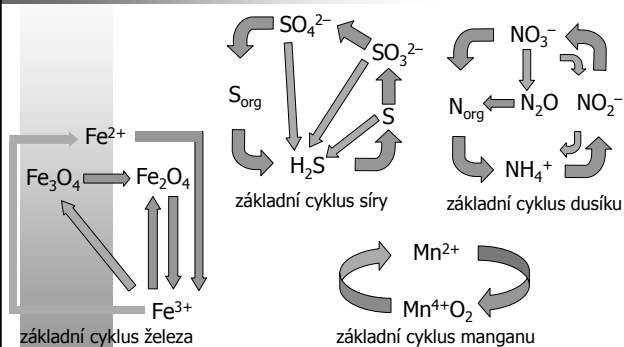
Zdroje energie jak je známe

Oxidačně-redukční reakce...

- **Aerobní dýchání** $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ (56,7 kcal/mol)
- **Nitrifikace** $\text{NH}_4^+ + 1\frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$ (65,0 kcal/mol) $\text{NO}_2^- + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-$ (17,4 kcal/mol)
- **Methanogeneze** $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ (31,7 kcal/mol)
- **Oxidace síry** $\text{S}^0 + 6\text{Fe}^{3+} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HSO}_4^- + 6\text{Fe}^{2+} + 7\text{H}^+$ (58,9 kcal/mol)
- **Redukce železa** $\text{H}_2 + 2\text{Fe}^{3+} \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{Fe}^{2+}$ (35,5 kcal/mol)
- **Oxidace železa** $2\text{Fe}^{2+} + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow 2\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O}$ (11,2 kcal/mol)
- Obdobně lze využívat i jiné látky MnO_2 , H_2S , H_2SO_4 etc.

Zdroje energie jak je známe

Oxidačně-redukční reakce



■ L. M. Prescott et al.: Microbiology, McGraw-Hill (1999) p. 383.

Zdroje energie jak je známe

Světlo jako zdroj energie

- Světlo představuje pro život prakticky „nevýčerpatelný“ zdroj energie
- Vývoj fotosyntézy je z evolučního hlediska složitý
- Energií získanou fotoautotrofií lze spočítat dle $W = hf$ kde f je frekvence záření a h Planckova konstanta
- Bakteriální chlorofyl absorbuje 800–1000 nm, karotenoidy rostlin 400–550 nm
- Průměrná výtěžnost (přes spektrum viditelného světla) je 2 eV (190 kJ/mol, 45 kcal/mol)
- Z hlediska výtěžnosti plně srovnatelné s chemoautotrofií

Zdroje energie jak je neznáme

Elektromagnetické vlnění (různé od VIS)

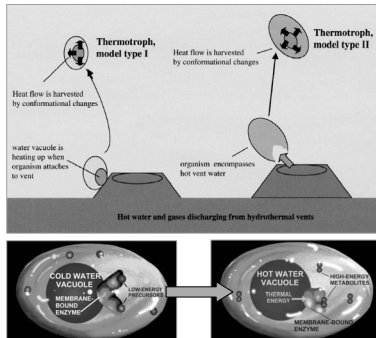
- Relativně úzké pásmo záření užívané pozemskými organismy pro fotosyntézu svědčí pro evoluční preadaptaci
- **UV záření**
 - Většina atmosféry absorbuje UV záření
 - UV záření štěpí chemické vazby a tak poškozuje biomolekuly, systémy by zřejmě musely být založeny na odlišné biochemii
- **Infračervené záření**
 - Je v principu použitelné, jen je potřeba „nadbytek“ fotonů
- **Rádiové vlny**
 - Byl navržen rezonanční mechanismus který jejich principiální užití umožňuje
 - Obecně velmi neefektivní zdroj energie

■ D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) pp. 49–76.

Zdroje energie jak je neznáme

Kapacita teplotního ohřevu

- Thermotrofní organismy mohou získávat energii v klasickém **Carnotově cyklu**
- Výtežnost je o několik řádů vyšší než u fotosyntézy
- Tepelnou energii lze převádět během cyklu na elektrickou
- Je možné, že thermotrofie byla prvotním zdrojem pozemského života a předcházela fotosyntézu

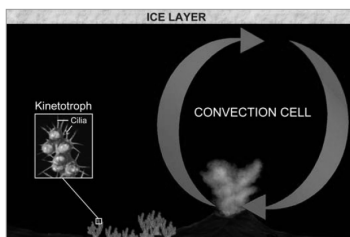


- D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) pp. 49–76.
- D. Schulze-Makuch et al., Astrobiol. 2 (2002) 105.

Zdroje energie jak je neznáme

Kinetická energie

- Kinetickou energii lze používat přímo v podobě proudů či konvekční cel
- Organismus mající bičiky či brvy může mechanické pnutí převádět na elektrický proud (pomocí indukovaného náboje na makromolekulách)
- Brvy mohou obsahovat kanály, otevírané mechanickým napětím, které zajišťují elektrochemický gradient
- Podobný systém brv na citlivé čáře využívají ryby (ovšem k něčemu jinému)

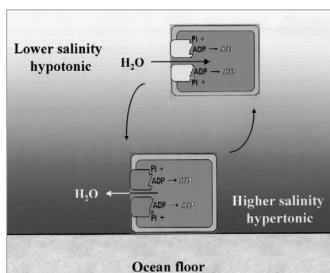


- D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) pp. 49–76.

Zdroje energie jak je neznáme

Osmotické a iontové gradienty

- Osmotický tlak $P_0 = cRT$, kde c je koncentrace rozpouštědla, R universální plynová konst. a T teplota ($P_0 \sim 16,9$ atm.), může sloužit za zdroj energie např. prostřednictvím solného gradientu
- Výsledný výtěžek lze spočítat jako $F = P_0 \cdot A$, A je účinný průřez molekuly ($F \sim 10^{-13}$ N), poté $W = F \cdot s$, kde s je dráha molekuly podél gradientu (pro membránu buňky 10^{-8} m)
- **Vychází 0,007 eV, tj. 1 ATP na 45 molekul H_2O**



- D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) pp. 49–76.

Zdroje energie jak je neznáme

Magnetické a gravitační pole

■ Magnetické pole

- K získání energie lze použít Lorentzovskou sílu ($F_L = q(E + v \times B)$), $W = F_L \cdot s$, kde s je vzdálenost mezi separovanými náboji
 - Vyžaduje velmi silná magnetická pole
 - Při velikosti bakterie (10^{-6} m) vychází výtěžek 10^{-11} eV, tj. **o 11 řádů nižší než u fotoautotrofie**
- Lze použít magnetickou indukci v oscilujícím magnetickém poli
 - S uvážením plochy bakterie vychází výstupní energie **o 23 řádů nižší než u fotosyntézy**

■ Gravitační pole

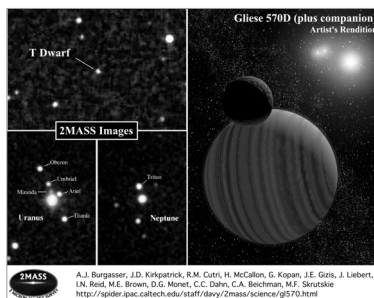
- Vynášením částic v gravitačním poli lze získat energii $W = m \cdot g \cdot h$
- Přenesením protonu na průměru bakterie získáme 10^{-13} eV, v případě těžších částic ($\sim 10^6$ Da) až 10^{-7} eV
- Ačkoli mikroorganismy pociťují gravitační pole, je pro získání energie nepoužitelné

■ D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) pp. 49–76.

Exotické formy života

Život na hnědém trpaslíku

- Hnědí trpaslíci jsou objekty jejichž hmotnost nebyla dostatečná pro zapálení termojaderné fúze
- Život by se musel vypořádat se 100× gravitací než na Zemi, adaptací na IČ záření, nedostatkem kovových prvků
- Pravděpodobnější je život na planetách kolem hnědých trpaslíků v raných fázích jejich vývoje



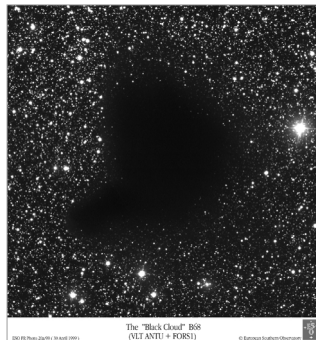
A.J. Burgasser, J.D. Kirkpatrick, R.M. Cutri, H. McCallon, G. Kopan, J.E. Gizis, J. Liebert, L.N. Reid, M.E. Brown, D.G. Monet, C.C. Dahn, C.A. Beichman, M.F. Skrutskie
<http://spider.ipac.caltech.edu/staff/burgasser/2mass/science/gl570.html>

■ D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) pp. 141–147.

Exotické formy života

Černý mrak Freda Hoyla

- Idea pochází ze sci-fi F. Hoyla „The black cloud“ (Signet, New York 1959)
- Obří oblak mezihvězdné hmoty s organizací podobnou živé soustavě
 - „krev v plynné fázi“
 - energii získává ze světla hvězd
 - biologické pochody se odehrávají na elektromagnetické bázi
- Výhodou je stav beztláče a dostatek energie
- Nevýhody – nízká hustota mezihvězdné látky, kosmické záření, evoluce, replikace



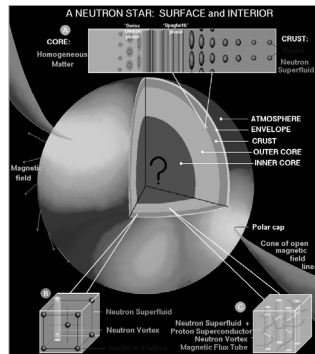
The "Black Cloud" B2-207 (VLT ANTU + FORS1)
 © European Southern Observatory

■ D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) pp. 141–147.

Exotické formy života

Život na neutronové hvězdě

- Život na neutronové hvězdě by musel být postaven na bázi **silné interakce** a nikoli elektromagnetické
- Silné magnetické síly by mohli vytvářet polymerní řetězce jader
- Neortodoxní idea, ale naprosto nedořešená...
- Neutronové hvězdy mají planety a život na nich by mohl těžit ze silných magnetických polí jako zdroje energie

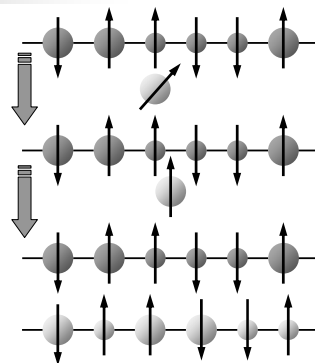


■ D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) pp. 141–147.

Exotické formy života

Život založený na spinových konfiguracích

- Organismus s He vnitřkem s vnitřní vrstvou o-H a vnější p-H (v pevném stavu)
- Existence je možná pouze v oceánu kapalného H, hvězda musí zářit v mikrovlnné oblasti
- Není jasné jak by se informace přenášela a jak by organismus bojoval s entropií



■ D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) pp. 141–147.

Doporučená literatura

- S. A. Benner, A. Ricardo, M. A. Carrigan: Is there a common chemical model for life in the universe? Current Opinion in Chemical Biology 8 (2004) 672–689.
{Přehledový článek plný úvah o základních kamenech a strukturách molekul}
- E. Schrödinger: **What is life?** The physical aspect of the living cell. Cambridge University Press, Cambridge 1944.
{Nejlepší kniha, z pera zakladatele kvantové teorie, která ilustruje způsob fyzikálního uvažování nad základy života}
- D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: **Life in the universe: Expectations and constraints.** Springer, Berlin 2004.
{Přehledová kniha o astrobiologii věnovaná fyzikálně-chemickým základům života a jeho omezením}

Stavební kameny jsou různé...



... a každý má rád ty své!
