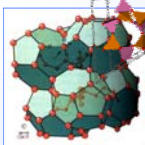


Stavební kameny života ...

... 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 slupek (4)
- nestabilní sloučeniny

Dusík

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

Uhlík

- C-C (368 kJ/mol)
- stabilní jednoduché, dvojná a trojná 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

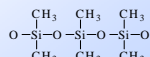
- Si-Si - slabé, dvojná a trojná nestabilní
- Si-O-Si-O (452 kJ/mol) - inertní

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 dvojná i trojná vazby**, vytváří aromatické kruhy s rezonanční π -vazbou
- Stabilita uhlikatých 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 dvojně a trojně 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 (kyselina 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**)
- **Nesou přítomnosti H₂O** (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 vytěsňen
- Silanové polymery se nenacházejí v meteoritech, což tuto možnost života silně diskvalifikuje

Život na bázi křemíku?

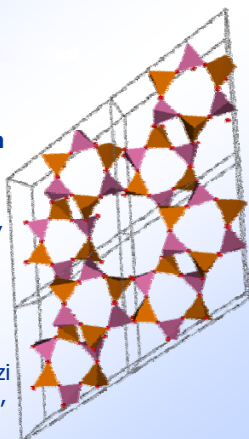
Život na bázi silikonů

- Silikon je organo-křemičitý polymer s Si–O kostrou, fundamentální jednotkou je (R₂SiO)_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

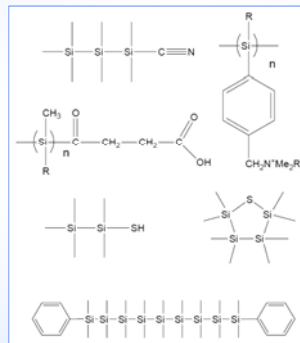
Může křemík nahradit uhlík?

- 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 K (silikony, silikáty) nebo <273 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

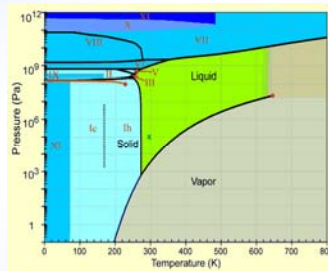
Jaké chceme vlastnosti rozpouštědla?

- **Kapalné** za podmínek na planetě převažující teploty a tlaku
 - Zahrnuje 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
- M. F. Chaplin: Water structure and behaviour. <http://www.lsbu.ac.uk/water/>

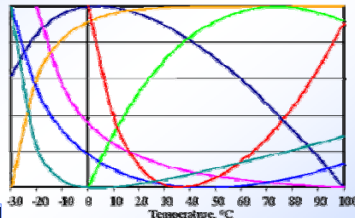


Fázový diagram vody. Křížkem vyznačeny normální podmínky, římská čísla označují různé struktury ledu.

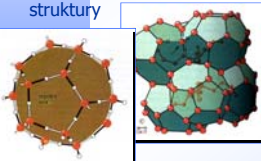
Voda = univerzální rozpouštědlo

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

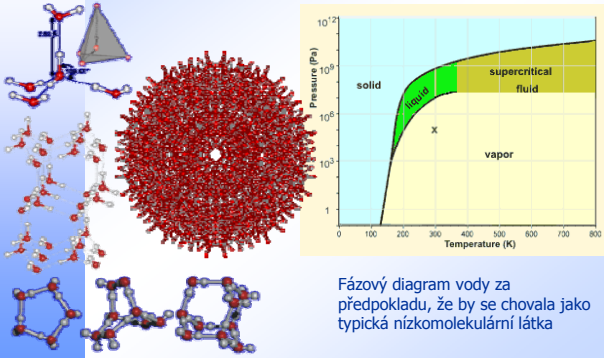


Anomálie vody v závislosti na teplotě. Barevné přiřazení je následující: **hustota**, **viskozita**, **viskozita za vysokého tlaku**, **kompresibilita**, **rychlost zvuku**, **specifické teplo**, **teplotní expansivita**



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

Voda = univerzální rozpouštědlo Co kdyby voda měla správné vlastnosti?

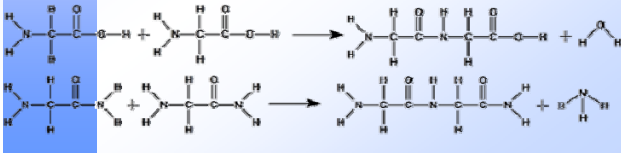


■ M. F. Chaplin: Water structure and behaviour. <http://www.lsbu.ac.uk/water/>

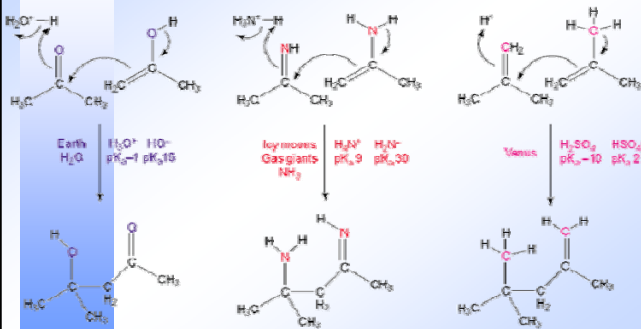
Polární rozpouštědla Potenciální kandidáti

■ 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 $3\text{HCN} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{UV} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2\text{N} + \text{CN}_2\text{H}_2$ vede ke vzniku prekurzoru kyanamidu CN₂H₂ vedoucímu ke vzniku aminokyselin
- HCN slouží jako výchozí látka při vzniku purinů

■ Kyselina fluorovodíková HF

- Velmi podobná vodě co do vlastností
- Disociuje na HF²⁻ (nahrazuje OH⁻) a H⁺, pak F₂²⁻ může nahradit O²⁻ v oxidačních reakcích a fluorizace se může stát primárním zdrojem energie
- Fluoru je 1000× méně než C, N, O

Polární rozpouštědla Potenciální kandidáti

■ Sirovodík H₂S

- 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 CH₃OH

- 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 N₂H₄

- 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 ₂ O | NH ₃ | HCN | HF | H ₂ S | CH ₃ OH | N ₂ H 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 produkovaný 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 $\text{CH}_2^{\bullet} + \text{N}_2^{\bullet} \rightarrow \text{CN}_2\text{H}_2$ nebo $2\text{CH}^{\bullet} + \text{N}_2^{\bullet} \rightarrow 2\text{HCN}$ (jde o špatně kontrolovatelné reakce)

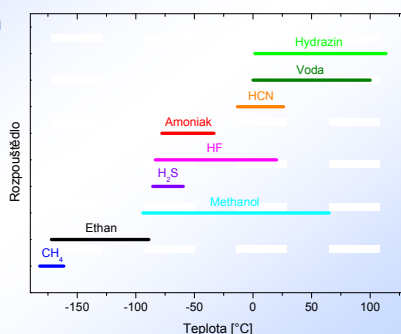
Voda & spol. Porovnání vody s nepolárními rozpouštědly

| | 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“

Neuspořádaný

Vysoká entropie
Nízká energie

Krystal

Nízká entropie
Nízká energie

Živá buňka

Nízká entropie
Vysoká energie

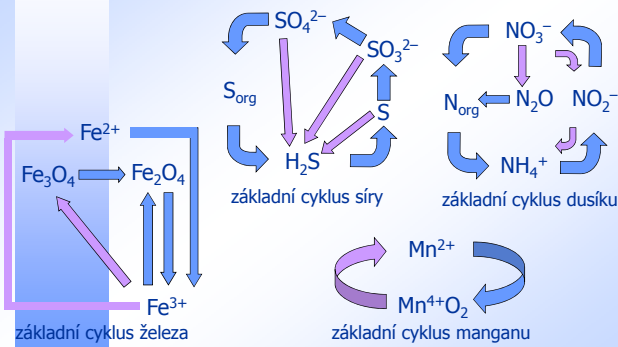
Zdroje energie jak je známe

Oxidačně-redukční reakce...

- **Aerobní dýchání** $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ (56,7 kcal/mol)
- **Nitrifikace** $NH_4^+ + 1\frac{1}{2}O_2 \rightarrow NO_2^- + H_2O + 2H^+$ (65,0 kcal/mol)
 $NO_2^- + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow NO_3^-$ (17,4 kcal/mol)
- **Methanogeneze** $4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$ (31,7 kcal/mol)
- **Oxidace síry** $S^0 + 6Fe^{3+} + 4H_2O \rightarrow HSO_4^- + 6Fe^{2+} + 7H^+$ (58,9 kcal/mol)
- **Redukce železa** $H_2 + 2Fe^{3+} \rightarrow 2H^+ + 2Fe^{2+}$ (35,5 kcal/mol)
- **Oxidace železa** $2Fe^{2+} + \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ \rightarrow 2Fe^{3+} + H_2O$ (11,2 kcal/mol)
- Obdobně lze využívat i jiné látky MnO₂, H₂S, H₂SO₄ 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 „nevyčerpatelný“ zdroj energie
- Vývoj fotosyntézy je z evolučního hlediska složitý
- Energii 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)

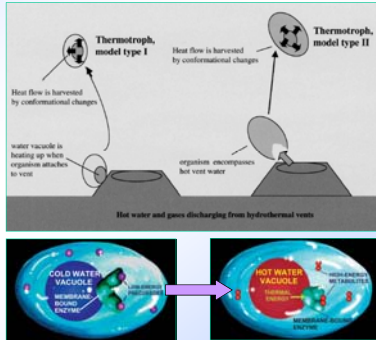
- Relativně úzké pásmo záření užívané pozemskými organismy pro fotosyntézu svědčí pro evoluční preadaptaci
- **UV záření**
 - Většina atmosféry absorbuje UV záření
 - UV záření štěpí chemické vazby a tak poškozuje biomolekuly, systémy by zřejmě musely být založeny na odlišné biochemii
- **Infracervené záření**
 - Je v principu použitelné, jen je potřeba „nadbytek“ fotonů
- **Radiové 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**
- Výťažnost 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

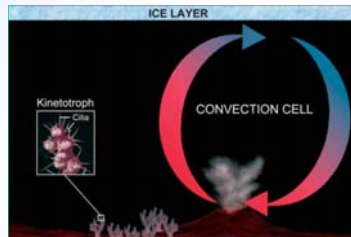


- D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) pp. 49–76.
- D. Schulze-Makuch et al., Astrobiol. 2 (2002) 105.

Zdroje energie jak je neznáme

Kinetická energie

- Kinetickou energii lze používat přímo v podobě proudů či konvekčních cel
- Organismus mající bičky 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)

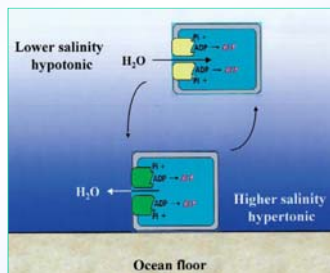


- D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) pp. 49–76.

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 ($P_0 \sim 16,9 \text{ atm.}$), může sloužit za zdroj energie např. prostřednictvím solného gradientu
- Výsledný výtěžek lze spočítat jako $F = P_0 \cdot A$, A je účinný průřez molekuly ($F \sim 10^{-13} \text{ N}$), 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
 - Vyzaduje 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

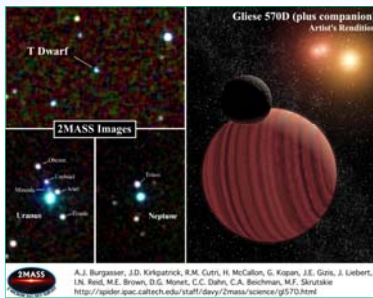
- Vynášením částic v gravitačním poli lze získat energii $W = m \cdot g \cdot h$
- Přenesením protonu na průměru bakterie získáme 10^{-13} eV, v případě těžších částic ($\sim 10^6$ Da) až 10^{-7} eV
- Ačkoli mikroorganismy pociťují gravitační pole, je pro získání energie nepoužitelné

■ 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 $100 \times$ 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. Gutri, H. McCallon, G. Koppar, J.E. Gett, J. Liebert, L.N. Rose, M.E. Brown, D.G. Marani, C.C. Dahn, C.A. Beichman, M.E. Srinivasan
<http://spider.spac.caltech.edu/staff/bvay/zmass/science/g570.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



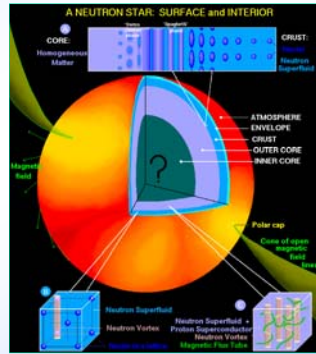
The "Black Cloud" B99 (VLX ANTI + FORB1)
© European Southern Observatory

■ 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

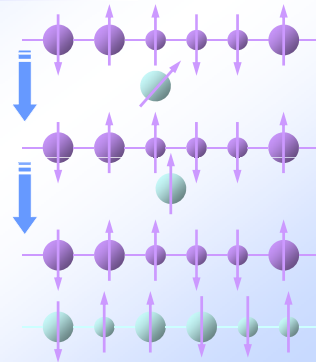


■ D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin: Life in the universe. Springer (2004) pp. 141–147.

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. (Česky – E. Schrödinger: Co je života/Duch a hmota/K mému životu. VUTIUM, Brno 2004.) {Nejllepší 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...

DVĚ KOSTIČKY ANTIHUMOTY JAKO OBVYKLE, TAKÉ PROFESORÉ ?



... a každý má rád ty své!
