

Vzácná Země a pouť života...

... aneb střípky z astrobiologie

Vladimír Kopecký Jr.

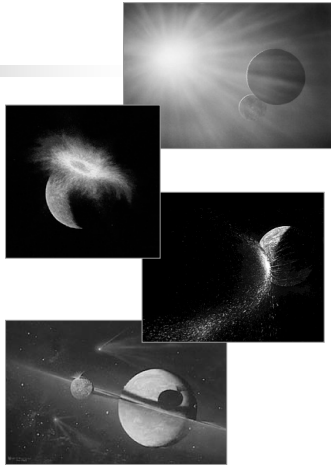
Fyzikální ústav
Matematicko-fyzikální fakulty
Univerzity Karlovy v Praze
<http://biomolecules.mff.cuni.cz>
kopeccky@karlov.mff.cuni.cz



Jedinečný Měsíc

Kde se Měsíc vzal?

- Měsíc vznikl před ca. 4,5 Gy srážkou Země s tělesem o velikosti Marsu (ca. 1/2 průměru Země)
- Z vyvržené hmoty se postupně zformovalo těleso Měsíce
- Základní myšlenka pochází od Hartmanna & Davise z roku 1975)
- Možnost zachycení tělesa o velikosti Měsíce (ca. 0,27 průměru Země) je opravdu nepravděpodobná...



Jedinečný Měsíc

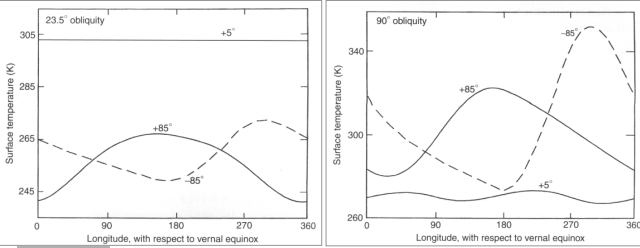
K čemu je Měsíc dobrý?

- Stabilizuje rotační osu Země
- Způsobuje proměnné prostředí v přílivových zónách – vytváří tak přechodné prostředí
- Odebral část momentu hybnosti – zpomalil rotaci Země na únosnou míru (původní rotace by působila trvalé větry 200 km/h)
- Při vzniku „přidal“ něco hmoty Zemi
- Měsíc „funguje“ pouze proto, že jde o dvojplanetu Země–Měsíc (těžiště leží 1400 km pod povrchem Země)
- Existence a vznik soustavy Země–Měsíc je krajně nepravděpodobná...



Jedinečný Měsíc

Co by bylo kdyby Měsíce nebylo



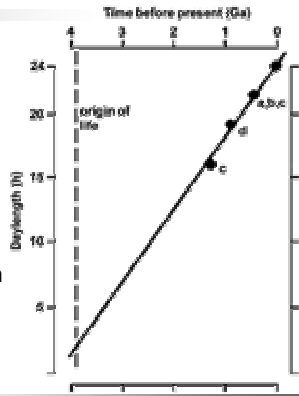
Model klimatických změn na Zemi bez Měsíce. Nepřítomnost Měsíce dovoluje masivní změny sklonu rotační osy od současné stabilní polohy 23,5° (vlevo) až po 90° (vpravo). Vyneseny jsou průběhy teplot pro polohu blízko rovníku 5° a poblíž pólu 85° (plná čára = severní, přerušovaná = jižní hemisféra). Na pólech může teplota oscilovat během roku od bodu mrazu až po 80 °C.

■ S. C. Morris: Life's solution. Cambridge University Press (2003) p. 91.

Jedinečný Měsíc

Nic není zadarmo...

- Poměr velikostí Země vs. Měsíc vede k **vázané rotaci**
- Měsíc byl před 3,9 Gy vzdálen pouze 200 000 km, nyní je 380 000 km
- **Rotace Země se postupně zpomaluje** z ~2 hodin na ~52 hodin (při plně vázané rotaci)
- Rychlá rotace spolu s mnohem větším přílivem mohla hrát roli při vzniku života – **nahrazuje průběh PCR reakcí**

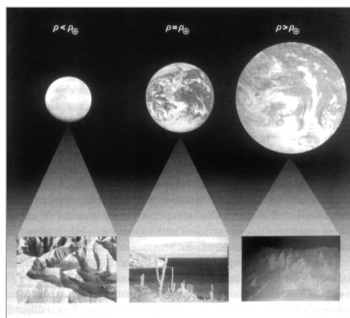


■ R. Lathe, Icarus 168 (2004) 18-22.

Jedinečnost Země

Velikost planety

- **Menší Země** (slabší gravitace)
 - Slabší atmosféra
 - Vyšší vyvrásněná horstva
 - Následně nižší povrchová teplota
 - Silnější litosféra (možný zánik deskové tektoniky)
- **Větší Země** (silnější gravitace)
 - Pravděpodobně pokryta globálním oceánem
 - Neexistence kontinentů výrazně snižuje oběh živin



■ S. C. Morris: Life's solution. Cambridge University Press (2003) p. 91.

Obyvatelnost Země

Uhličitno-křemičitanový stabilizující cyklus

- **Koncentrace CO₂ v atmosféře je kontrolována pomalou interakcí s horninami** (v časech >10⁶ let)
 - Křemičitany by odebraly veškeré CO₂ za 400 Myr
 - Uhličitno-křemičitanový cyklus navrhl H. Urey roku 1952
 - CO₂ je odstraňováno z atmosféry interakcí s Ca a Mg křemičitany (např. s wollastonitem CaSiO₃) a následně ukládáno v podobě uhličitánů:

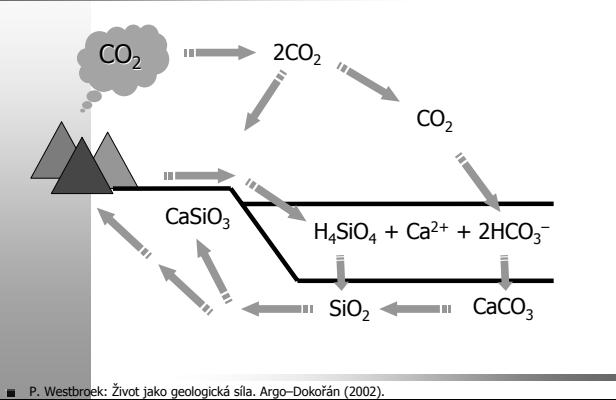
$$\text{CaSiO}_3 + 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{SiO}_2$$
 - Rozpuštěné, zvětrané křemičitany jsou odnášeny proudy do moře, kde je organismy (existuje i abiotický ekvivalent reakce) využijí k tvorbě schráněk:

$$\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$$
 - **Sumární reakce vede k odstranění části CO₂ z atmosféry** a jeho uložení ve formě sedimentů:

$$\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$$
- J. F. Kastig et al., Icarus 101 (1993) 108–128.

Obyvatelnost Země

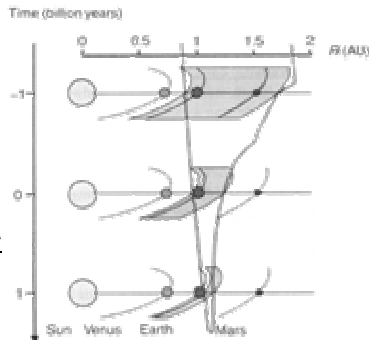
Uhličitno-křemičitanový stabilizující cyklus



Jedinečnost Země

Správné místo v planetární soustavě

- Země se nachází v dlouhodobě obyvatelné zóně kolem Slunce
- Planetární soustava má **Jupiter a obří plynné planety daleko od Slunce**, kde „vychytávají“ komety & spol.
- Biologické cykly na planetě mají „pufrovací“ schopnost, tj. jasnost Slunce stoupla o 30 % od vzniku soustavy, ale teplota Země se nezvýšila...

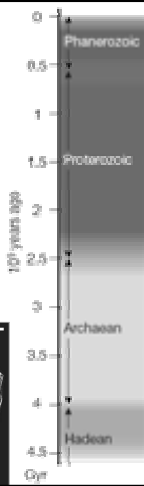
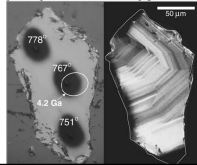


■ S. C. Morris: Life's solution. Cambridge University Press (2003) p. 91.

Vývoj Země

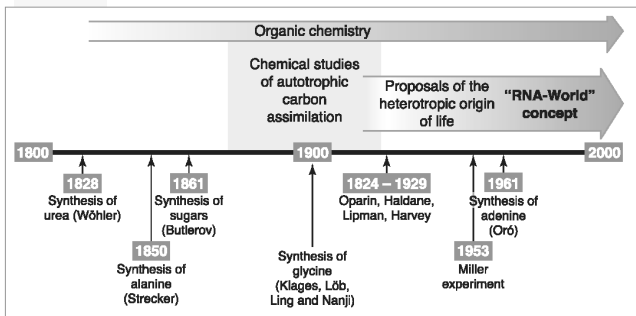
Geologické členění dob

- Povrch Země se zformoval krátce (100 My) po jejím vzniku před 4,5 Gy
- **Již před 4,35 Gy měla Země zřejmě globální oceán**
- Kyslíková atmosféra vznikla před 2,32 Gy
- Během vývoje prošla Země několika krizemi – globální zalednění (např. Huronská glaciace ca. 2,5 Gy, impakty planetek např. před 65 My)



Počátky života

Historický přehled




■ J. L. Bada and A. Lazcano, Science 300 (2003) 745-746.

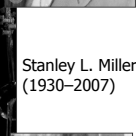
Počátky života

Prebiotická evoluce


- 1924 – **A. I. Oparin** ukazuje, že prvotní organismy musely být **heterotrofní** a užívat **anaerobní fermentaci**, navrhuje vznik života za přítomnosti NH_3 , uhlíkových a sloučenin C+kov (karbidů)
- 1927 – **J. B. S. Haldane** ukazuje na **nepřítomnost O_2 a O_3** v prvotní atmosféře
- 1938 – **Oparin** přichází s ideou **redukční atmosféry**, přítomnosti UV záření a výbojů v prvotní atmosféře
- 1953 – **S. L. Miller** a **H. Urey** (Univ. of Chicago) syntéza **aminokyselin**
- 1961 – **J. Oró** (Univ. of Houston) – syntéza **bází nukleových kyselin**




Aleksandr Ivanovič Oparin (1894-1980)



Stanley L. Miller (1930-2007)





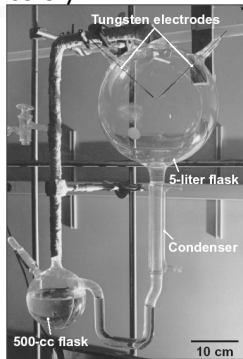
J. B. S. Haldane (1892-1964)

Počátky života

Prebiotická evoluce – složení atmosféry

Atmosféra Složení

Redukční	CH ₄ , NH ₃ , N ₂ , H ₂ O, H ₂ CO ₂ , N ₂ , H ₂ O, H ₂ CO ₂ , H ₂ , H ₂ O
Neutrální	CO ₂ , N ₂ , H ₂ O
Oxidační	CO ₂ , N ₂ , H ₂ O, O ₂



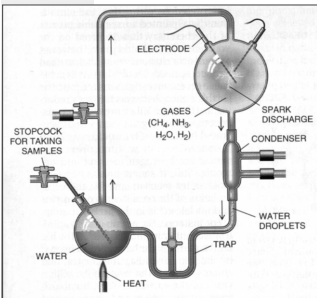
Původní experimentální aparatura S. L. Millera

- **Původní Oparinův návrh** redukční atmosféry obsahoval CH₄, NH₃, H₂O, H₂
- Shodné složení plynů užil i Miller ve svém experimentu
- **Neutrální a oxidační atmosféry nevedou k abiotické syntéze aminokyselin**

Aminokyseliny

Prebiotická syntéza aminokyselin

- V roce 1952 provádí S. L. Miller experiment (v laboratoři H. C. Ureyho) se silně redukční atmosférou...



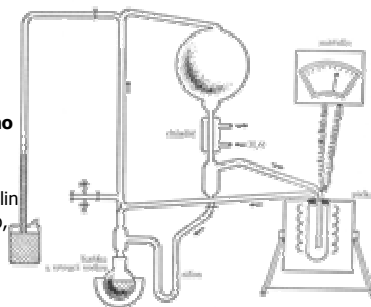
AMINO ACID	MURCHISON METEORITE	DISCHARGE EXPERIMENT
GLYCINE	****	****
ALANINE	****	****
DL-AMINO-N-BUTYRIC ACID	***	****
DL-AMINISOBUTYRIC ACID	****	**
VALINE	****	**
NORVALINE	****	***
ISOVALINE	****	*
PROLINE	****	*
PIPECOLIC ACID	*	*
ASPARTIC ACID	***	***
GLUTAMIC ACID	****	**
BETALANINE	**	**
BETAMINO-N-BUTYRIC ACID	*	*
BETAMINISOBUTYRIC ACID	*	*
GAMINOBUTYRIC ACID	*	**
SARCOSINE	**	***
N-ETHYLGLYCINE	**	***
N-METHYLALANINE	**	**

■ S. L. Miller, Science 117 (1953) 528–529.

Aminokyseliny

Prebiotická syntéza aminokyselin

- Harada a Fox modifikovali Millerův experiment
- Odstranili elektrody a nahradili je **píčkou s ohřevem 900–1000 °C a s přidáním křemenného písku jako katalyzátoru**
- Zvyšuje se podíl proteinogenních aminokyselin (Ala, Gly, Asp, Glu, Lys, Trp, His, Asn)
- Pokusy jsou kritizovány (teplota <120 °C je přijatelnější)

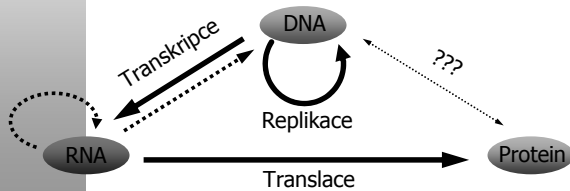


■ K. Harada and S. W. Fox, Nature 201(1964) 335. J. G. Lawless & C. D. Boynton, Nature 243 (1973) 450.

Evoluce jak ji známe

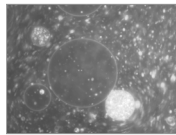
Centrální dogma molekulární biologie

- 1865 – **Gregor Mendel** postuluje **zákony genetiky**
- 1940 – „**jeden gen – jeden enzym**“ (George Beadle & Edward Tatum)
- 1958 – Francis Crick formuluje **ústřední dogma molekulární biologie**
- 1961 – **aminokyseliny specifikovány třípísmennými kodony** (Sidney Brenner & Francis Crick & George Gamow)
- 1961 – rozluštění prvního kódu UUU (M. Nirenberg & H. Matthaei)
- 1966 – finální rozluštění genetického kódu

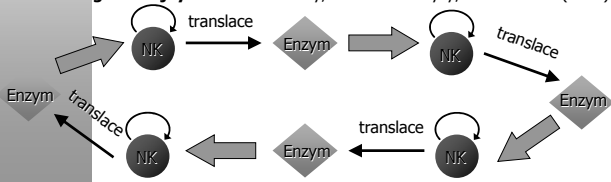


Počátky života

Scénáře vzniku života

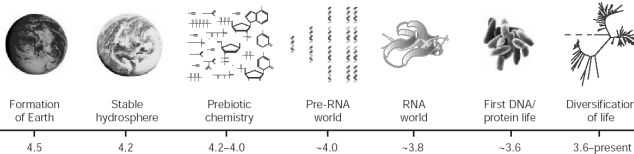


- **Proteiny, nikoli nukleové kyseliny**
 - **koacerváty** – semipermeabilní membrány, Oparin (1924)
 - **mikrosféry** – protenoidy (shluky aminokyselin), Fox
- **Nukleové kyseliny, nikoli proteiny**
 - **genová hypotéza** – ribozymy, koenzymy, možná afinita k protenoidům (1986)
- **Koexistence proteinů a nukleových kyselin**
 - **hypercykly** – teoretický model autoreplikujících se systémů, Eigen (1960)
- **Úplně jiný základ**
 - **anorganické jily** – silikátové shluky, možnost katalýzy, Cairns-Smith (1980)



Svět RNA

Biochemické epochy světa

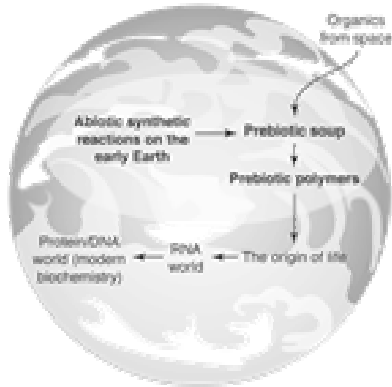


Časová škála událostí na ranné Zemi. Udáno v Gy před současností. Vyznačení událostí je přibližné a RNA svět je třeba posunout hlouběji do minulosti.

■ G. F. Joyce, Nature 418 (2002) 214-221.

Počátky života

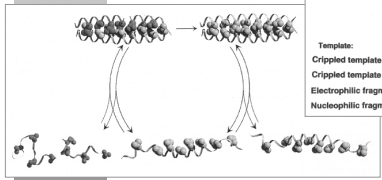
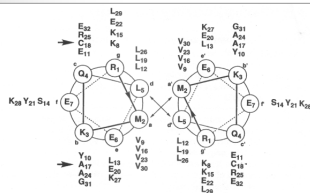
Spletité cesty života...



Proteiny při vzniku života

Samosereplikující peptid

- 32-mer α -helix (coiled-coil) podobný leucinovému zipu autokatalyzuje ve vodném prostředí vznik svého obrazu složením 15- (nukleofilní fragment) a 17-meru (elektrofilní fragment)



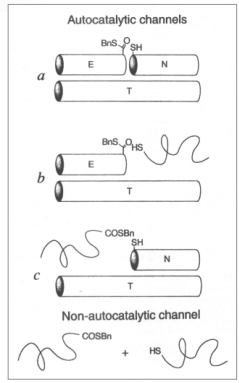
Template: AICORNH-FIMKLEEKVYVYLLSKVA-CLEYEVARLKLKLVGE-COSN₂
 Crippled template 1: AICORNH-FIMKLEEKVYVYLLSKVA-CLEYEVARLKLKLVGE-COSN₂
 Crippled template 2: AICORNH-FIMKLEEKVYVYLLSKVA-CLEYEVARLKLKLVGE-COSN₂
 Electrophilic fragment: AICORNH-FIMKLEEKVYVYLLSKVA-COSN₂
 Nucleophilic fragment: H₂N-CLEYEVARLKLKLVGE-COSN₂

■ D. H. Lee et al., Nature 382 (1996) 525-528.

Proteiny při vzniku života

Samosereplikující peptid

- Elektrofilní fragment atakuje prostřednictvím thiobenzyl esteru – COSBn terminální SH-amino skupinu nukleofilního fragmentu**
- Vznikne cystein thioester intermediát, který se přemění na termodynamicky favorizovanou peptidovou vazbu a spojí oba fragmenty
- Katalytická cesta může probíhat:
 - A) prostřednictvím ternárního komplexu
 - B), C) za vzniku binárních komplexů (nízká výtěžnost, problémy s agregací)
 - D) přímou interakcí obou fragmentů, což je v porovnání s autokatalýzou proces s malou výtěžností



■ D. H. Lee et al., Nature 382 (1996) 525-528.

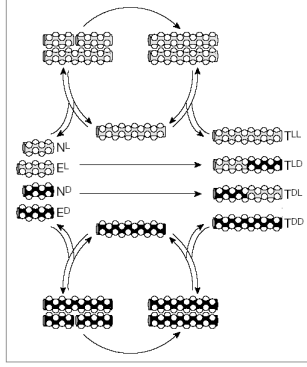
Proteiny při vzniku života

Chirální selektivita

■ Schématické znázornění chiroselektivních replikačních cyklů

- Homochirální peptidy T^{DD} a T^{LL} jsou produkovány autokatalýzou
- Heterochirální (T^{DL} a T^{LD}) peptidy vznikají nekatalyzovanou kondenzací nukleofilního (N) a elektrofilního (E) peptidu

■ Teplátem řízená ligace homochirálních fragmentů vede k amplifikaci homochirální produktů obecně



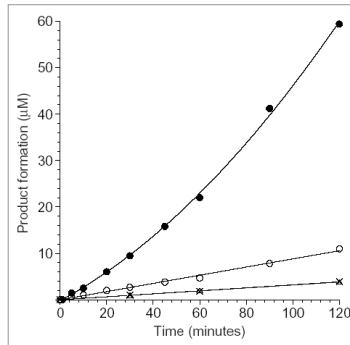
■ A. Sagatelian et al., Nature 409 (2001) 797–801.

Proteiny při vzniku života

Chirální selektivita

■ Stupeň formování produktu v závislosti na čase

- Produkce homochirálních produktů (T^{LL} a T^{DD}) – ●, a heterochirálních produktů (T^{LD} a T^{DL}) – ○, je ukázána jako funkce času pro roztok obsahující 100 μM koncentraci N^L , N^D , E^D a E^L
- Spodní křivka (Δ , \times , resp.) je kontrola v přítomnosti 3M GndHCl



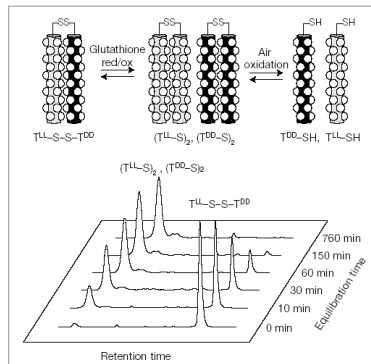
■ A. Sagatelian et al., Nature 409 (2001) 797–801.

Proteiny při vzniku života

Chirální selektivita

■ Formování coiled-coil struktury a odpovídající HPLC retenční časy

- Příkrá disproporce ukazuje, že vznik coiled-coil helikální struktury je přísně chiroselektivní
- Stejně mechanismy vedly ke vzniku homochirálního života na Zemi

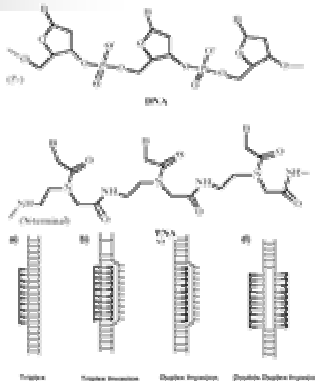


■ A. Sagatelian et al., Nature 409 (2001) 797–801.

Proteiny při vzniku života

Peptidové nukleové kyseliny (PNA)

- Kostra PNA je tvořena polymerem N-(2-aminoethyl)glycinem (AEG)
- AEG může snadno nahradit nestabilní cukry
- PNA se váží na DNA formující dvoj- či trojšroubovice příbuzné Watson-Crickově helixu
- **PNA mohou být prekurzorem světa RNA**
- PNA mají terapeutické využití v antisense strategii a genetické diagnostice

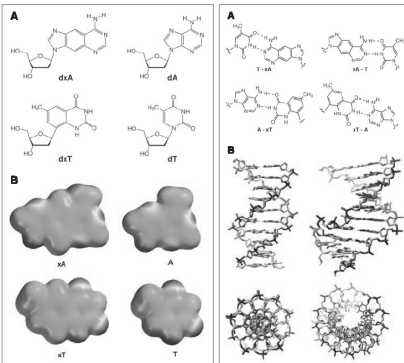


■ K. N. Ganesh and P. E. Nielsen, Current Org. Chem. 4 (2000) 931-943.

DNA jak ji neznáme

Expandovaná DNA

- Modifikované báze vznikají přidáním jednoho aromatického kruhu navíc
- **Báze si zachovávají své vlastnosti**
- Expandovaná DNA je **mnohem stabilnější** než DNA „klasická“
- Hybrid i čistá forma **expandované DNA je plně funkční**
- **Neexistuje žádné známé omezení na užití expandované DNA**



■ H. Liu et al. Science 302 (2003) 868-871.

Počátky života

Vznikl život na ledové Zemi...

Počátky života nebo v horkém zřídle?



Počátky života v Darwinově teplém rybníčku...



Život jak ho neznáme Je život opravdu tak jednoduchý fenomén?

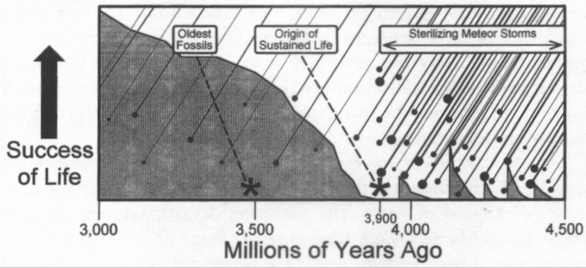
- „Průměrný protein“ má 200 aminokyselin
- Počet všech kombinací aminokyselin je 20^{200} , tj. zhruba 10^{260}
- Vesmír má 10^{80} částic
- Rychlá chemická reakce trvá 1 femtosekundu (10^{-15} s)
- Počet všech myslitelných párových srážek od velkého třesku je $10^{80} \times 10^{80} \times 10^{33} = 10^{193}$
- Vesmír by potřeboval 10^{67} životů aby stvořil všechny kombinace tohoto proteinu
- **Vesmír se neopakuje – je nergodický...**



Počátky života

Kdy život začal?

IMPACT FRUSTRATION OF THE ORIGIN OF LIFE

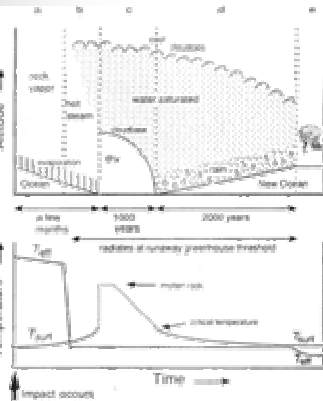


Genetický předchůdce všech živých organismů se mohl vyvinout až po posledním velkém sterilizujícím impaktu...

Jedinečnost Země

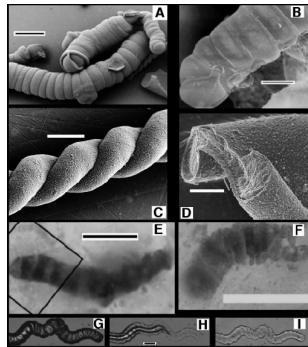
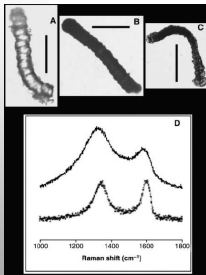
Na kosmické střelnici

- V počátcích existence planety mohly být kataklyzmatické dopady těles časté
- **Důsledky gigantického impaktu** (těleso >500 km)
 - Vypaření hornin v místě dopadu (T atmosféry 2000 °C)
 - Vypaření oceánů (atmosféra 1500 °C po staletí)
 - Extrémní skleníkový efekt (T_{surf} – teplota povrchu, T_{eff} – oblačnosti z vesmíru)
- **Život musel možná vzniknout opakovaně!**



Evoluce jak ji známe

Jsou mikrofosile autentické?

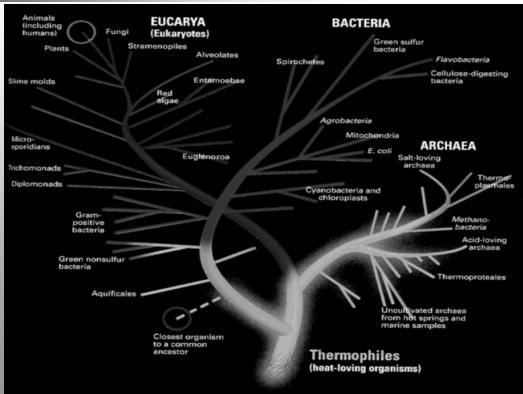


Lze syntetizovat mikronové silně uspořádané křemíkové struktury na které se postupně naváží uhlíkaté sloučeniny – dojem je dokonalý...

■ J. M. Garcia-Ruiz et al., Science 302 (2003) 1194–1197.

Strom života

Standardní uspořádání

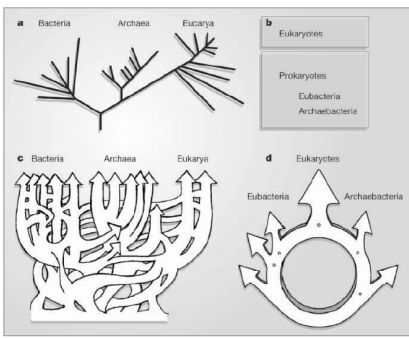


Strom života

Možná nová schémata vývoje života

Čtyři schémata uspořádání mikrobiálního světa

- a) Tři říše s postupným vývojem stanoveným na základě analýzy ribosomální RNA
- b) Dvě říše striktně oddělující svět prvojaderných a bezjaderných mikroorganismů
- c) Tři říše které si vzájemně ve svém vývoji vyměňovaly geny
- d) Prstenec života, zahrnující výměnu genů, ale i oddělení eukaryotů od prokaryotů



■ M. C. Rivera, J. A. Lake, Nature 431 (2004) 152-155.

Evoluce jak ji známe

Extremofilní organismy



Extremofilové

Extremofilní organismy – definice

- **Extremofilní organismus** je ten, který prospívá v extrémních podmínkách
- **Polyextremofilní organismus** prospívá nejlépe v podmínkách dvou a více extrémů
- **Extrémem** se rozumí fyzikální (např. teplota, tlak, radiace) či chemické podmínky (např. salinita, vysychání, pH, redox potenciál, oxidační prostředí)
- Mezi extrémy by se mohly též zařadit biologické faktory (např. nutriční extrémy, populační hustota, parazitace, atp.)

Extremofilové

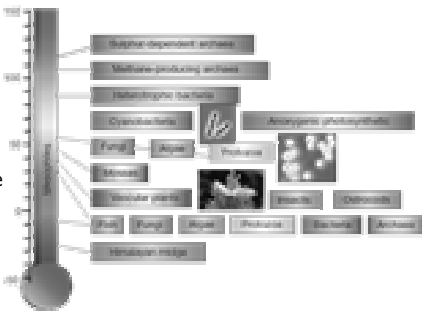
Kdo je extremofil?

- **Jaké podmínky jsou skutečně extrémní?**
 - Naše definice jsou antropocentrické
 - Z pohledu mikrobů je člověk extremofil libující si v oxidačním prostředí
- **Musí extremofil opravdu milovat (-fil) své extrémní prostředí?**
 - Mnoho organismů spíše toleruje extrémní podmínky než aby je aktivně vyhledávalo
- **Musí být organismus extremofilem po celý život a ve všech fázích svého vývoje?**
 - *Deinococcus radiodurans* vlivem extrémního zatížení ztrácí odolnost vůči radiaci
 - Zvířata tolerují během zimního spánku překvapivě nízké teploty
 - Želvušky krátkodobě snášejí teploty od $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $151\text{ }^{\circ}\text{C}$, X-ray, vakuum, tlaky 600 MPa

Evoluce jak ji známe

Limity života

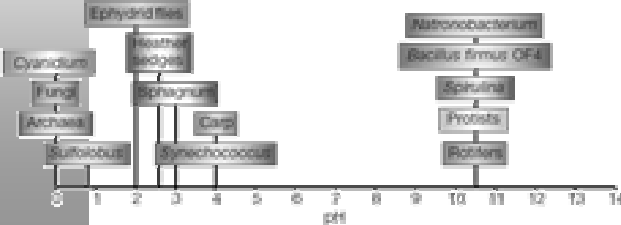
- **Nejtepleji:** $113\text{ }^{\circ}\text{C}$, *Pyrococcus furiosus* (Islandské a Italské sopky)
- **Nejstudeněji:** $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, *Cryptotendolithotroph* h (Antarktida)
- **Nejhlouběji:** 2 míle pod zemí, bakterie v hloubkových vrtech
- **Nejvyšší radiace:** 15 Mrads, *Deinococcus radiodurans* (všudypřítomný)



Evoluce jak ji známe

Limity života

- **Nejkyselější:** pH=0,0, *Picrophylus oshimae*
- **Nejzásaditější:** pH=11, alkalofilní bakterie
- **Nejslanější:** 30 %, halofilní bakterie
- **Nejvyšší tlak:** 1200 atm., společenství na dně Mariálského příkopu
- **Nejdelší latence:** 20–40 milionů let (jantar), *Bacillus*
- **Nejvzdálenější pobyt ve vesmíru:** Surveyor III (3 roky) *Streptococcus*
- **Nejdelší pobyt ve vesmíru:** 6 let, *Bacillus subtilis*



Evoluce jak ji známe

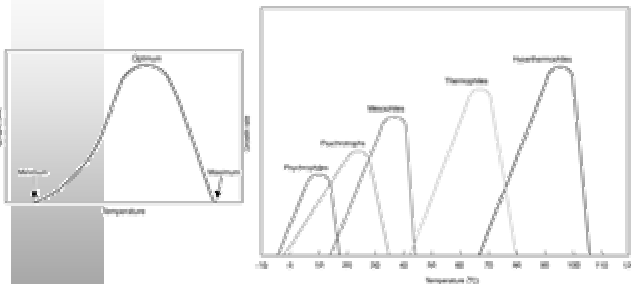
Pozoruhodný svět v temnotách

- **Svět „černých kuřáků“**
objeven ponorkou Alvin v roce 1977
- Jde o horká termální zřídla (ca. 350 °C) ve velkých hloubkách (>3000 m) bohatá na sloučeniny síry
- Doposud objeveno okolo 30 zón termálních podmořských zřídél
- Ekosystém je založen na sírných baktériích
- Červy rodu *Riftia pachyptila* nepřijímá potravu a žije pouze ze symbiózy s bakteriemi



Extrémní teplota

Rozdělení organismů dle optimální teploty růstu



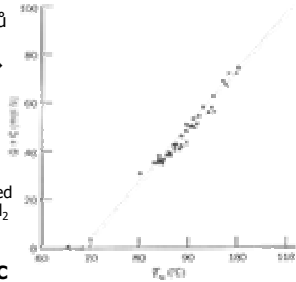
Mikroorganismy lze rozdělit do skupin dle optimální teploty pro růstu. Teplotní rozsah možného růstu je relativně široký. Ve formě spor mohou mikroby přestát mnohem nepříznivější okolnosti.

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

Extrémně vysoká teplota

Kdo pak to rád horké?

- Většina hypertermofilních organismů jsou zástupci archaie
- **Chlorofyl degraduje při 75 °C** → fotosyntéza je vyloučena
- Zdrojem energie je nitrifikace či příbuzné reakce
- **Průměrná DNA denaturuje při ca. 70 °C**
 - DNA termofilů je stabilizována (před hydrolyzou a depurinací) KCl a MgCl₂
 - G+C nejsou častější v DNA pouze v ribozomální RNA a tRNA
- **Proteiny denaturují při ca. 60 °C**
 - Proteiny termofilů nemají jiné teplotní optimum
 - Jsou rigidnější a teplotní křivka je plošší



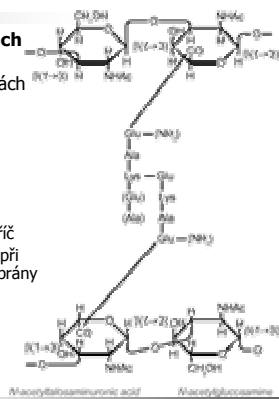
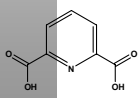
Teplota tání nukleové kyseliny v závislosti na obsahu G+C párů (guanin + cytosin)

■ L. J. Rothschild & R. L. Mancinelli, Nature 409 (2001) 1092–1101.

Extrémně vysoká teplota

Jak přežít vysoké teploty

- **Biomolekuly disintegrují při teplotách 200–250 °C**
- Fluidita membrán se při vysokých teplotách zvyšuje
- **Archae využívá modifikované biomolekuly**
 - Zvýšené množství heat-shock proteinů
 - Zvýšené množství disacharidů
 - Rigidnější lipidy v membránách
 - Glykopeptidy ke zpevnění membrán napříč
 - Molekuly příbuzné těm, jež jsou užívány při sporulaci za účelem snížení fluidity membrány (např. kys. dipicolinovou – DPA)

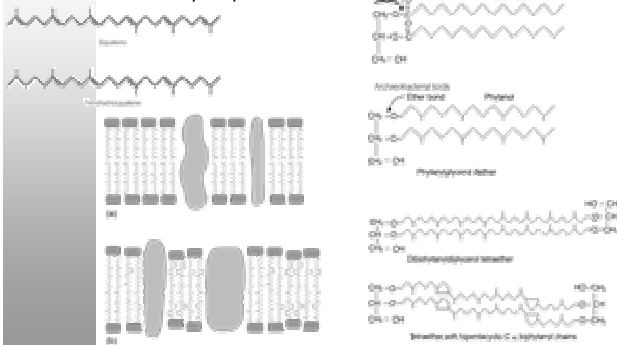


■ L. M. Prescott et al.: Microbiology, McGraw-Hill (1999).

Extrémně vysoká teplota

Jak přežít vysoké teploty

Modifikace membránových lipidů u archaie

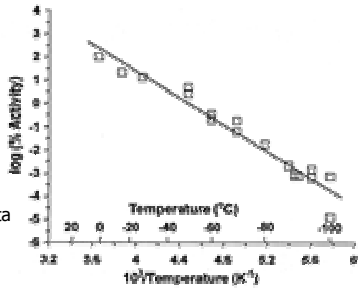


■ L. M. Prescott et al.: Microbiology, McGraw-Hill (1999).

Extrémně nízká teplota

Aktivita enzymů při teplotě $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$

- Funkčnost enzymů vyžaduje kapalné rozpouštědlo
- **Některé enzymy ztrácejí při nízkých teplotách funkčnost díky dynamickému přechodu do jiné konformace**
- Při nižších teplotách je aktivita enzymů ovlivněna fluiditou roztoku pro substrát/produkt
- Nebyl nalezen **žádný limit v oblasti nízkých teplot** pro fungování enzymů



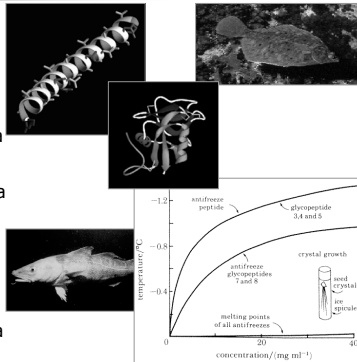
Arrheniův graf pro aktivitu alkalín fosfatázy v roztoku methanol/ethylenglykol/voda (70/10/20 %)

■ J. M. Bragger et al., Biochim. Biophys. Acta 1480 (2000) 278–282.

Extrémně nízká teplota

Nemrzoucí proteiny

- Existují proteiny, které **umožňují život vyšším živočichům za nízkých teplot** (především rybám)
- Existují antifreeze proteiny a glykoproteiny IV typů
- Molekulová váha 2,6–33 kDa
- V sekvenci převažuje Ala ca. 60 % (někdy Cys), ve struktuře helix
- Mechanismus účinku není přesně znám, snad vazba na specifické konformace ledu

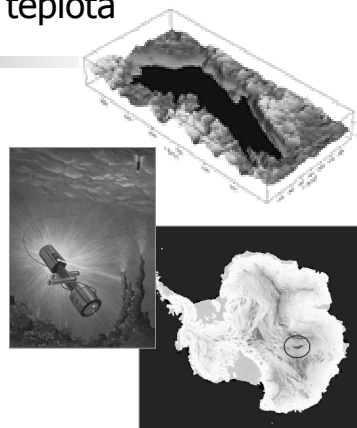


■ F. Sicheri & D. S. C. Yang, Nature 375 (1995) 427–431.

Extrémně nízká teplota

Jezero Vostok

- Roku 1974 se podařilo u antarktické stanice Vostok nalézt jezero ukryté pod vrstvou $\sim 4\text{ km}$ ledu
- Jde o rozlehlé (10 000 km^2) – tj. ca. jezero Ontario) sladkovodní jezero 250 \times 50 km
- Průměrná hloubka 125 m
- **Odhaduje se, že vodní svět jezera je izolován již miliony let (> 10 Myr)**

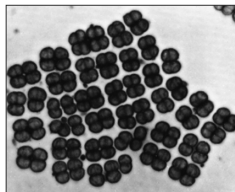
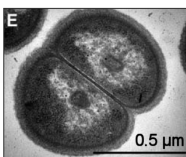


■ A. P. Kapitsa et al., Nature 381 (1996) 684–686.

Extrémní radiace

Velký rekordman

- **Deinococcus radiodurans** (půdní bakterie, všeobecně rozšířená) je zřejmě největším extremofilem vůbec
- **Snáší vysoké dávky ozáření – 20 kGy gama záření – UV ozáření více než 1000 J/m² – 3–5 milionů rad (100 rad, tj. 1 J záření / 1 kg buněk, je pro člověka letální dávka resp. 5 krad/h; pozadí je 0,5 rad/rok)**
- Přežívá i extrémně vysoké tlaky a zrychlení
- Jde zřejmě o vedlejší efekt rezistence vůči vysychání
- Bakterie obsahuje **velké množství antioxidantů a detoxifikačních enzymů**
- **Má unikátní mechanismus pro opravu DNA, který umožňuje její správné poskládání z fragmentů**



Mikrokolonie Deinococcus radiodurans organizovaného do tetrad či ve formě diplokoka.

■ L. J. Rothschild & R. L. Mancinelli, Nature 409 (2001) 1092–1101.

Extrémní tlak

Jak přežít tlaky

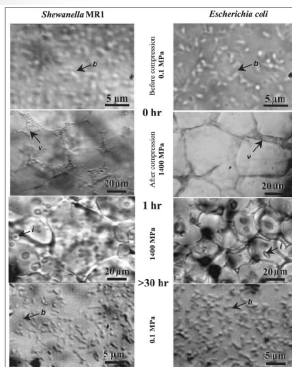
- Zvýšený tlak **posunuje hranici kapalnosti vody** (na dně moře ca. 10 km voda vře při 400 °C) a tak i možnost optimálního růstu mikrobů – využíváno velmi zřídka
- Vysoký tlak **snižuje fluiditu buněčných membrán** (reakcí je zvýšení obsahu mastných kyselin v membránách)
- **Vysoký tlak může pomoci stabilizovat konformace proteinů, některé však destabilizuje a navíc může ohrozit i stabilitu DNA**
- **Mezi „tlaky“ by měl být zařazen i vliv gravitace, sic!**

■ L. J. Rothschild & R. L. Mancinelli, Nature 409 (2001) 1092–1101.

Extrémní tlak

Mikrobiální život za tlaku GPa

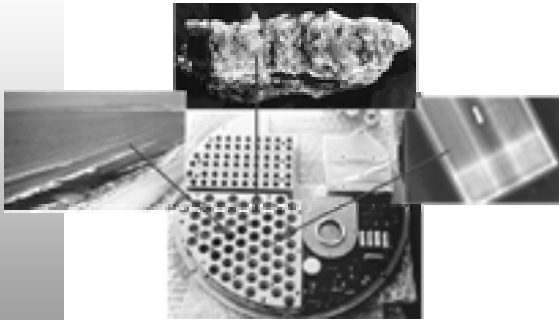
- **Bakterie žijí při tlacích do 1060 MPa**
- Aktivita byla sledována pomocí oxidace mravenčanu
- Bakterie zamrzlé ve VI-ledu **přežívají tlak až do 1600 MPa**
- Z 10⁶ bakterií přežilo 30 h expozici GPa tlaku 10⁴
- Stres způsobený vysokým tlakem zároveň selektuje jedince odolné k vyšším teplotám
- Použitý tlak 1200–1600 MPa odpovídá hloubce **~50 km pod povrchem Země** nebo **~160 km pod hladinou moře**



■ A. Sharma et al., Science 295 (2002) 1514–1516.

Extrémní koncentrace solí

Experimenty v kosmu

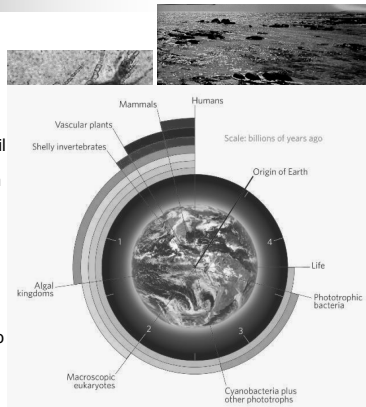


Experiment BioPan vystavil halofilní organismy na dobu dvou týdnů kosmickému prostředí. Vlevo erchae *Dunaliella*, uprostřed *Synechococcus* (z pacifické solné zóny), vpravo mikrofotografie *Haloarculy* uzavřené v krystalu NaCl.

Evoluce jak ji známe

Strastiplná cesta života na Zemi

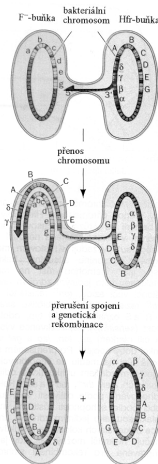
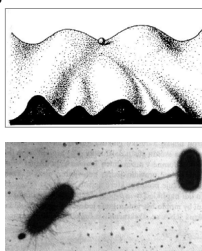
- Před **4,6 miliardami** let se zformovala Země
- Před **4,2 miliardami** let vznikly oceány a kontinenty
- Před **3,8 miliardami** let vznikl život
- Před **3,5 miliardami** let zahájil fotosyntézu
- Před **530 miliony** let proběhla kambriká exploze vícebuněčného života
- Před **300 miliony** let život osídlil souš
- Před **65 miliony** let ovládli savci souš
- Před **5 miliony** let vznikl rod *Homo*
- Před **43 lety** vstoupil člověk do vesmíru



Co je život?

Vynález sexuality

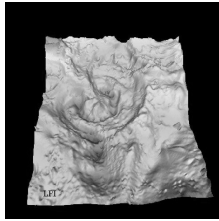
- 1946 – Joshua Lederberg (Nobelova cena 1958) objevuje **konjugaci u bakterií**
- Sexualita života je převážně únikem před parazity, ale šancí pro komplexní život
- Jednou nastartovaný evoluční proces je nevratný a neopakovatelný
- **Pokud by se evoluční proces pustil znovu jeho výsledky by byly velmi odlišné...**



Masová vymírání

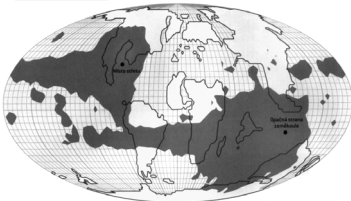
Dopady asteroidů – kvartér–terciér

- Iridiová vrstva jasně odděluje hranici **kvartér–terciér** (K-T)
- **Před 65 miliony lety dopadlo na Zemi těleso o velikosti 10 km** do oblasti severozápadního Yucatanu (Mexický záliv)
- Došlo k nukleární zimě, vznikly velké cunami, teplota prudce oscilovala
- 50 % živočichů a rostlin vymřelo
- Tunguský meteorit (1908) měl velikost ~30 m, ale co kdyby...



Masová vymírání

Dopady asteroidů – kvartér–terciér



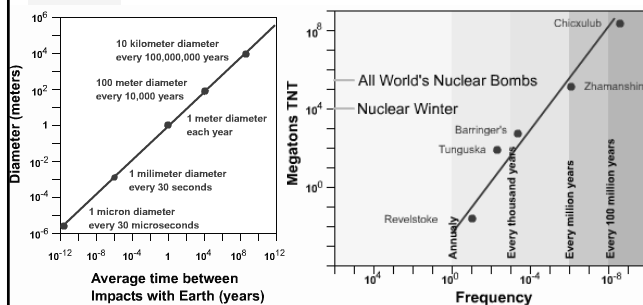
Ve vyznačených oblastech byl dosažen tok 12,5 kW/m² po dobu 20 min což vedlo k masivním požárům. Protážení koridorů je dáno posunem dopadových oblastí úlomků.

Malý obrázek ze světa dinosaurů...

■ D. A. Kring, D. D. Durda, Scientific American No. 6 (2005) 56–63.

Masová vymírání

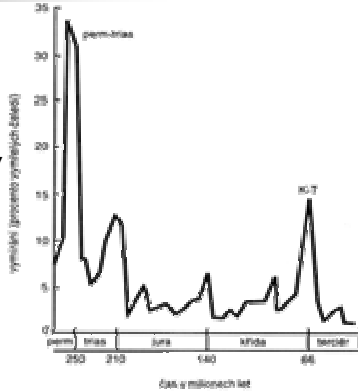
Dopady asteroidů



Masová vymírání

Geologické a neznámé pochody

- **Pozdní Trias (199–214 My)** – masivní výlevy lávy, vznik Atlantského oceánu
- **Perm–Trias (251 My)** – prudký výkyv teploty?, změna mořské hladiny?, masivní výlev lávy?, dopad planety vyloučen, vymřelo 95 % druhů
- **Pozdní Devon (364 My)** – důvod neznámý
- **Ordovik–Silur (439 My)** – glaciace



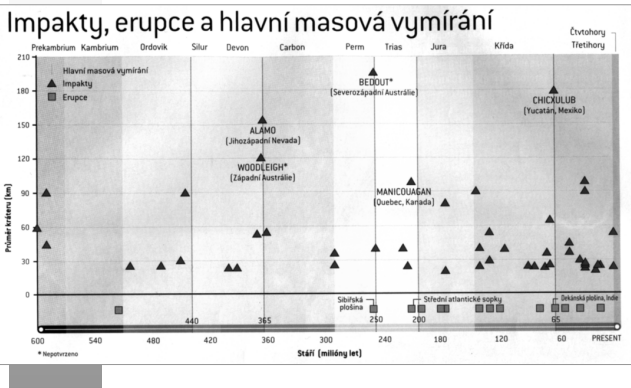
Masová vymírání

Opravdu neznámé důvody?

- Tři velká vymírání jsou **spojena s masivním výlevem lávy**
 - K-T – Dekanský trap (lávová pole v Indii)
 - Pozdní Trias – rozpad Pangey
 - Perm–Trias – Sibiřský trap
- **Sopečná činnost** uvolňuje CO₂ a SO₂, tvoří kyselé deště
- Pokles hladiny moří až o 200 m exponuje biologické usazeniny, ty se oxidují a vzniká CO₂, což vede ke skleníkovému efektu (možná příčina vymírání Perm–Trias)
- Mimo K-T nejsou důkazy o ničivém dopadu planety, je možné, že K-T byl největší impakt za posledních 600 My
- Diskutují se i další vlivy – exploze supernov, vymizení magnetického pole (větší mutabilita)

Masová vymírání

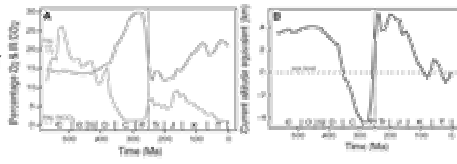
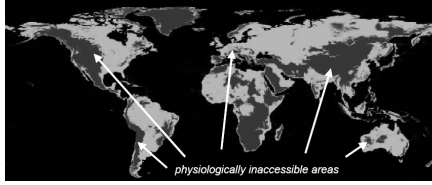
Impakty, erupce a hlavní masová vymírání



Masová vymírání

Hypoxie a globální oteplení

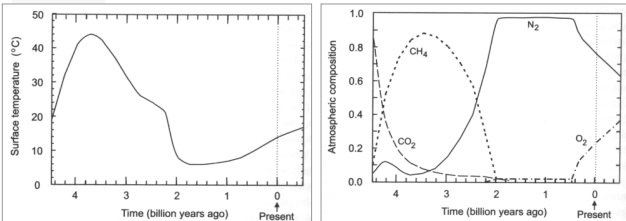
- Impakt na hranici Perm-Trias (251 My) je vyloučen – vymírání trvalo 10 kY až 1 My
- Je spojeno s nárůstem CO₂ při tvorbě Sibiřských trapů a **následným skleníkovým efektem**
- **Nastala globální hypoxie**
- Došlo ke zmenšení a izolaci populací
- **Části Země se staly neobyvatelné**



■ R. B. Huey, P. D. Ward, Science 308 (2005) 398–402.

Jedinečnost Země

Nejasnosti s teplotou a atmosférou

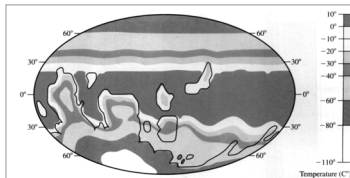


- Vývoj teploty a složení pozemské atmosféry čase
- Není doposud jasné, zda-li teploty na dávné Zemi nebyly vyšší
- Zastoupení izotopů kyslíku v horninách ukazuje, že teplota mohla být z počátku mnohem vyšší: před 3 Gy 70 °C, před 2 Gy 60 °C, a teprve před 1,5 Gy klesla na 40 °C
- Vyšší teploty by mohly pomoci vysvětlit evoluci života

Jedinečnost Země

Země jako sněhová koule

- **Glaciace Marinoan před 635 My byla zřejmě globální a trvala 12 My**
- Detekována masivní sedimentací iridia
- Mohla pozastavit vývoj života a kabrickou explozi
- Po jejím konci se ropoutala klimatická změna – vítr 70 km/h, obří vlnobití
- Možné jsou další globální glaciace např. Sturtian před 710 My

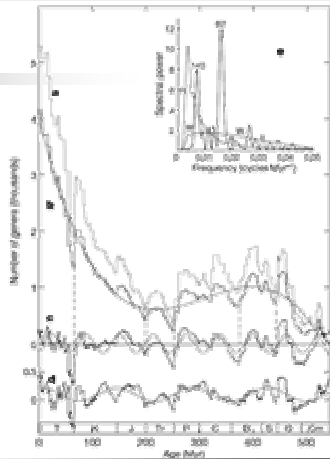


■ P. A. Allen, P. F. Hoffman, Nature 433 (2005) 123–127.

Masová vymírání

Nové otázky...

- Analýzou Sepkovského kompedia 36 680 rodů mořských živočichů s pevnou skořápkou (0–542 My) byla nalezena **perioda vymírání 62 ± 3 My a 140 ± 15 My**
- Cyklus 62 My a 140 My je signifikantní na hladině v pozici $3,6 \times 10^{-4}$ a magnitudě 1×10^{-2} , respektive $5,6 \times 10^{-3}$ a 0,13
- Slunce prochází s periodou ~ 140 My rameny Galaxie a s periodou 52–74 My křížuje Galaktickou rovinu
- Vysvětlení neznáme...

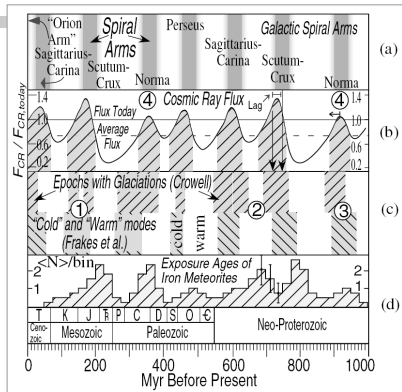


■ R. A. Rohde, R. A. Muler, Nature 434 (2005) 208–210.

Masová vymírání

Nové otázky...

- **A) průchod spirálními rameny Galaxie**
- **B) tok kosmického záření (CRF) se v periodě zpožďuje za průchody ramenem**
- **C) kvalitativní znázornění epoch zalednění spolu s chladnými a teplými obdobími (glaciál 3 je spolu s průchodem ramenem 4 nejistý)**
- **D) histogram zastoupení $^{40}\text{K}/^{41}\text{K}$ v Fe meteoritech, které odráží minima CRF**

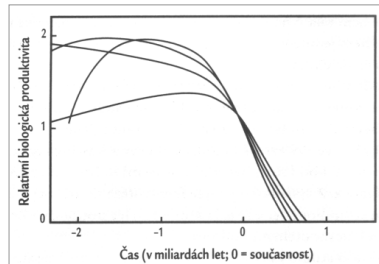


■ N. J. Shaviv, Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 05112–05114.

Obyvatelnost Země

Biomatematická stránka modelu

- Biologická produktivita Země s časem postupně roste
- **Možná již je za vrcholem**
- Zcela jistě bude v budoucnu klesat a to v důsledku nedostatku CO_2 a zvyšování teploty planety
- Je možné, že mikroby dokáží zamezit poklesu produktivity na nulovou úroveň po dlouhou dobu

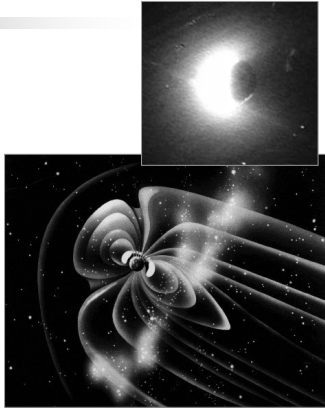


■ P. Ward & D. Brownlee: Život a smrt planety Země. Argo – Dokořán (2004).

Vývoj Země

Ztráta oceánů

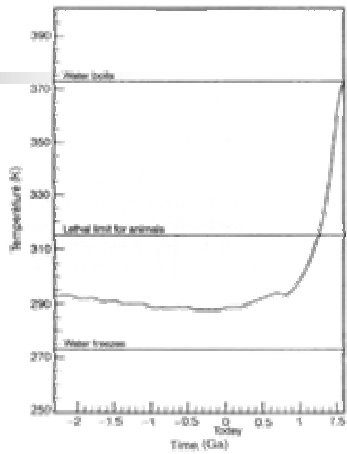
- **Oceánská voda neustále uniká do vesmíru**
- Z vesmíru lze pozorovat fluorescenci H v Lymanově čáře alfa (UV záření)
- Závoj unikajícího vodíku se táhne do vzdáleností tisíců km
- **Oceány se vypařují tempem 1 mm za 1My**
- Vypařování (přechodu do stratosféry) **zabraňuje rychlý pokles teploty v atmosféře s výškou** (ca. 9,8° na 1 km)
- Při zvýšení teploty se mohou oceány vypařit velmi rychle...



Vývoj Země

Nárůst teploty

- Postupné narůstání jasnosti Slunce povede ke zvyšování teploty zemského povrchu
- Nárůst teploty bude způsobovat **kolaps zpětnovazebných termoregulačních cyklů**

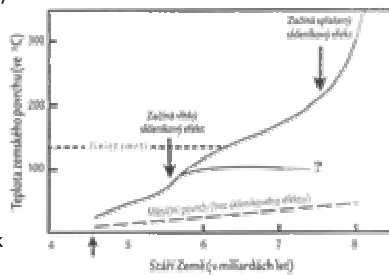


■ S. C. Morris: Life's solution. Cambridge University Press (2003).

Vývoj Země

Nárůst teploty

- Nárůst povrchové teploty bez skleníkového efektu by měl být lineární odezvou na zvyšování jasnosti Slunce
- **Vypařování oceánů způsobí na Zemi lavinovitý skleníkový efekt a zánik života**
- Pokud **Země ztratí oceány do 1,5 Gy**, pak bude nárůst teploty pozvolnější a skleníkový efekt se nerozeběhne

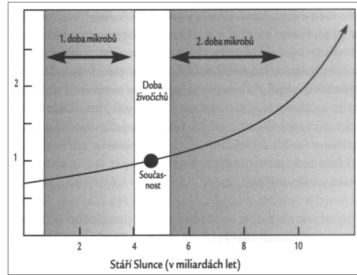


■ P. Ward & D. Brownlee: Život a smrt planety Země. Argo – Dokořán (2004).

Vývoj Země

Nárůst teploty

- **Období, kdy může existovat komplexní život je velmi krátké**
- Planeta Země vždy byla planetou mikrobů
- Jsou vyšší živočichové pouze krátkodobou anomálií života?
- Jaké jsou důsledky těchto jevů pro existenci mimozemského života?

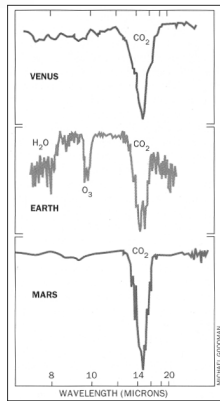


■ P. Ward & D. Brownlee: Život a smrt planety Země. Argo – Dokořán (2004).

Spektrální charakteristiky

Základní rysy obyvatelné atmosféry

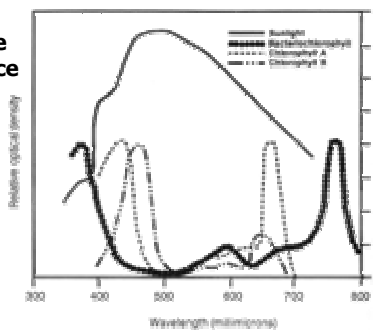
- Pokud se v budoucnu podaří detekovat spektra exoplanet, bude možné analyzovat složení atmosféry
- **Přítomnost CO₂** je možným znakem planety terestrického typu s hustší atmosférou
- **Přítomnost O₃** svědčí o přítomnosti stínící vrstvy a kyslíkaté atmosféry
- **Přítomnost CH₄ za současné přítomnosti O₂** ukazuje na možný organický původ (možné jsou podzemní rezervoáry)



Spektrální charakteristiky

Univerzální chlorofyl?

- Spektrální distribuce chlorofylu **nekopíruje průběh záření Slunce**
- Maximum slunečního záření zůstává nevyužito!
- Může jít o fyzikálně-chemické důvody?!
- Fototrofie na jiných planetách může mít stejné spektrální charakteristiky

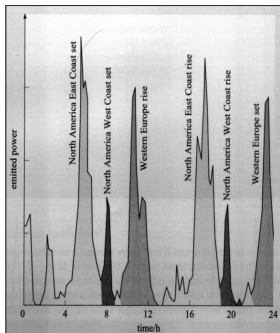


■ S. C. Morris: Life's solution. Cambridge University Press (2003) p. 91.

Hledání mimozemšťanů

Hurá, život ve vesmíru nalezen

- Sonda Galileo otestovala své přístroje při průletu kolem Země v prosinci 1990
- Fotografie ukázaly oblačnost a projevy počasí
- Nalezla jasné stopy po O_2
- Spektrum vykazovalo jasnou a ostrou absorpční hranu v červené oblasti
- Podařilo se detekovat CH_4 v silné termodynamické nerovnováze
- **Výše zmíněné svědčí o přítomnosti života**
- Navíc byly zaznamenány periodické oscilace v radiových signálech, které navíc měly přesné frekvence
- **Jde o praktickou demonstraci sondy, která úspěšně našla inteligentní život ve vesmíru**

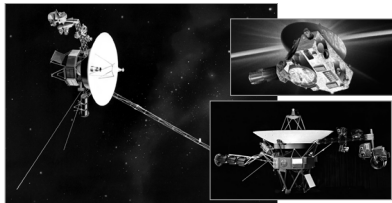
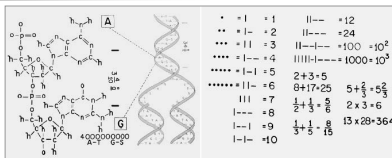


■ C. Sagan et al., Nature 365 (1993) 715–721.

Hledání mimozemšťanů

Hlavně neztrácet optimismus

- Radiová komunikace vyžaduje trvalé vysílání či příjem
- Signál (radiový či optický) postupně mizí v šumu...
- **Nejlepší metodou je posílat artefakty**
- **Kde jsou ufoňi?**
 - Neexistují
 - Schovávají se
 - Nezajímají se o nás
 - Jsou rezignovaní (Cesty jsou příliš obtížné a vesmír je nehostinný)
 - Jsou blízko...



■ C. Wright et al., Nature 431 (2004) 47–49.

Doporučená literatura

- M. Gargaud, B. Barbier, H. Martin, J. Reisse, eds.: Lectures in astrobiology. Springer, Berlin – Heidelberg 2006. {Obsáhlé kompendium astrobiologie}
- J. I. Lunine: **Astrobiology**. A multidisciplinary approach. Pearson & Addison Wesley, San Francisco 2005. {Jedna z nejlepších učebnic astrobiologie}
- A. M. Shaw: **Astrochemistry: from astronomy to astrobiology**. Wiley, Chichester 2006. {Přehledová kniha o astrobiologii s důrazem na astrochemii}
- J. W. Schopf, ed.: **Life's origin**. The beginnings of biological evolution. University of California Press, Berkeley 2002. {Přehled prebiotické evoluce}
- P. Ward, D. Brownlee: **Rare Earth**. Why is complex life uncommon in the universe. Copernicus Books, New York 2000. {Skvělá kniha objasňující nepravděpodobnost komplexního života ve vesmíru}
- P. Ward, D. Brownlee: **Život a smrt planety Země**. Argo & Dokořán, Praha 2004. {Nádherné čtení popisující konec života na Zemi a důvody k němu vedoucí}

Země je opravdu jedinečná...



... ale alespoň si můžeme užít soukromí...
