

Vzácná Země...

... aneb važme si toho co na Zemi máme!

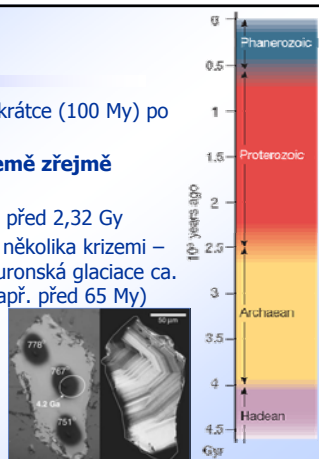
Vladimír Kopecký Jr.

Fyzikální ústav Univerzity Karlovy v Praze
 Oddělení fyziky biomolekul
<http://atrey.karlin.mff.cuni.cz/~ofb/kopeccky.html>
kopeccky@karlov.mff.cuni.cz

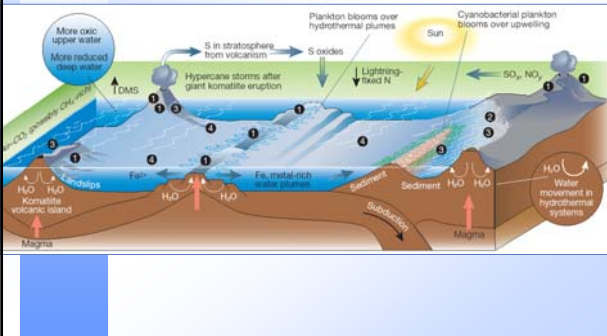


Vývoj Země Geologické členění dob

- 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)



Vývoj Země Biosféra pozdního archeanu



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 dvojpřanetu Země–Měsíc (těžiště leží 1400 km pod povrchem Země)
- Existence a vznik soustavy Země–Měsíc je krajně nepravděpodobná...



Jedinečný Měsíc

Kde se Měsíc vzal?

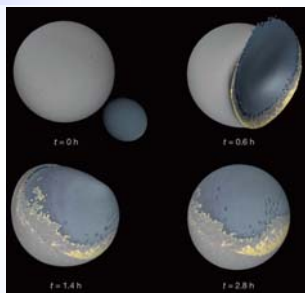
- Měsíc vznikl před ca. 4,5 Gy srážkou Země s tělesem o velikosti Marsu (ca. 1/2 průměru Země)
- Z vyvržené hmoty se postupně zformovalo těleso Měsíce
- Základní myšlenka pochází od Hartmanna & Davise z roku 1975)
- Možnost zachycení tělesa o velikosti Měsíce (ca. 0,27 průměru Země) je opravdu nepravděpodobná...



Jedinečný Měsíc

Kde se Měsíc vzal – třeba je to složitější

- Existuje dichotomie mezi přivrácenou a odvrácenou stranou Měsíce
- Jedno z možných vysvětlení je **srážka s dalším zformovaným měsícem na dráze Trójana** (dráha stabilní po 10 Myr)
- Trójanský měsíc o průměru ~1200 km se srážil rychlostí ~2–3 km/s

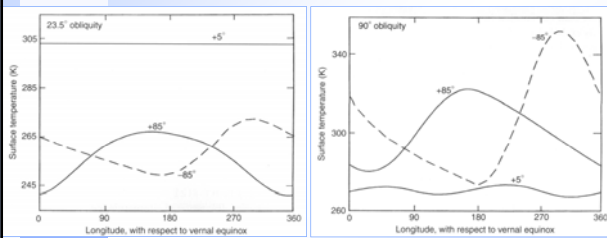


Počítačová simulace dopadu Trójanského měsíce na Měsíc. Světlo modře, šedě – kůra; moře, žlutě – plášť (impaktor vs. Měsíc)

■ M. Jutzi & F. Asphaug, Nature 476 (2011) 69–72.

Jedinečný Měsíc

Co by bylo kdyby Měsíce nebylo



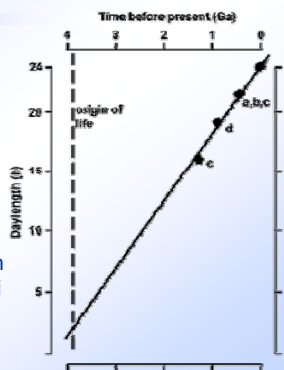
Model klimatických změn na Zemi bez Měsíce. Nepřítomnost Měsíce dovoluje masivní změny sklonu rotační osy od současné stabilní polohy 23,5° (vlevo) až po 90° (vpravo). Vyneseny jsou průběhy teplot pro polohu blízko rovníku 5° a poblíž pólu 85° (plná čára = severní, přerušovaná = jižní hemisféra). Na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

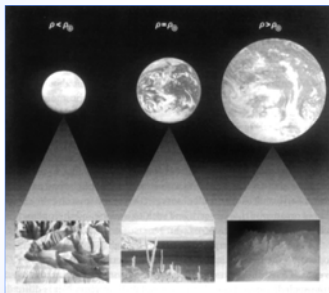


■ R. Lathe, Icarus 168 (2004) 18–22.

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 sníží oběh živin

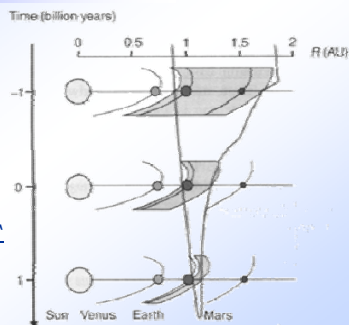


■ S. C. Morris: Life's solution, Cambridge University Press (2003) p. 91.

Jedinečnost Země

Správné místo v planetární soustavě

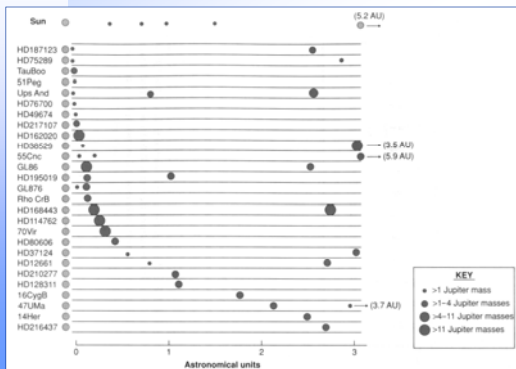
- Země se nachází v dlouhodobě obydlatelné zóně kolem Slunce
- Planetární soustava má Jupiter a obří plynné planety daleko od Slunce, kde „vychytávají“ komety & spol.
- Biologické cykly na planetě mají „pufrovací“ schopnost, tj. jasnost Slunce stoupla o 30 % od vzniku soustavy, ale teplota Země se nezvýšila...



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

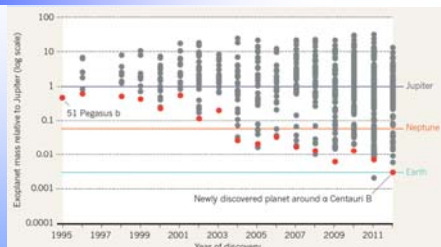
Jedinečnost sluneční soustavy

Porovnání s exoplanetárními systémy...



Jedinečnost sluneční soustavy

Porovnání s exoplanetárními systémy



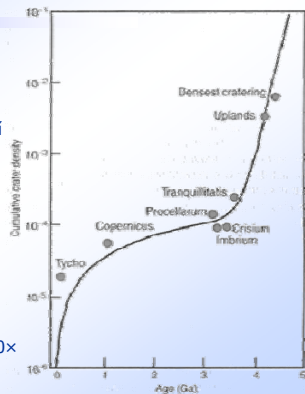
- Mise dalekohledu Kepler zatím nemá jediného kandidáta velikosti Země v obyvatelné zóně
- Odhaduje se, že jen 10–15 % hvězd hostí planety Zemského typu
- Kamenné planety zřejmě vznikají velmi složitě...

■ E. Hand, Nature 490 (2012) 323.

Jedinečnost Země

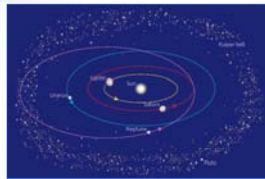
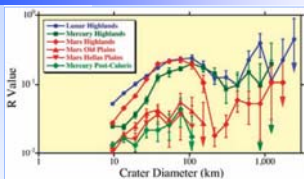
Na kosmické střelnici

- Záznam v podobě kráterů na Měsíci ukazuje frekvenci dopadů planetek a komet v závislosti na čase
- **Intenzivní éra bombardování skončila před 3,8 Gy** (v jejím závěru vznikla měsíční moře)
- **Další výrazný pokles impaktů lze vysledovat pře 1 Gy**
- Velké ničivé impakty se dnes odehrávají v řádech desítek milionů let
- Katastrofické dopady těles mají přímý vliv na evoluci
- Pravděpodobnost dopadu tělesa na Zemi je 96 % a těleso má 100x větší dopadovou energii



Jedinečnost Země

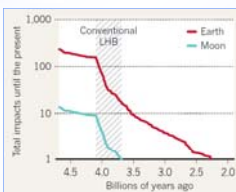
Na kosmické střelnici – proč?



- Existuje korelace velikosti a charakteru kráterů starých 3,8 Gy na vnitřních tělesech sluneční soustavy
- Charakter kráterů odpovídá tělesům z hlavního pásu planetek
- Pozdější dopady mají charakter těles blízkozemních planetek
- **Sluneční soustavou pravděpodobně před 3,8 Gy zamíchaly posuny drah planet**
 - Vzájemná migrace Saturnu a Jupiteru
 - Vystřelení Neptunu na periferii mohlo vést ke staršímu bombardování vnitřku sluneční soustavy
- R. G. Strom, Science 309 (2005) 1847–1850.

Jedinečnost Země

Na kosmické střelnici – proč?

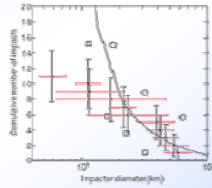


- Země čelila **prodloužené éře bombardování až do ca. 2 Gyr**
- Zemi zasáhlo nejméně 100 těles zodpovědných za tvorbu měsíčních moří o velikosti 300 km a 40 způsobilo impaktní bazény až 1000 km
- **Dopady způsobeny rozvolněním pásu asteroidů až na 1,7–2,1 AU (E-pás)**
- Nejstarší obří krátery jsou Sandbury (Kanada, 1,85 Gyr) a Vredefort (Jižní Afrika, 2,02 Gyr) o průměrech 250 a 300 km

■ H. Thompson, Nature 484 (2012) 429. F. T. Kyte, Nature 485 (2012) 44–45.

Jedinečnost Země

Na kosmické střelnici – proč?



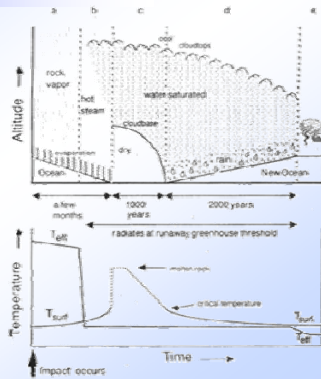
- Dopady >2 Gyr **nepřímé záznamy v podobě vrstev sferulitů** (sférické částice vzniklé kondenzací ze silikátových oblaků vytvořených impaktem)
- Známe ca. 20 vrstev sferulitů (250µm částic) z období 2,0–3,5 Gyr (záznam útržkovitý >3,5 Gyr, neexistuje pro >3,8 Gyr)
- Tloušťka vrstvy je úměrná velikosti impaktoru (nalezeno 17–70 km)
- Rychlosti dopadu těles byly vyšší 21–25 km/s než běžné (<20 km/s)
- Rámcově souhlasí s vyšší rychlostí těles z E-pásu planetek

■ B. C. Johnson & H. J. Melosh, Nature 485 (2012) 75–77. W. F. Bottke et al., Nature 485 (2012) 78–81.

Jedinečnost Země

Na kosmické střelnici

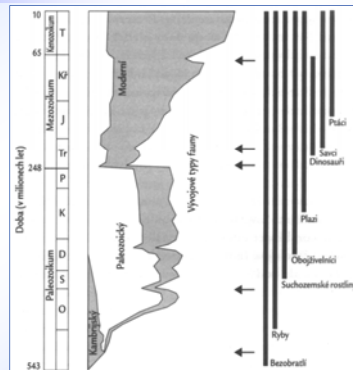
- V počátcích existence planety mohly být katalyzmatické dopady těles časté
- **Důsledky gigantického impaktu** (těleso >500 km)
 - Vypaření hornin v místě dopadu (T atmosféry 2000 °C)
 - Vypaření oceánů (atmosféra 1500 °C po staletí)
 - Extrémní skleníkový efekt (T_{surf} – teplota povrchu, T_{eff}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



Jedinečnost Země

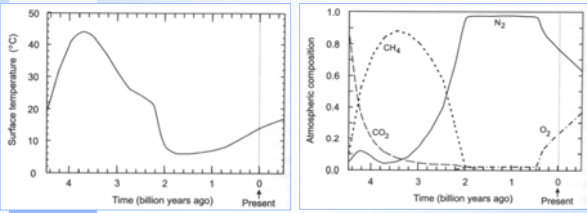
Na kosmické střelnici

- Otec a syn Alvarezovy prokázaly, že vymření dinosaurů před 65 My (**hranice křída–T**) souvisí s dopadem planetky (kráter Chicxulub v Mexickém zálivu)
- Ostatní menší vymírání lze pravděpodobně vysvětlit rovněž dopady planetek, ale důkazy chybí
- Vymírání na **hranici perm – trias** je velkou záhadou
 - Vymřelo minimálně 90 % všech druhů
 - Možnost dopadu planetky byla vyloučena



Jedinečnost Země

Nejasnosti s teplotou a atmosférou

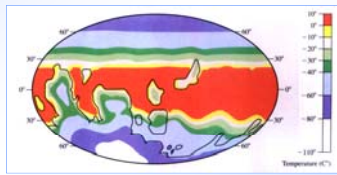


- Vývoj teploty a složení pozemské atmosféry čase
- Není doposud jasné, zda-li teploty na dávné Zemi nebyly vyšší
- Zastoupení izotopů kyslíku v horninách ukazuje, že teplota mohla být z počátku mnohem vyšší: před 3 Gy 70 °C, před 2 Gy 60 °C, a teprve před 1,5 Gy klesla na 40 °C
- Vyšší teploty by mohly 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 kabříčkou explozi
- Po jejím konci se ropoutala klimatická změna – vítr 70 km/h, obří vlnobítí
- Možné jsou další globální glaciace např. Sturtian před 710 My

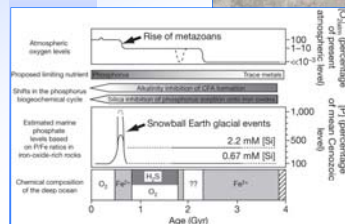
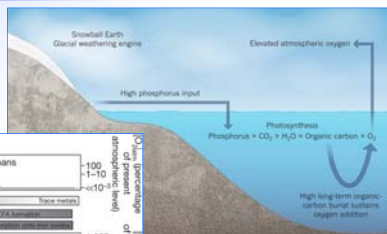


■ P. A. Allen, P. F. Hoffman, Nature 433 (2005) 123–127.

Jedinečnost Země

Země jako sněhová koule

- Glaciální eroze vedla před ~750–650 Myr k obohacení oceánu o fosfor

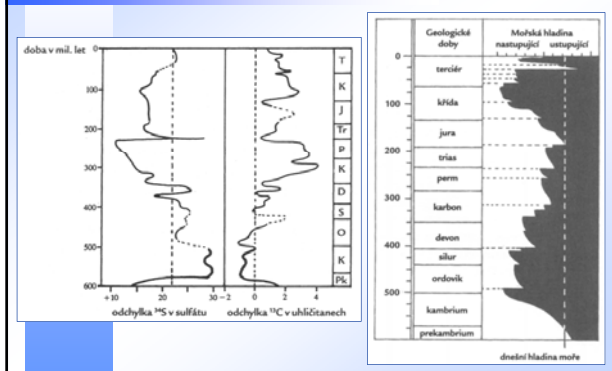


- **Obohacení o fosfor vedlo k větší depozici uhlíku a obohacení atmosféry o kyslík**

■ G. M. Filippelli, Nature 467 (2010) 1052–1053; N. J. Planavsky et al., Nature 467 (2010) 1088–1090.

Obyvatelnost Země

Jsou podmínky stabilní?



Obyvatelnost Země

Uhlíčitano-křemičitanový stabilizující cyklus

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

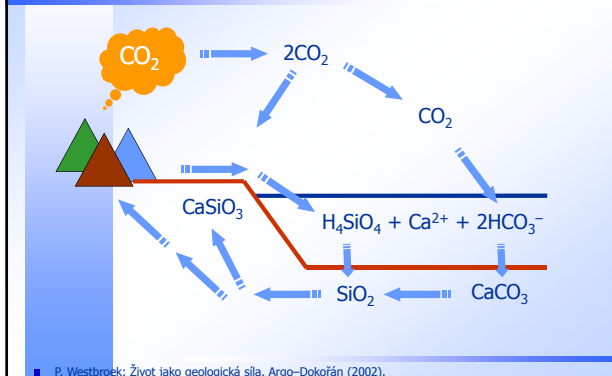
$$\text{CaSiO}_3 + 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{SiO}_2$$
 - Rozpuštěné, zvětrané křemičitanby jsou odnášeny proudy do moře, kde je organismy (existuje i abiotický ekvivalent reakce) využijí k tvorbě schráněk:

$$\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$$
 - **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. Kasting et al., Icarus 101 (1993) 108–128.

Obyvatelnost Země

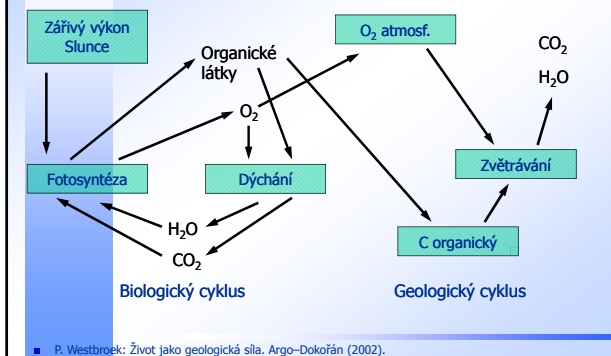
Uhlíčitano-křemičitanový stabilizující cyklus



■ P. Westbroek: Život jako geologická síla. Argo–Dokořán (2002).

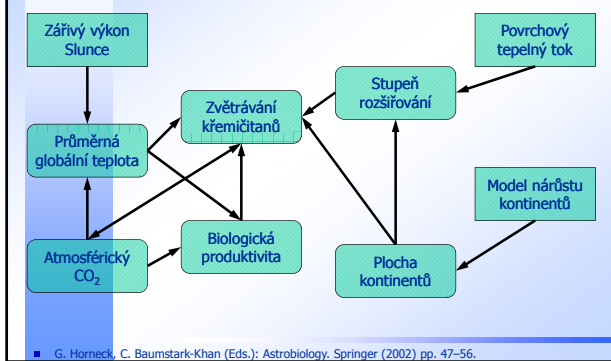
Obyvatelnost Země

Propojení biologického a geologického cyklu



Obyvatelnost Země

Jednoduchý model planety Země



Obyvatelnost Země

Matematická stránka modelu

- **Globální energetickou bilanci** lze vyjádřit Arrheniovou rovnicí: $(1 - a) S(t) = 4\sigma T_{\text{bbr}}^4$
a je albedo planety, σ Stefan-Noltzmanova konstanta, T_{bbr} značí efektivní teplotu záření černého tělesa
- **Povrchová teplota planety** T_s je vztažena k T_{bbr} faktorem skleníkového efektu: $T_s = T_{\text{bbr}} + \Delta T$
- **Geodynamický model** zahrnuje vztahy mezi zvětráváním a rozšiřováním pevniny: $f_{\text{wr}} \cdot f_A = f_{\text{sr}}$
 $f_{\text{wr}} = F_{\text{wr}} / F_{\text{wr},0}$ je normalizované zvětrávání, $f_A = A_C / A_{C,0}$ je normalizovaná plocha kontinentů a $f_{\text{sr}} = S / S_0$ je normalizované rozšiřování pevniny

■ G. Horneck, C. Baumstark-Khan (Eds.): Astrobiology, Springer (2002) pp. 47-56.

Obyvatelnost Země

Biomatematická stránka modelu

- **Biologickou produktivitu** Π lze vyjádřit jako funkci teploty a parciálního tlaku CO_2 v atmosféře:

$$\frac{\Pi}{\Pi_{\max}} = \left[1 - \left[\frac{T_S - 25 \text{ }^\circ\text{C}}{25 \text{ }^\circ\text{C}} \right]^2 \right] \left[\frac{P_{\text{atm}} - P_{\text{min}}}{P_{1/2} + (P_{\text{atm}} - P_{\text{min}})} \right]$$

Π_{\max} je maximální produkce (předpokládaný dvojnásobek současné), $P_{1/2}$ je hodnota, při které tlakově závislý faktor nabývá hodnoty $1/2$ a $P_{\text{min}} = 10$ ppm je minimální tlak potřebný pro průběh fotosyntézy

- **Nulová produktivita** vychází mimo interval $T_S < 0, 50 > \text{ }^\circ\text{C}$

■ G. Horneck, C. Baumstark-Khan (Eds.): Astrobiology, Springer (2002) pp. 47–56.

Obyvatelnost Země

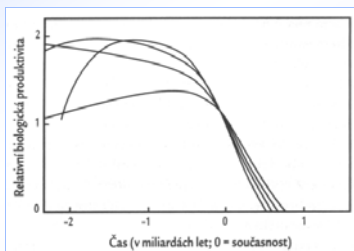
Biomatematická stránka modelu

- Biologická produktivita Země s časem postupně rostla

- **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

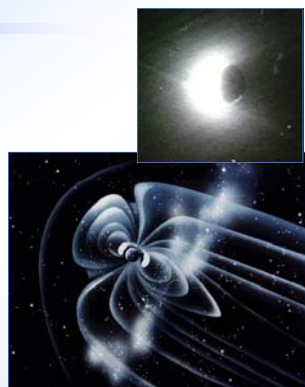


■ P. Ward & D. Brownlee: Život a smrt planety Země. Argo – Dokořán (2004).

Vývoj Země

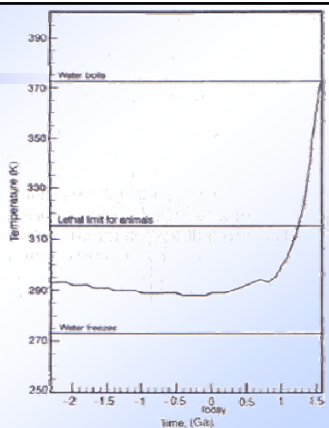
Ztráta oceánů

- **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. $9,8^\circ$ na 1 km)
- Při zvýšení teploty se mohou oceány vypařit velmi rychle...



Vývoj Země Nárůst teploty

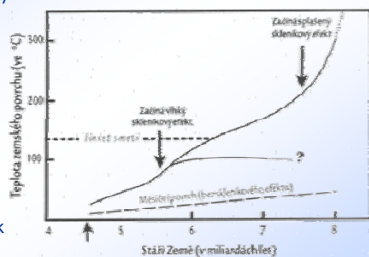
- Postupné narůstání jasnosti Slunce povede ke zvyšování teploty zemského povrchu
- Nárůst teploty bude způsobovat kolaps zpětnovazebných termoregulačních cyklů



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

Vývoj Země Nárůst teploty

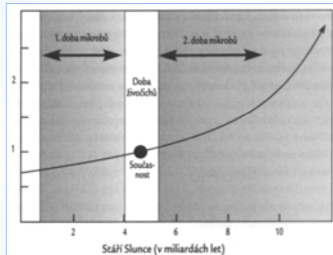
- Nárůst povrchové teploty bez skleníkového efektu by měl být lineární odezvou na zvyšování jasnosti Slunce
- **Vypařování oceánů způsobí na Zemi lavinovitý skleníkový efekt a zánik života**
- Pokud **Země ztratí oceány do 1,5 Gy**, pak bude nárůst teploty pozvolnější a skleníkový efekt se nerozeběhne



■ 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).

Země je opravdu vzácná... ...a když vezmeme to pivo, tak tu není špatně!