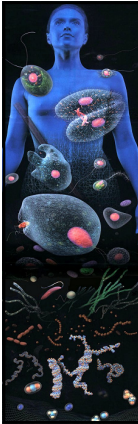


# Vzácná Země...

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

Vladimír Kopecký Jr.

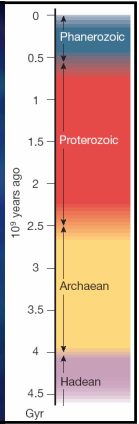
Fyzikální ústav Univerzity Karlovy v Praze  
Oddělení fyziky biomolekul  
<http://atrey.karlin.mff.cuni.cz/~ofb/kopeccky.html>  
kopeccky@karlov.mff.cuni.cz



# Vývoj Země

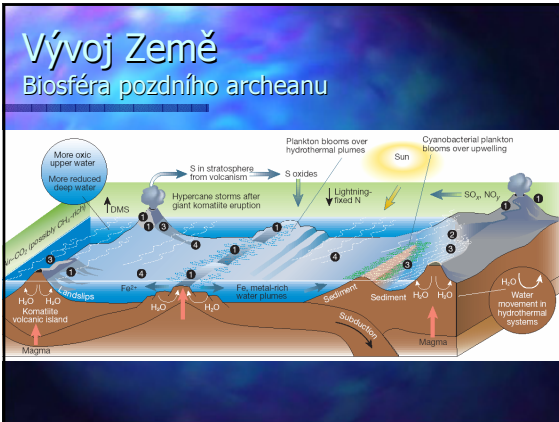
## Geologické členění dob

- Povrch Země se zformoval krátce (100 My) po jejím vzniku před 4,5 Gy
- Již před 4,3 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 dvojplanetu Země–Měsíc (těžiště leží 1400 km pod povrchem Země)
- Existence a vznik soustavy Země–Měsíc je krajně nepravděpodobná...



# Jedinečný Měsíc

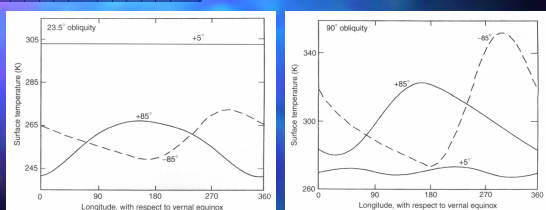
## Kde se Měsíc vzal?

- 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

## Co by bylo kdyby Měsíce nebylo



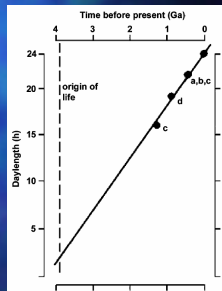
Model klimatických změn na Zemi bez Měsíce. Nepřítomnost Měsíce dovoluje masivní změny sklonu rotační osy od současné stabilní polohy 23,5° (vlevo) až po 90° (vpravo). Vyneseny jsou průběhy teplot pro polohu blízko rovníku 5° a poblíž pólu 85° (plná čára = severní, přerušovaná = jižní hemisféra). Na 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  $\sim 2$  hodin na  $\sim 52$  hodin (při plně vázané rotaci)
- Rychlá rotace spolu s mnohem větším přílivem mohla hrát roli při vzniku života – nahrazuje průběh PCR reakcí

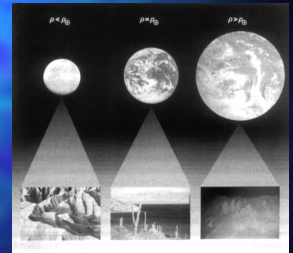


R. Lathe, Icarus 168 (2004) 18–22.

## 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

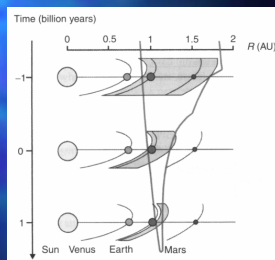


S. C. Morris: Life's solution. Cambridge University Press (2003) p. 91.

## Jedinečnost Země

Správné místo v planetární soustavě

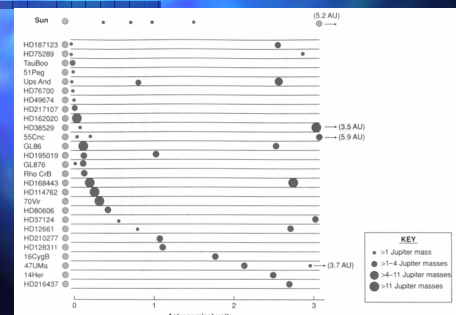
- Země se nachází v dlouhodobě obyvatelné zóně kolem Slunce
- Planetární soustava má Jupiter a obří plynné planety daleko od Slunce, kdy „vychytávají“ komety & spol.
- Biologické cykly na planetě mají „pufrovací“ schopnost, tj. jasnost Slunce stoupá o 30 % od vzniku soustavy, ale teplota Země se nezvýšila...



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

## Jedinečnost sluneční soustavy

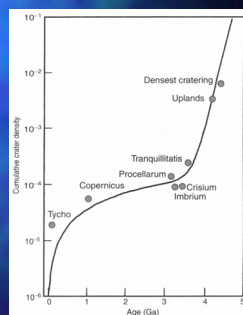
Porovnání s exoplanetárními systémy



## Jedinečnost Země

Na kosmické střelnici

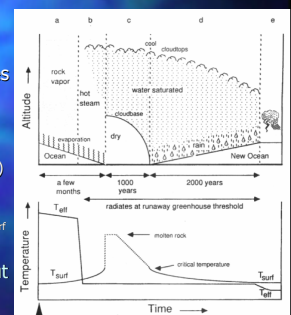
- Záznam v podobě kráterů na Měsíci ukazuje frekvenci dopadů planetek a komet v závislosti na čase
- Intenzivní éra bombardování skončila pře 4 Gy (V jejím závěru vznikla měsíční moře)
- Další výrazný pokles impaktů lze vysledovat pře 1 Gy
- Velké ničivé impakty se dnes odehrávají v řádech desítek milionů 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

- 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 ( $T_{\text{surf}}$  – teplota povrchu,  $T_{\text{eff}}$  – oblačnost z vesmíru)
- Život musel možná vzniknout opakovaně!

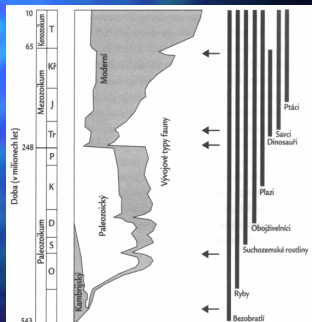




## Jedinečnost Země

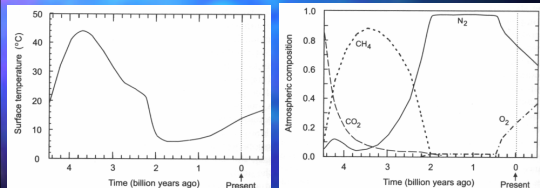
### Na kosmické střelnici

- Otec a syn Alvarezovy prokázaly, že vymření dinosaurů před 65 My (hranice křída-kvartér) souvisí s dopadem planety (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 planety byla vyloučena



## Jedinečnost Země

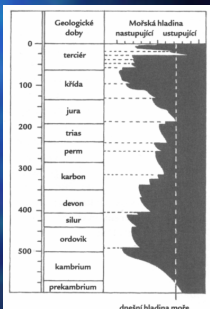
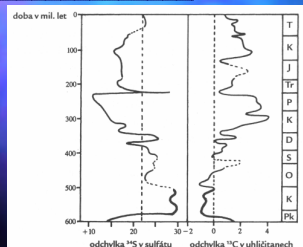
### Nejasnosti s teplotou a atmosférou



- Vývoj teploty a složení pozemské atmosféry čase
- Není doposud jasné, zda-li teploty na dávě 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

## Obyvatelnost Země

### Jsou podmínky stabilní?



## Obyvatelnost Země

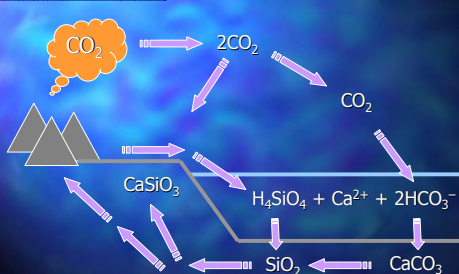
### Uhlíčitano-křemičitanový stabilizující cyklus

- Koncentrace  $\text{CO}_2$  v atmosféře je kontrolována pomalou interakcí s horninami (v časech  $>10^6$  let)
  - Křemičitany by odebraly veškeré  $\text{CO}_2$  za 400 Myr
  - Uhlíčitano-křemičitanový cyklus navrhl H. Urey roku 1952
- $\text{CO}_2$  je odstraňováno z atmosféry interakcí s Ca a Mg křemičitany (např. s wollastonitem  $\text{CaSiO}_3$ ) a následně ukládáno v podobě uhlíkatů:
 
$$\text{CaSiO}_3 + 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- + \text{SiO}_2$$
- 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  $\text{CO}_2$  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

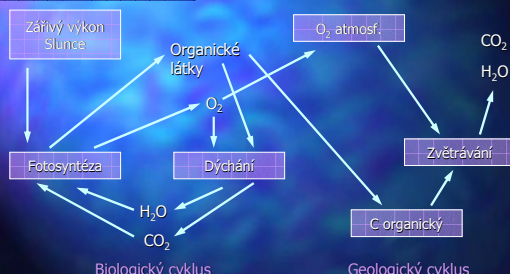
### Uhlíčitano-křemičitanový stabilizující cyklus



P. Westbroek: Život jako geologická síla, Argo-Doklady (2002).

## Obyvatelnost Země

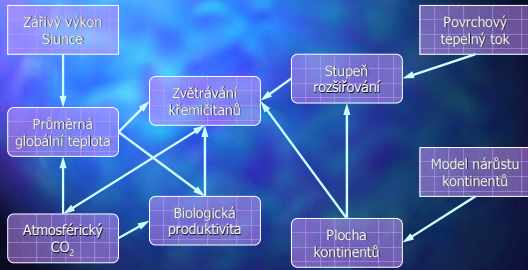
### Propojení biologického a geologického cyklu



P. Westbroek: Život jako geologická síla, Argo-Doklady (2002).

## Obyvatelnost Země

### Jednoduchý model planety Země



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

## Obyvatelnost Země

### Matematická stránka modelu

- Globální energetickou bilanci lze vyjádřit Arrheniovou rovnici:  $(1 - a) S(t) = 4\sigma T_{\text{bbr}}^4$   
a je albedo planety,  $\sigma$  Stefan-Noltzmanova konstanta,  $T_{\text{bbr}}$  značí efektivní teplotu záření černého tělesa
- Povrchová teplota planety  $T_s$  je vztažena k  $T_{\text{bbr}}$  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  $\Pi$  lze vyjádřit jako funkci teploty a parciálního tlaku  $\text{CO}_2$  v atmosféře:

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

$\Pi_{\text{max}}$  je maximální produkce (předpokládán 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

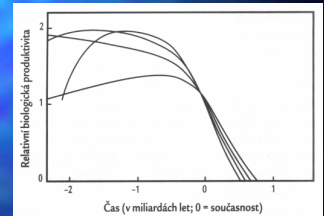
- Pro konstantní  $P_{\text{atm}}$  vyháží max. produktivita při  $T_s = 25^\circ\text{C}$
- Nulová produktivita vychází mimo interval  $T_s < 0, 50 >^\circ\text{C}$

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

## Obyvatelnost Země

### Biomatematická stránka modelu

- Biologická produktivita Země s časem postupně roste
- Možná již je za vrcholem
- Zcela jistě bude v budoucnu klesat a to v důsledku nedostatku  $\text{CO}_2$  a zvyšování teploty planety
- Je možné, že mikroby dokáží zamezit poklesu produktivity na nulovou úroveň po dlouhou dobu

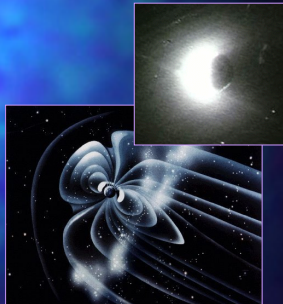


P. Ward & D. Brownlee: Život a smrt planety Země. Argo – Dokožán (2004).

## Vývoj Země

### Ztráta oceánů

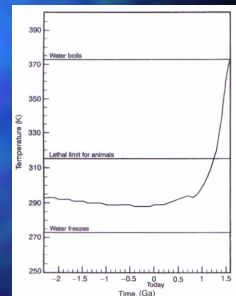
- Oceánská voda neustále uniká do vesmíru
- Z vesmíru lze pozorovat fluorescenci H I v Lymanově čáře alfa (UV záření)
- Závoj unikajícího vodíku se táhne do vzdáleností tisíců km
- Oceány se vypařují tempem 1 mm za 1 My
- Vypařování (přechodu do stratosféry) zabráňuje rychlý pokles teploty v atmosféře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



## Vývoj Země

### Nárůst teploty

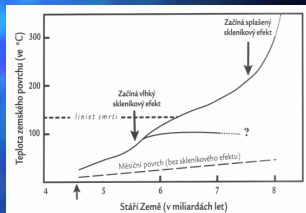
- Postupné narůstání jasnosti Slunce povede ke zvyšování teploty zemského povrchu
- Nárůst teploty bude způsobovat kolaps zpětnovazebných termoregulačních cyklů



## 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

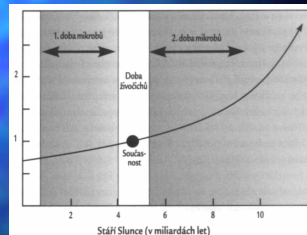


P. Ward & D. Brownlee: Život a smrt planety Země. Argo – Dokořán (2004).

## Vývoj Země

### Nárůst teploty

- Období, kdy může existovat komplexní život je velmi krátké
- Planeta Země vždy byla planetou mikrobů
- Jsou vyšší živočišné 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!

