

Astrobiológia

2

ProtoZem

Sformovanie+Mesiace+LHB

Povrch, hydrosféra, atmosféra

Biogénne prvky a procesy

Voda a jej alternatívy

Uhlík a jeho alternatívy

RNDr. Tomáš Paulech, PhD.
KAFZM, FMFI UK

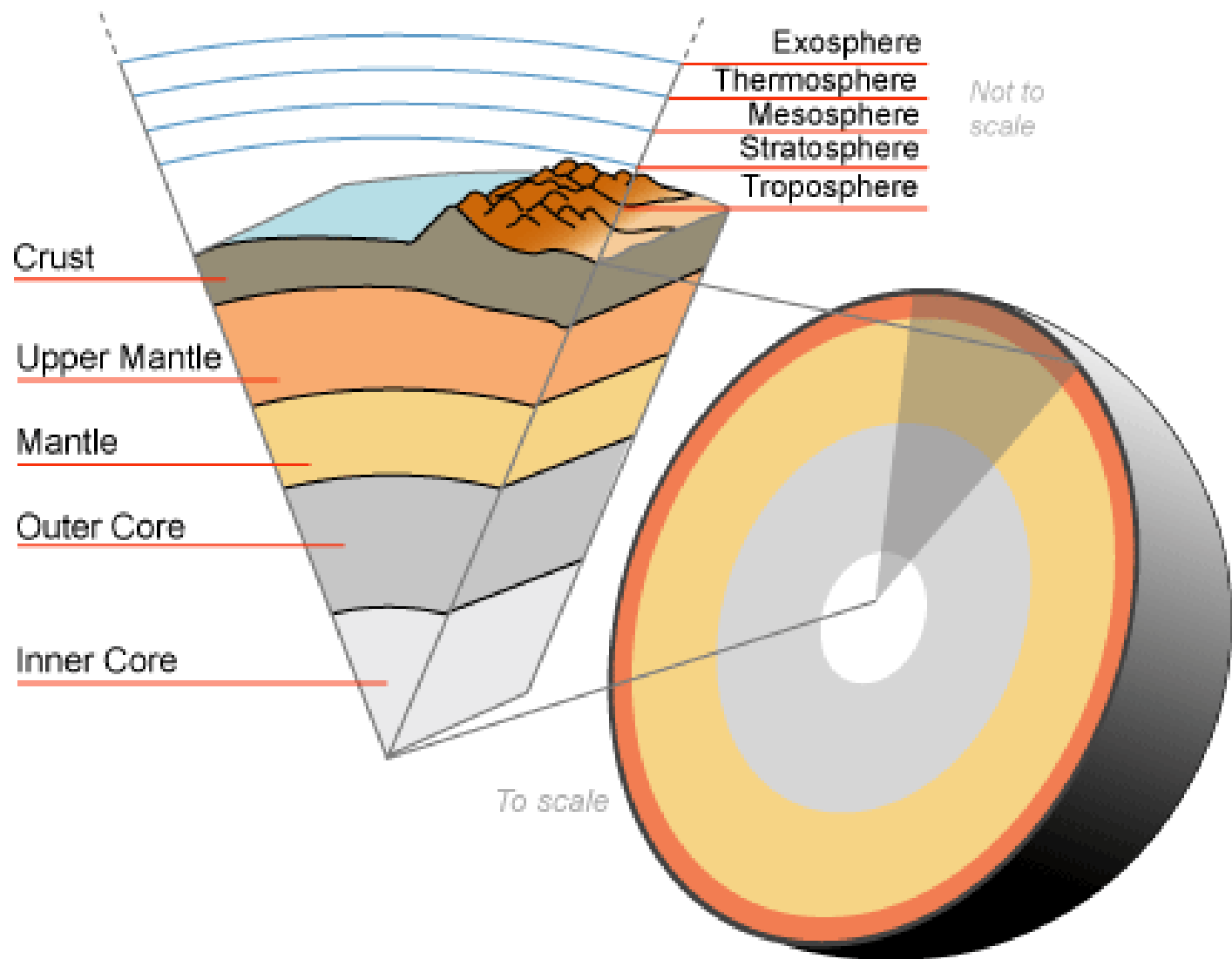
ProtoZem - sformovanie

- **sformovanie Zeme 4,56-4,54 Ga (proto-Earth)**
 - Po 10-150 My – akrécia a diferenciácia telesa Zeme
 - kovy vytvorili jadro+magnetosféru (!)
 - ľahšie prvky (Si) vytvorili plášť
 - štruktúra telesa Zeme bola krátko po vzniku podobná ako dnes
 - Dĺžka dňa bola cca 5-6 hodín
 - Hadaikum – 4,6-3,8 Ga – epocha od sformovania Zeme po LHB
- **vznik Mesiaca cca 4,53-4,4 Ga**
 - zrážka proto-Zeme s planetesimálou Theia (veľkosť Marsu)
 - sklon Zemskej osi
 - M. bol podstatne bližšie k Zemi ($a \approx 230.000 \text{ km} @ 3.8 \text{ Ga}$)⁶
 - M. sa vzdľaloval rýchlosťou cca 10km/rok (dnes 4cm/rok) – vzdľalovanie sa spomaľuje
 - M. mal oveľa výraznejší gravitačný vplyv ako dnes (cca 4x väčšie slapy, vlny 10-100m bežné)

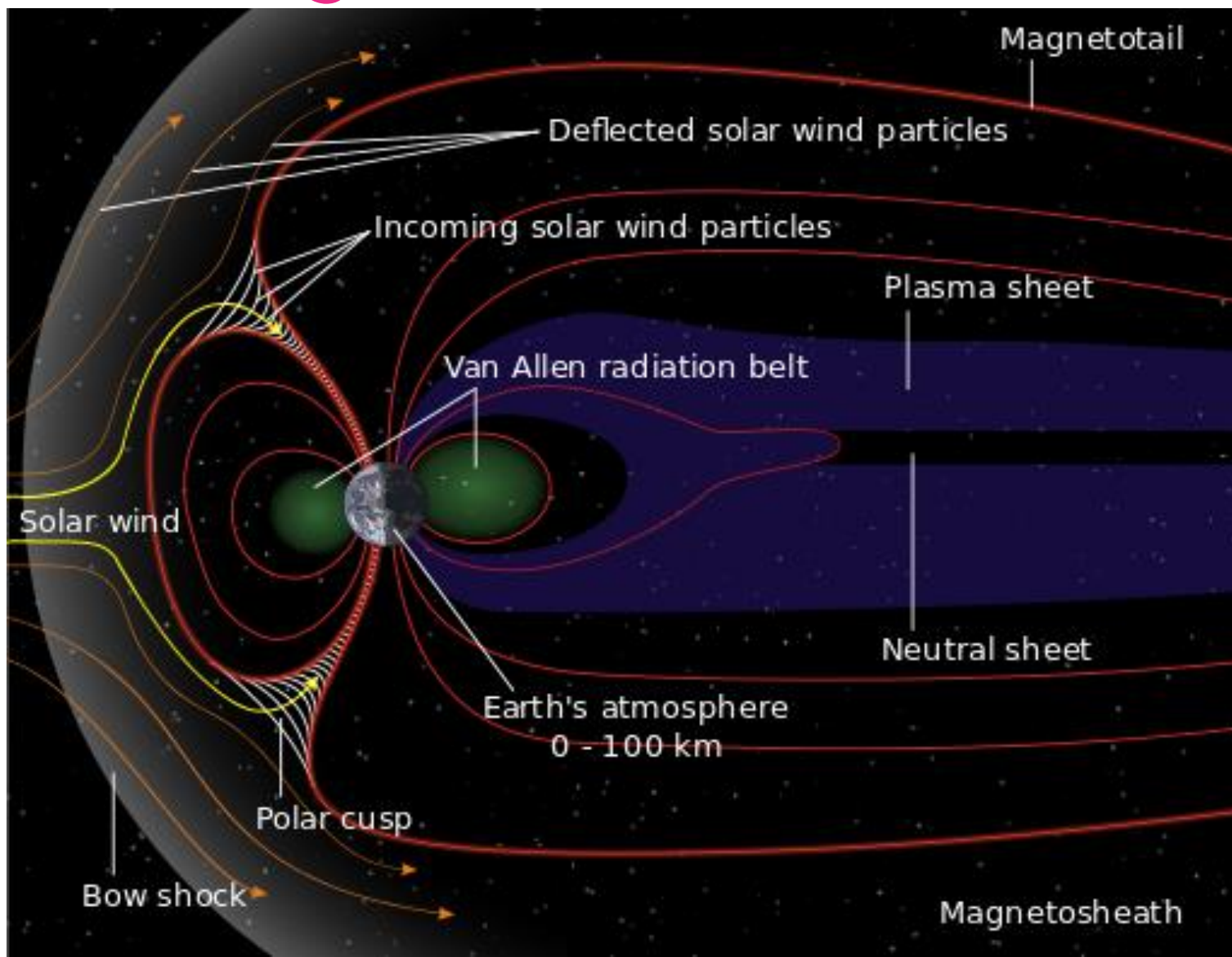
Late Heavy Bombardment (LHB)

- **Late Heavy bombardment 4.1 -3.8 Ga**
 - Dopady asteroidov a komét už po sformovaní telies vnútornej SS
 - rádovo vyššia frekvencia dopadov telies v dôsledku migrácie dráh J+S
 - Planetesimály navedené na excentrické dráhy
 - LHB – telesá navedené do vnútra SS
 - TNO – telesá navedené von z pôvodných dráh v SS
 - Iba zlomok populácií malých telies prežil migráciu J. (rádovo 1%)
 - Datované zo vzoriek Mesiaca+lunárnych meteoritov – horniny roztavené v úzkom časovom intervale
 - LHB doplnil siderofilické prvky (kovové) na povrchu – inak smerujú k jadru
 - Archaikum – 3,8 Ga – 2,5Ga – geologická epocha po skončení LHB
- **Faint young Sun paradox**
 - Slnko malo pred 3.8 Ga o 20% menšiu svietivosť (postupne horí viac He)
 - prečo všetko nezmrzlo, keď Slnko tak slabo svietilo?
 - vysvetlenie – skleníkové plyny pôvodnej atmosféry Zem zahriali
 - Dôkazy neisté – paradox stále prežíva (atmosféra by musela byť plná sklen. plyn)

Zem - stavba telesa



Zem - magnetosféra



ProtoZem - povrch

- **najstaršie horniny – 4-3,8 Ga** – cca 10% veku Zeme nemáme v geologickom zázname
 - **Isua + Akilia regions** – západné Grónsko 3,7 Ga
 - prastaré sedimenty, zmenené tektonikou
 - nenáhodné zhluky C12 v grafito – biologického pôvodu?
 - Podobne sú „triedené“ aj Fe, S, N izotopy
 - Severovýchod Kanady – skaly cca 4Ga
 - **vápenec** – sedimentárna hornina za prítomnosti vody
 - **pieskovec** – stlačený skamenený piesok vo vode – sedimentárny kremeň
 - **pillow lavas** – láva stuhnutá šokovo pod vodou
- **kontinenty na ProtoZemi**
 - väčšinou sopečné ostrovy - (malé) nezavodnené plochy
 - podobné geologické procesy ako dnes – litosferické pohyby, vulkanizmus
 - Výrazne transformovaný povrch vulkanickou činnosťou a tektonikou

ProtoZem - hydrosféra

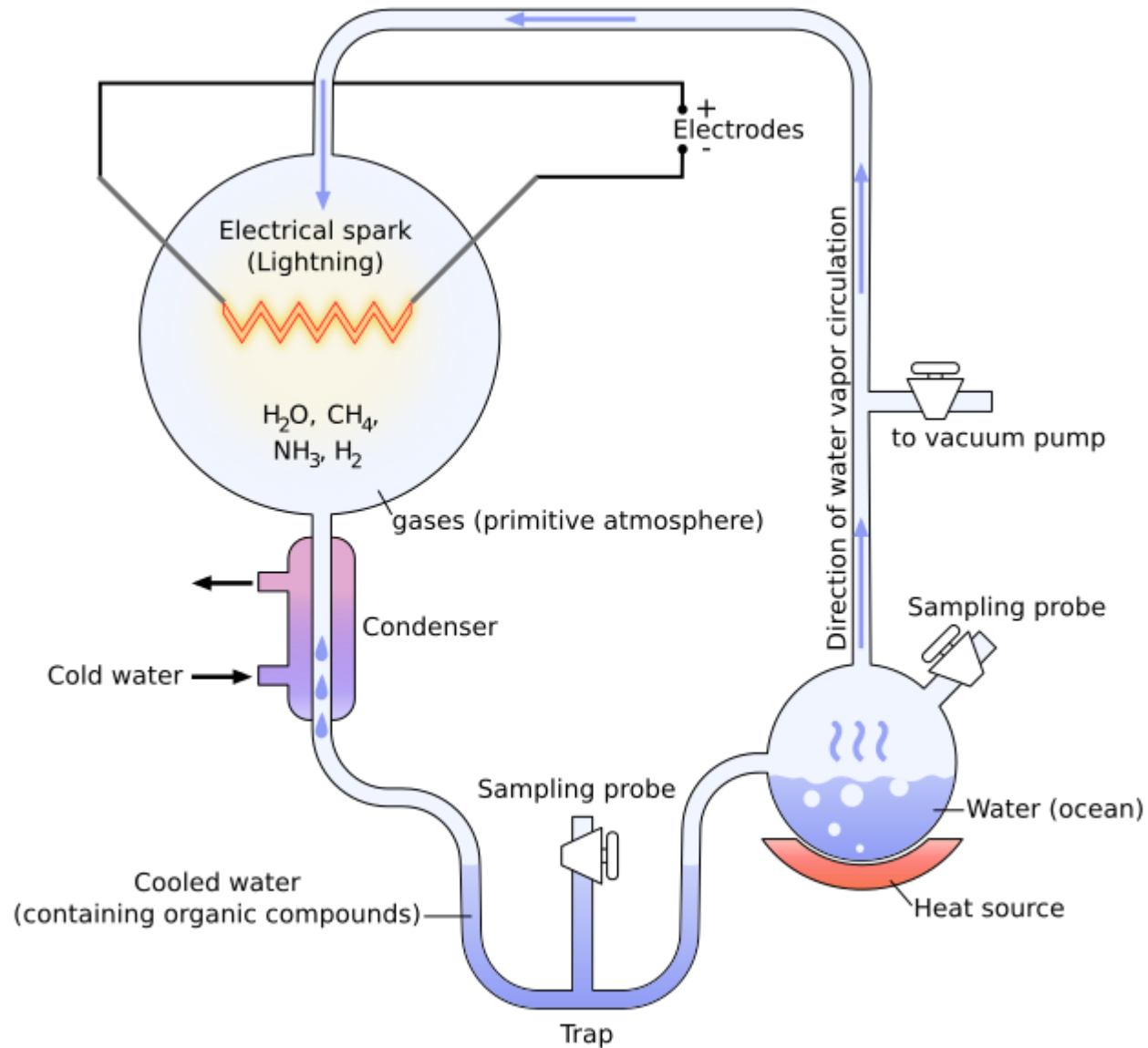
- Sformovanie oceánov:
 - Prebehlo pred cca 4.4 – 4.2 Ga
 - 4,2 Ga – stabilná hydrosféra (Joyce, 2002, Nature 418)
 - Oceán tvorí len zlomok objemu Z. telesa, hoci pre život je kľúčový
 - Oceán bez kyslíka! – mnoho neoxidovaných voľne dostupných minerálov ako Fe²⁺, S
 - Pravdepodobný pôvod v horninách s obsahom vody – uhlíkaté chondrity⁵
 - Vaporizácia asteroidov pri impaktoch
 - frekvencia zrážok oveľa vyššia ako dnes
 - H/D v Rosetta je proti vzniku oceánov z komét
 - Kométy mohli prispieť počas LHB (max. 10%)
- Svedkovia - transformované **mikro-zirkóny** (kremičitan zirkoničitý)
 - 4.4-4.0 Ga staré, Jack Hills, Západná Austrália
 - Inklúzie naznačujú:
 - vznik vo vodnom prostredí - oceán a kontinenty na povrchu planéty¹
 - zloženie atmosféry (podobnej dnešku): H₂O, CO₂, N₂, SO₂,...
 - Priaznivé teploty pre život
 - Pomer izotopov C¹²/¹³ naznačuje možnú prítomnosť života!⁴
- Hydrosféra dnes
 - 361 mil. km² povrchu Zeme (75%)
 - 1400 mil. km³ vody (vrátane zmrznutej)
 - 97,5% - slaná voda oceánov
 - 2,5% - sladká voda (68,9% - ľadovce, 30,8% - podzemná, 0,3% - povrch)

ProtoZem - atmosféra

- **Atmosféra ovplyvňovaná**
 - Geofyzikálne – vulkanizmus, tektonika, ...
 - Astrofyzikálne – erózia slnečným vetrom, kozmické žiarenie, UV
 - Biosférou – napr. úroveň O₂, CH₄, NH₃, CO₂, plynné cykly
- **Pomerne podobná teplotou a zložením súčasnej** (okrem kyslíka)
 - Zirkónové inklúzie – podporujú hypotézu o podobnom zložení atmosféry
 - teploty museli byť nad 0°C – aby existovala tekutá voda
 - Menej priehľadná a načervenalá farba atmosféry aj morí, podobná Marsu
 - Niektoré teórie naopak – veľmi iná pre-bio atmosféra (kvôli faint young sun paradoxu a potrebe skleníkových plynov)
- **Prchavé látky**
 - Generované vulkanizmom, uvoľňované z hornín pri formovaní telesa
 - Ide najmä o molekuly: N₂, CO₂, H₂O, málo aj H₂, CO, CH₄, stopové množstvá O₂
 - CO₂, CH₄ – účinné skleníkové plyny
 - Amoniak NH₃ – rýchlo rozkladaný UV žiarením
- **UV žiarenie**
 - Súčasná ozónová vrstva – ochrana biosféry
 - bez ozónovej vrstvy by bol **vplyv UV na biosféru 1000-násobný** (Mars)
 - bez kyslíka = žiadny ozón =
 - disociácia vody v oceánoch
 - organizmy na povrchu by trpeli UV
 - **Prežitie v:** hĺbinách oceánu, pod povrchom zeme, v zemskej kôre, skalách, prasklinách a pod.

Urey-Millerov experiment

- 1952 – Urey+Miller - simulovanie atmosféry prvotnej Zeme:
 - Zmes
 - voda H_2O
 - metán CH_4
 - amoniak NH_3
 - vodík H_2
 - vytvorili aminokyseliny a ďalšie komplexné molekuly výbojmi v plynoch
- atmosféra bola mierne odlišná od experimentu
 - nové experimenty = oveľa slabšie výsledky
- organické molekuly mohli byť už v protoplan. disku
- Život sa doteraz umelo vytvoriť nepodarilo – vid' abiogenéza

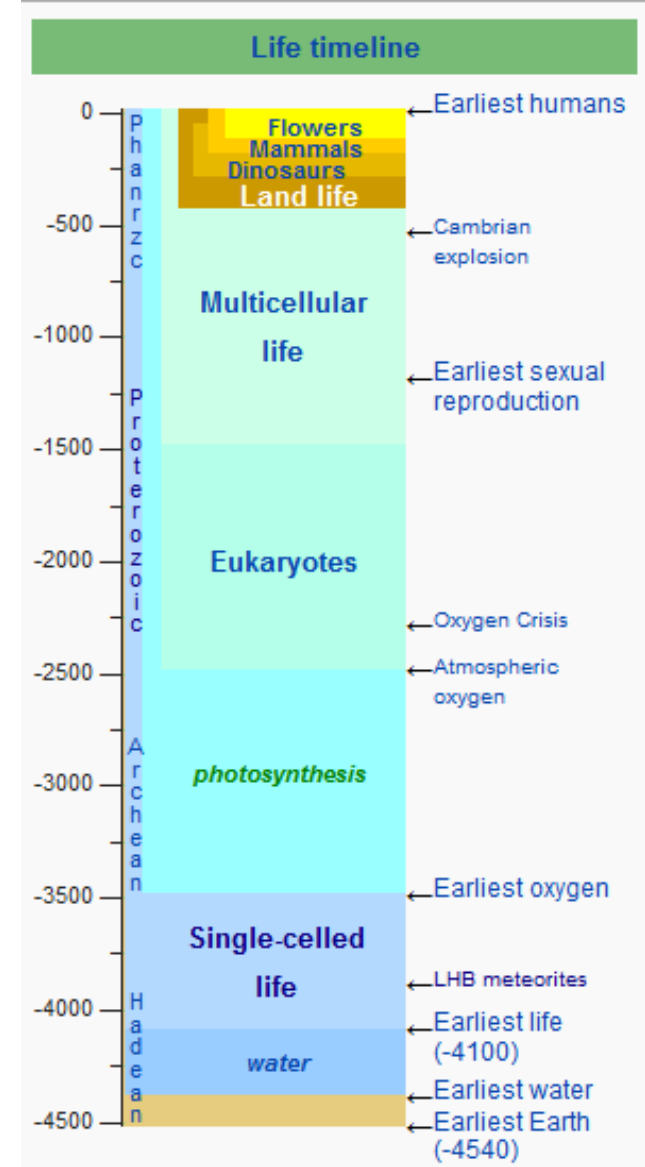
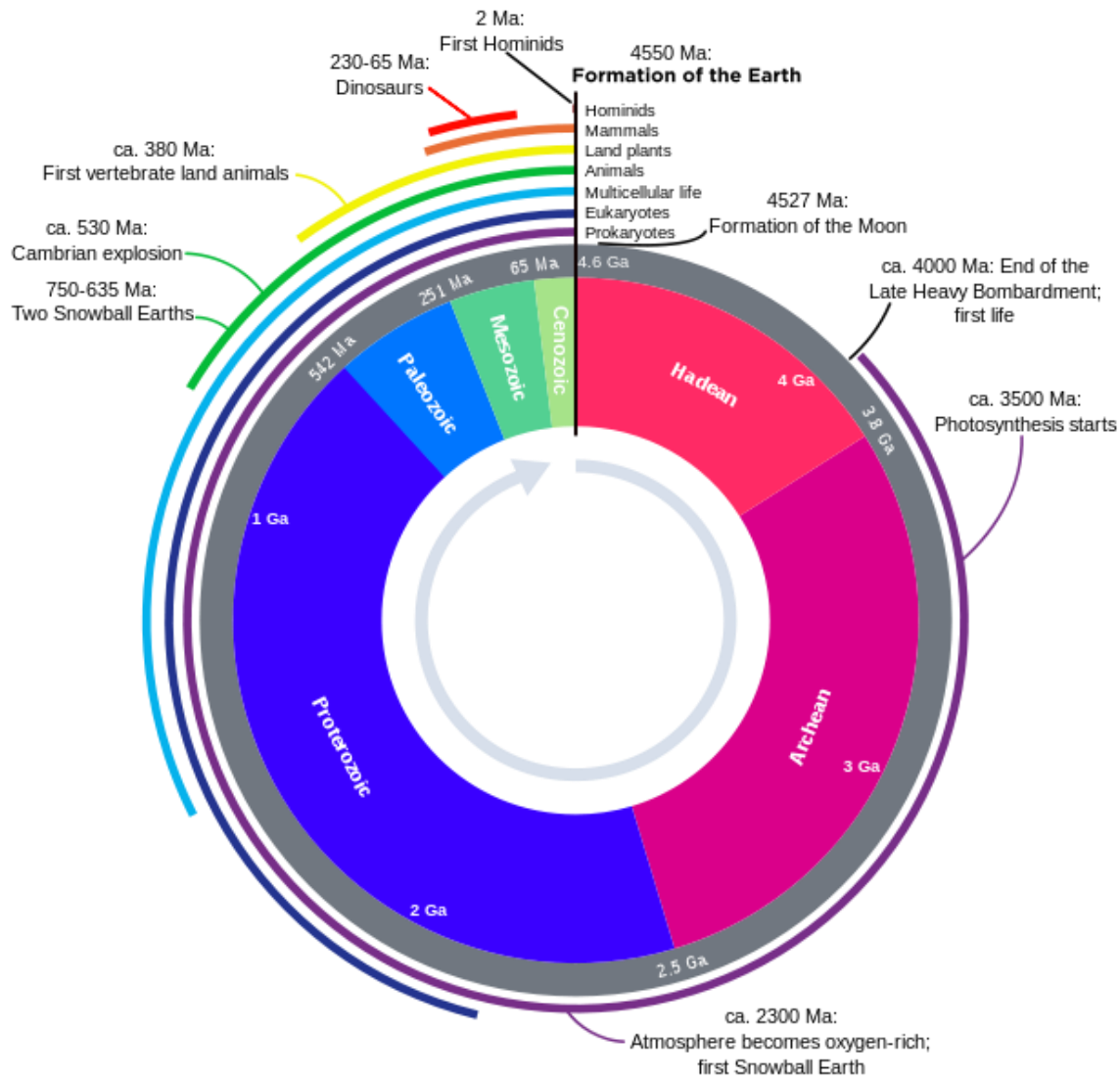


Urey-Millerov experiment, 1953 Univ. Chicago – simulácia proto-atmosféry Zeme

ProtoZem - organické (uhlíkaté) látky

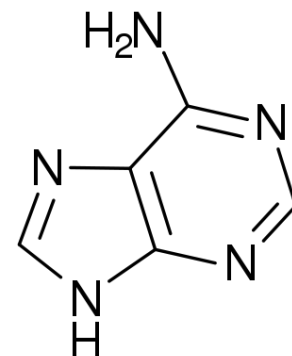
- Stavebné prvky obsiahnuté už v planetesimalnej Zemi
- Doplnené asteroidmi, veľmi malý príspevok komét
- Všetky základné organické látky možno vytvoriť prebioticky:
 - Aminokyseliny
 - Nukleotidy
 - Sacharidy-uhl'ovodíky (základ cukrov a ich polymérov ako škroby, celulóza...)
 - Lipidy (tuky)
- Príklady:
 - Serpentinizácia hornín (napr. olivínu)– príklad pozemskej tvorby organ. molekúl: acetáty, metán, až po aminokyseliny
 - Dôležitá prítomnosť Fe^{2+} v oceánoch a katalýza:
 - Amoniak, aminokyselín
 - Tvorba formaldehydu (a iných aldehydov) v atmosfére pomocou UV + syntéza sacharidov a ich polymérov
 - Nukleotidy CGATU – všetky možno vytvoriť anorganicky katalyzovanou reakciou z formamidu
 - Niektoré molekuly kovov dokážu katalyzovať reakcie aj bez proteínovej zložky (napr. pri fixácii uhlíka - RuBisCo)

História života na Zemi



Základné biogénne prvky

- Biogénne prvky : „**CHNOPS**“ - vo všetkých živých organizmoch! – tvoria 97% hmoty bunky
 - C - uhlík (nosný prvok „organickej“ chémie)
 - Uklíkový cyklus: 10% CO₂ ročne do biomasy fotosyntézou, návrat CO₂: chemoorganotrophs
 - CO₂ ako skleníkový plyn ovplyvňuje/stabilizuje teplotu atmosféry
 - H – vodík (protónové gradienty, tvorí 2/3 atómov človeka)
 - N – dusík (nukleotidy ACTG – adenin na obrázku - a mnoho ďalších zlúčenín)
 - Vysoký obsah N₂ v atmosfére – vulkanizmus
 - N₂ je inertný – biologicky katalytická redukcia na amoniak NH₄⁺ - iba dusík fixujúce baktérie
 - Cyklus N₂: diazotrofy -
 - O – kyslík (agresívny vysoko reaktívny plyn, umožňuje efektívnejšie bunkové dýchanie)
 - P – fosfor (ATP, fosfolipidy, fosfátové skupiny RNA)
 - Nenachádza sa v atmosfére, zdrojom sú zvetralé horniny (napr. apatit-fosforečnany vápenaté)
 - S - síra (zložka dôležitých aminokyselín, aktívne zóny enzýmov, sírolipidy membrán pri nedostatku fosforu)
 - C+H+O –tvoria 90+ % atómov tiel organizmov
- Esenciálne stopové prvky (tiež v každej bunke ale v malých množstvách)
 - Na, Mg, K, Ca, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Se, Mo, Cl (hlavne kofaktory enzýmov)
- CHNOPS sú základom:
 - **Aminokyselín** a ich polymérov – bielkovín (tvoria 2/3 „sušiny“ v tele človeka)
 - Bioféra využíva iba cca 20 z tisícok chemicky možných (prečo?)⁵
 - **Cukrov** – aromatické cykly, polyméry - karbohydráty podobne ako proteíny
 - **ATP – adenosíntrifosfátu** - základná univerzálna energetická molekula života
 - adenín (aminokyselina) + ribóza (cukor) + fosfát = adenosíntrifosfát (ATP)
 - **RNA, DNA** – základné informačné molekuly (fosfátová chrbtica + nukleotické bázy)
- život je ako zložitá „stavebnica“ zložená z jednoduchých elementov chnops+H₂O



Zastúpenie CHNOPS - príklad: človek

Table 2.1 Elements in the Human Body

Element	Symbol	Percentage of Body Mass (including water)	
Oxygen	O	65.0%	} 96.3%
Carbon	C	18.5%	
Hydrogen	H	9.5%	
Nitrogen	N	3.3%	
Calcium	Ca	1.5%	} 3.7%
Phosphorus	P	1.0%	
Potassium	K	0.4%	
Sulfur	S	0.3%	
Sodium	Na	0.2%	
Chlorine	Cl	0.2%	
Magnesium	Mg	0.1%	
Trace elements (less than 0.01% of mass): Boron (B), chromium (Cr), cobalt (Co), copper (Cu), fluorine (F), iodine (I), iron (Fe), manganese (Mn), molybdenum (Mo), selenium (Se), silicon (Si), tin (Sn), vanadium (V), zinc (Zn)			

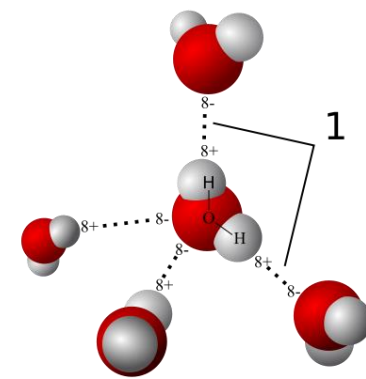
Chemické väzby

• Atómy

- Štandardne neutrálny = počet elektrónov a protónov je rovnaký (na rozdiel od iónov)
- valenčné elektróny – na najvyššom orbitále
- ióny
 - H, Na majú 1 e- na s orbitále – ľahko strácajú e- = často ako H⁺, Na⁺
 - Cl - chýba mu 1 e- - ľahko získava – tvorí Cl⁻
 - Ca – ma 2 e- valenčné – stráca ich = Ca²⁺
 - Väzbová kapacita – koľko väzieb môže vytvoriť vďaka valenčnej sfére - H = bonding capacity 1, C = 4, O = 2
- **Elektronegativita** – schopnosť atómu priťahovať väzbové elektróny iných atómov do svojej valenčnej sféry
 - Najviac z prvkov F = 4.1, bioprvky v poradí O(3.4), N, C, H(2.2)

• Chemické väzby

- Chémia = fyzika elektrónového obalu
- kovalentná
 - elektrón je **zdieľaný** oboma atómami
 - zdieľanie e- môže byť:
 - rovnomerné: H₂
 - nerovnomerné =: CH₄, CO₂...
 - závisí od väzbovej kapacity atómu
 - kovalentná väzba je v **závislosti od elektronegativity atómov**:
 - **nepolárna** – H₂, O₂, CH₄ (rozdiel elektronegativít do 0,4, C a H majú cca rovnakú elektronegativitu)
 - **polárna** – H₂O (rozdiel elektronegativít 0,4-1,7) - molekula je polárna, má kladný a záporný pól
 - Iónová (extrémne polárna) – NaCl - rozdiel elektronegativít nad 1,7)
- vodíková
 - pomerne **slabá** väzba oproti kovalentnej - vytvorená priťahovaním nábojov **polárnych molekúl**
 - napr. **H₂O – Amoniak NH₃**
 - H₂O je na strane vodíkov mierne **kladne** nabitá
 - NH₃ je na strane N mierne **záporne** nabitá
 - DNA-bázy spojené vodíkovou väzbou



Brownov pohyb

- **História:**
 - objav: Robert Brown – 1827 – botanik pozoroval mikroskopom náhodný pohyb zrnka peľu vo vode
 - vysvetlenie: A.Einstein – 1905 – matem. teória a predpovede existencie molekúl a atómov
 - Nobelova cena – 1926 – Jean Perrin - potvrdenie
 - Fieldsova medaila (W.Werner, 2006)
- **Vlastnosti**
 - Rozhodujúci efekt pre vytváranie chemických reakcií a zlúčenín – esenciálny pre (bio)chémiu a život
 - Každá častica absolvuje rádovo 10^{21} zrážok/s (!) ²
 - Molekuly vody (cca 0,2nm veľké) náhodne narážajú na objekt – spôsobujú náhodný 3D pohyb (opitý námorník)
 - Popisované fyzikálne rovnicami difúzie plynov/kvapalín
 - „Narrow escape problem“ – vypočítať čas, za ktorý sa dostane objekt (bielkovina) Brownovým pohybom z obmedzeného priestoru(bunky, jadra...) cez otvor(y) daného rozmeru (akvaporíny, iónové kanály, póry jadra...)
 - Vďaka Brownovmu pohybu je rýchlosť chemických reakcií a biochemických pochodov za normálnych fyz. podmienok extrémne rýchla

Stereoizoméry v biosfére

- **Homochiralita** – preferencia určitých stereoizomérov
- Živé organizmy využívajú molekuly s rovnakou chiralitou
 - Aminokyseliny – ľavotočivé
 - Nukleotidy a cukry – pravotočivé
- Racemic mixture - pri neregulovanej chemickej syntéze vzniká pomer izomérov 50/50
- Aj malý rozdiel v prospech jedného izoméru vedie k jeho prevahe (Soaiho reakcia)
 - Platí aj pre anorganickú chémiu
 - Rozdiel môže byť vyvolaný externým faktorom, napr. UV žiarením
 - Niekedy sú izoméry sami sebe katalyzátorom (uprednostnia produkciu svojho izoméru)
- Murchison meteorite
 - Pomer izomérov môže pochádzať už z primordiálnej hmoty planét
 - L-Alanínu 2x viac ako R izoméru
 - L-glutamovej kyseliny 3x viac ako R izoméru
 - Pozorované cukry preferenčne R
 - Pozorované aminokyseliny preferenčne L
 - Rovnaké usporiadanie ako v biosfére

Voda

- Esenciálna molekula pre všetok známy (pozemský) život
- prítomnosť kvapalnej fázy na povrchu definuje Obyvateľnú zónu (exo)planét
- $2xH + O$ viazané polárnou kovalentnou väzbou
- H_2O je jedna z najmenších molekúl vôbec – ľahko preniká, viaže sa, uvoľňuje sa, produkuje H^+ a OH^-
- Je zložená z CHNOPS prvkov
- Je bežná – ľahko dostupná
- Tvorí 40% (suochozemské rastliny) až 90% (medúzy) tiel organizmov

- **rozpúšťa** mnoho chemikálií (vďaka polarite)
 - obklopí substrát
 - komplexné molekuly sa nevytvoria samé v suchom prostredí
 - Umožňuje rozptýlenie sploďín metabolizmu
 - Nevýhoda: aktivita vody dezintegruje biopolyméry, napr. DNA/RNA musia byť sústavne reparované

- **ľad pláva** na vode ($917\text{kg}/\text{m}^3$ vs $1000\text{kg}/\text{m}^3$) – život môže existovať pod ľadom
 - Spôsobené tým, že voda má maximum hustoty pri 4°C - anomália
 - iná látka by klesla a celý objem jazera by zamrzol (ľad má o 9% väčší objem ako voda)
- vyskytuje sa v kvapalnom stave **v širokom rozmedzí teplôt**
 - v polárnych oblastiach (jazera pod ľadom)
 - v blízkosti gejzírov/sopiek (kvapalná nad 100°C kvôli extrémnemu tlaku)...
 - na hmotnejších exoplanétach môže byť pevná aj do vyšších teplôt
 - vysoká tepelná kapacita a teplo vyparovania (polárnosť)– regulácia teploty/klímy Zeme, ochrana pred výkyvmi prostredia
- Je **polárna molekula** - v kvapalnej fáze sú molekuly viazané vodíkovými väzbami
 - spôsobuje to makroskopické prejavy: povrchové javy, kapilaritu, vysokú teplotu varu
 - nezvyčajne veľa vodíkových väzieb na takú malú molekulu
- OH väzby intenzívne pohlcujú UV žiarenie (ochrana biosféry pod hladinou)

Voda - alternatívy

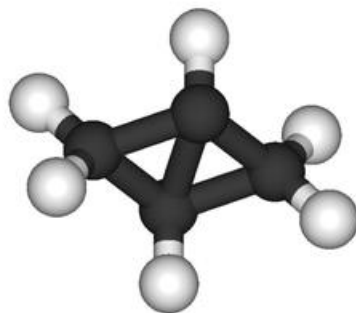
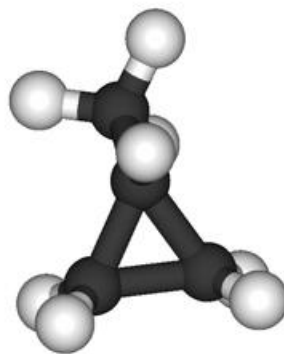
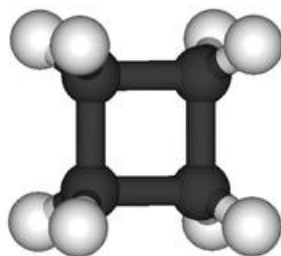
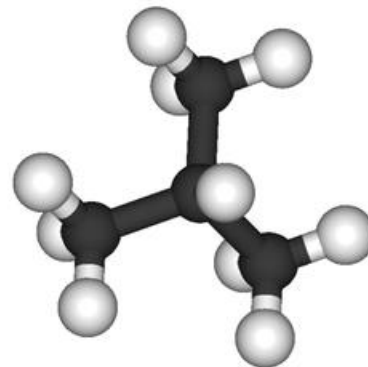
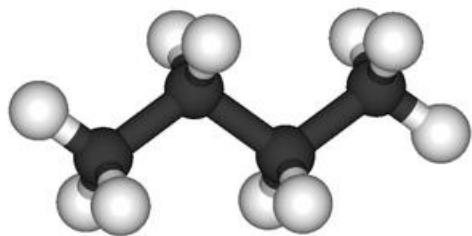
- **Amoniak NH₃** - alternatíva k H₂O #1:
 - tiež ľahko **rozpúšťa mnoho chemikálií**
 - môže **vytvoriť obdoby aminokyselín** s jadrom z amoniaku, ktoré môžu polymerizovať podobne ako aminokyseliny
 - má však **úzky rozsah kvapalnosti: -78 až -34 °C** (nemusí byť problém)
 - Vhodný pre potenciálny život v chladnom prostredí
 - v pevnom stave **klesá pod kvapalnú fázu** na rozdiel od vody
 - Rozpúšťa fosfolipidy – membrány by museli byť na inom princípe
- **Fluorovodík HF** - alternatíva k H₂O # 2:
 - **široký rozsah kvapalnosti: -83 až +20°C**
 - **je dobré rozpúšťadlo**
 - **fluór je zriedkavý – 100.000x** menej ako kyslík
 - fluór je agresívny a toxický pre život
- **Metán CH₄**
 - je nepolárna molekula na rozdiel od vody
 - jazero Kraken@Titan

Uhlík a jeho alternatívy

- vytvára obrovské množstvo stabilných molekúl s inými biogénnymi prvkami
- kostry organických molekúl sú tvorené rôznymi väzbami C-C (a cyklami)
- molekuly môžu voľne rotovať okolo C-C väzieb (propán) – mnoho 3D konformácií
- **sila väzieb** týchto prvkov je **približne rovnaká**
- uhlík môže **prvky zamieňať**
 - netreba k tomu veľkú aktivačnú energiu
 - versatility - variabilita reakcií a molekúl
- zlúčeniny sú **stabilné**

- **Si (kremík)** - alternatíva uhlíka #1 (925x viac Si ako C v Zemskej kôre)
 - **Si vytvára veľmi silné a stabilné väzby s kyslíkom** – oxid kremičitý (piesok, skaly...)
 - Väzby Si-OI sú extrémne stabilné (bunkové steny rastlín), naopak väzby Si-H a Si-Si príliš nestabilné
 - **kremík je veľmi reaktívny prvok**
 - Methane C-H₄ -založený na uhlíku horí, ale musíme ho zapáliť (napr. zemný plyn)
 - Silane Si-H₄ – sa samovznieti natoľko je reaktívny s kyslíkom
 - Za mimozemských podmienok (napr. extrémny chlad - Titán) môže byť reaktívnosť výhodou
 - Je schopný vytvárať polyméry (silany)
 - Vytvára molekulárne kostry a cykly ako uhlík
 - **Záver: nie je vhodný** (za pozemských podmienok), musel by absentovať kyslík, alebo byť veľmi chladno

- Iné alternatívy uhlíka
 - **He, Ne (Hélium, Neón)** sú inertné
 - O, N, Bór- limitovaná schopnosť tvoriť väzby s inými atómami- nevytvoria tak komplexné molekuly
 - Mg, Ca, K, Na – vytvárajú ionové väzby - majú problémy vytvoriť väzby s mnohými prvkami spôsobom, ako to robí uhlík
- **UHLÍK VYHRÁVA** - **stabilný, komplexný, variabilný** (hlavne za pozemských podmienok)



Konformácie C₄-alkánov

Alternatívna chémia života?

- život na Zemi je založený na uhlíku a vode
- nie je to len úzky antropocentrický pohľad
- skutočne najlepšie z dostupných prvkov
- alternatívy sú nepravdepodobné, ale možné
- BIOSPACES - potenciál životných foriem v alternatívnych chemických prostrediach
 - Podobne ako ekologické niky už živých organizmov
- Mnohé molekuly boli **predpripravené** v protooblaku/kométach/prachu/asteroidoch pre vznik života

Diskusia, zdroje

- Gas retention plot: <http://astro.unl.edu/naap/atmosphere/animations/gasRetentionPlot.html>
- Animácia Života, vesmíru a všetkého:
 - <http://www.johnkyrk.com/evolution.html>
 - <https://www.bighistoryproject.com/portal>
- ¹Zirkóny a vek Zeme
 - http://www.geology.wisc.edu/zircon/Wilde_et_al.PDF
 - <http://phenomena.nationalgeographic.com/2014/02/24/searching-for-the-oldest-pieces-of-earth>
- ⁴Jack Hills, izotopy C12/13 - <http://www.newscientist.com/article/dn14245-did-newborn-earth-harbour-life.html#.U5W2c1t8E>
- ⁵Podzemne ložiská vody viazanej v kryštáloch:
 - <http://www.sciencemag.org/content/344/6189/1265>
 - Uhlíkaté chondrity ako zdroj vody na Zemi, Mesiaci a asteroidoch - <http://osel.cz/index.php?clanek=6909>
- ⁶Vývoj systému Zem-Mesiac:
 - http://lasp.colorado.edu/life/GEOL5835/Moon_presentation_19Sept.pdf
 - <http://osel.cz/index.php?clanek=7646>
- Late heavy bombardment era pri inej hviezde? - <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2011/pdf/2438.pdf>
- LHB mohlo pokračovať až do 3,0 Ba - <http://www.newscientist.com/article/dn26055-earths-early-life-endured-long-asteroid-bombardment.html#.U SLIPI t8F>
- Tvorba nukleotidov pri LHB: <http://www.livescience.com/49049-beginning-of-life-experiment.html>
- Alternatívna chémia života - <http://chemistry.emory.edu/home/assets/alternativechem.pdf>
- ² Počet zrážok pri Brownovom pohybe - Chandrasekhar, S. (1943). "Stochastic problems in physics and astronomy". *Reviews of Modern Physics* **15** (1): 1–89.
- ⁷ – pôvod hydrosféry: <http://www.astrobio.net/topic/solar-system/earth/geology/research-sheds-new-light-on-the-origins-of-earths-water/>

Atmospheric Gas Retention

- Schopnosť atmosféry planéty udržať rôzne druhy plynov
 - Závisí od teploty plynu – koreluje so vzdialenosťou do Slnka
 - Závisí od únikovej rýchlosti z povrchu/atmosféry danej planéty
 - Maxwellovo-Boltzmannovo rozdelenie = distribúcia hustoty pravdepodobnosti rýchlostí molekúl
 - Gas retention simulátor

Maxwell-Boltzmann Molecular Speed Distribution for Noble Gases

