

Kde všude může být ve vesmíru doma?

Vladimír Kopecký Jr.

Fyzikální ústav Matematicko-fyzikální fakulty

Univerzity Karlovy v Praze

http://biomolecules.mff.cuni.cz/Kopecky_Vladimir
kopecky@karlov.mff.cuni.cz

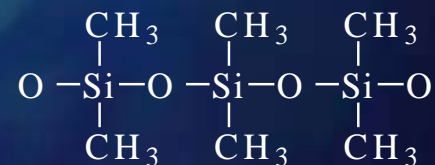
Jedinečnost uhlíku

Proč uhlík a ne něco jiného?

- Prvky tvořící více vazeb a řetězce: B, C, N, Si, P
- Bor
 - méně valenčních elektronů (3) než slupek (4)
 - nestabilní sloučeniny
- Dusík
 - bohatý na elektrony, N–N (171 kJ/mol)
 - redukovaná vazebná energie, řetězce nestabilní
- Uhlík
 - C–C (348 kJ/mol)
 - stabilní jednoduché, dvojná a trojná vazby
 - Heteronukleární vazby (proteiny: C–N–C, cukry: C–O–C, nukleové kyseliny: C–O–P–O–C) jsou méně stabilní než C–C
- Křemík
 - Si–Si – slabé, dvojná a trojná nestabilní
 - Si–O–Si–O (369 kJ/mol) – inertní
- Fosfor
 - mnohem nestabilnější než N

Elementární složení lidského těla

C	61,7
N	11,0
O	9,3
H	5,7
Ca	5,0
P	3,3
K	1,3
S	1,0
Cl	0,7
Na	0,7
Mg	0,3

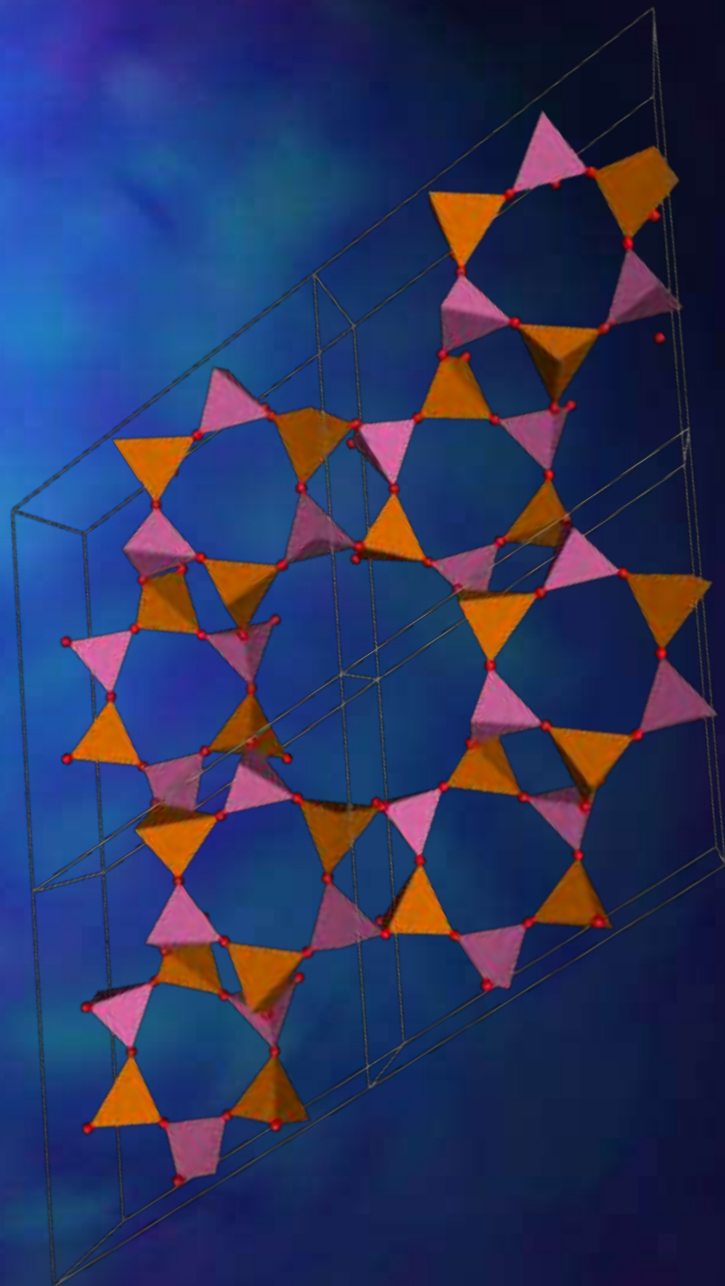


polydimethylsiloxan

Jedinečnost uhlíku

Alternativní svět křemíku?

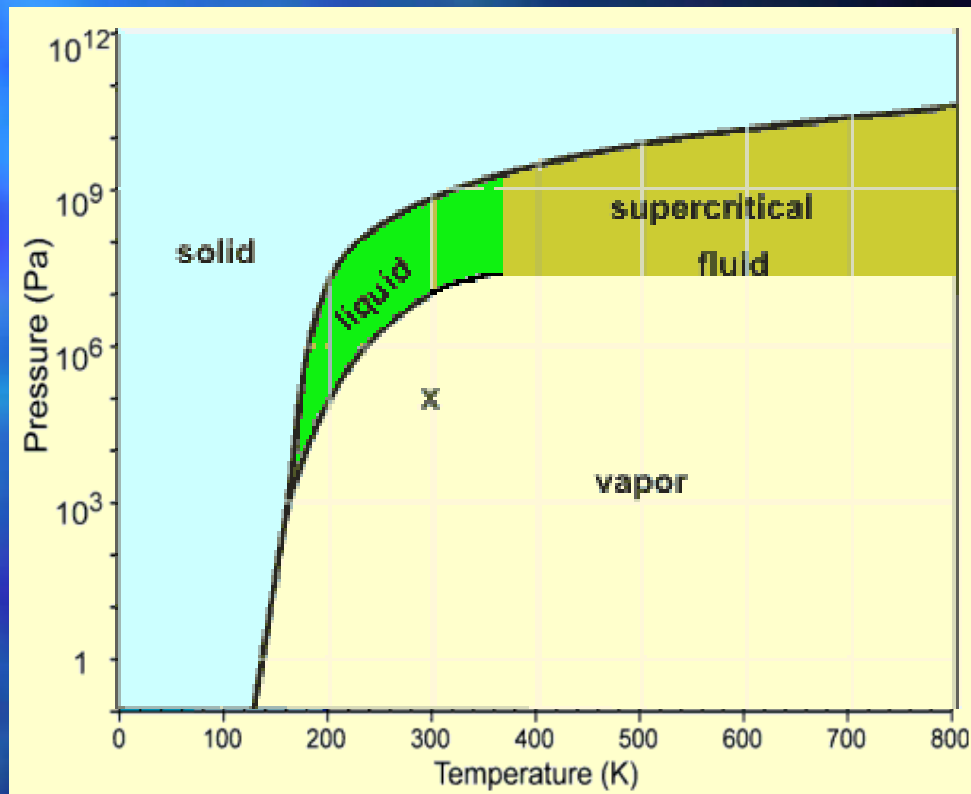
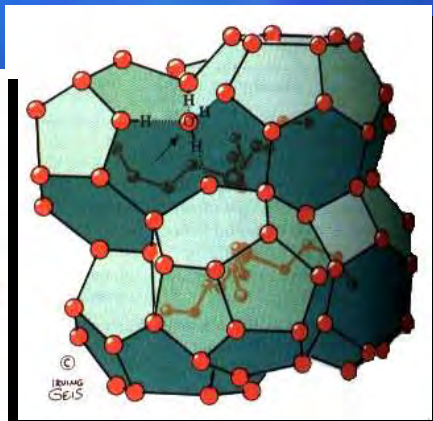
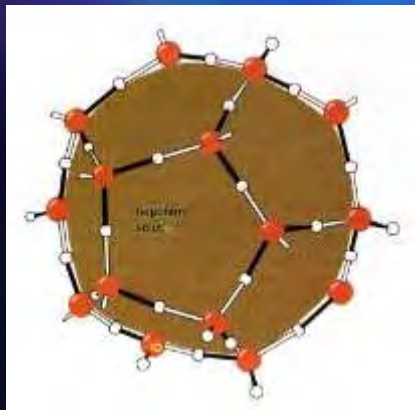
- Nejperspektivnější jsou silikáty ve formě zeolitů nebo organicko-anorganických hybridních zeolitů
- Život na bázi křemíku vyžaduje striktní podmínky:
 - Nepřítomnost kyslíku
 - Nepřítomnost vody
 - Teploty vyšší než 493 K (silikony, silikáty) nebo nižší než 273 K (silany)
 - Řádově vyšší tlak než na Zemi
 - Přítomnost methanu nebo methanolu jako rozpouštědla
 - Relativní nedostupnost uhlíku
- Země má v hlubších vrstvách nejlepší podmínky pro život na bázi zeolitů ve sluneční soustavě, ale...



Život potřebuje rozpouštědlo

Je voda opravdu zázračná?

- Je **silně polární** (1,85 D) a přitom jsou její molekuly malé
- Vytváří **slabé vazby** – vodíkové můstky (20 kJ/mol)
- Plně tuhne při $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Existuje ve více než 100 forem
- **Největší hustoty dosahuje** při $3,98\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Má zhruba 40 dalších anomálií

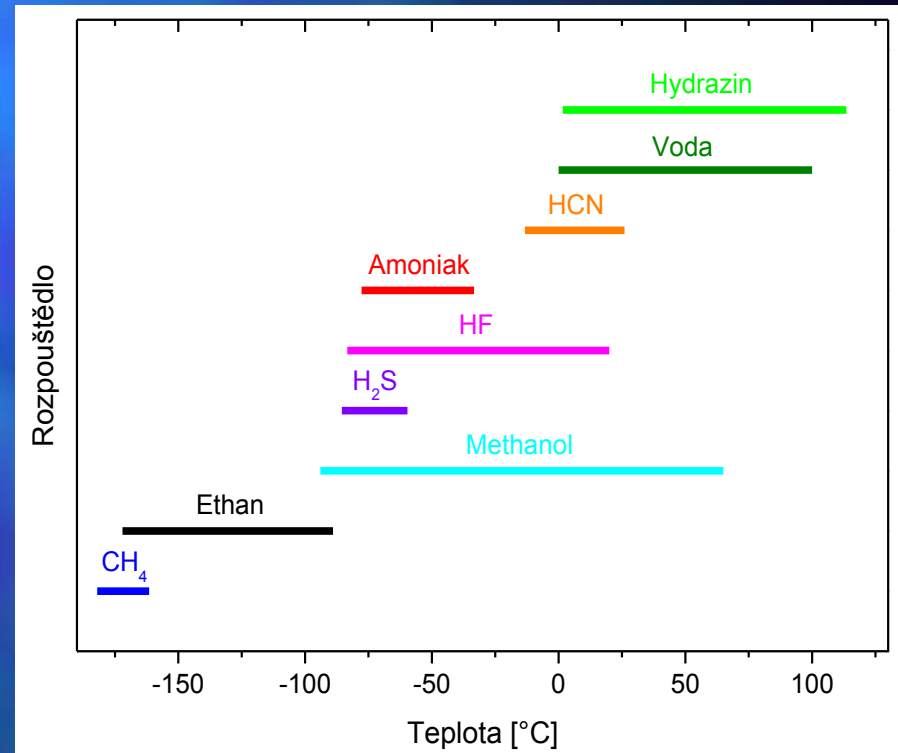


Fázový diagram vody. Křížkem vyznačeny normální podmínky, římská čísla označují různé struktury ledu.

Život potřebuje rozpouštědlo

Hlavně když to teče...

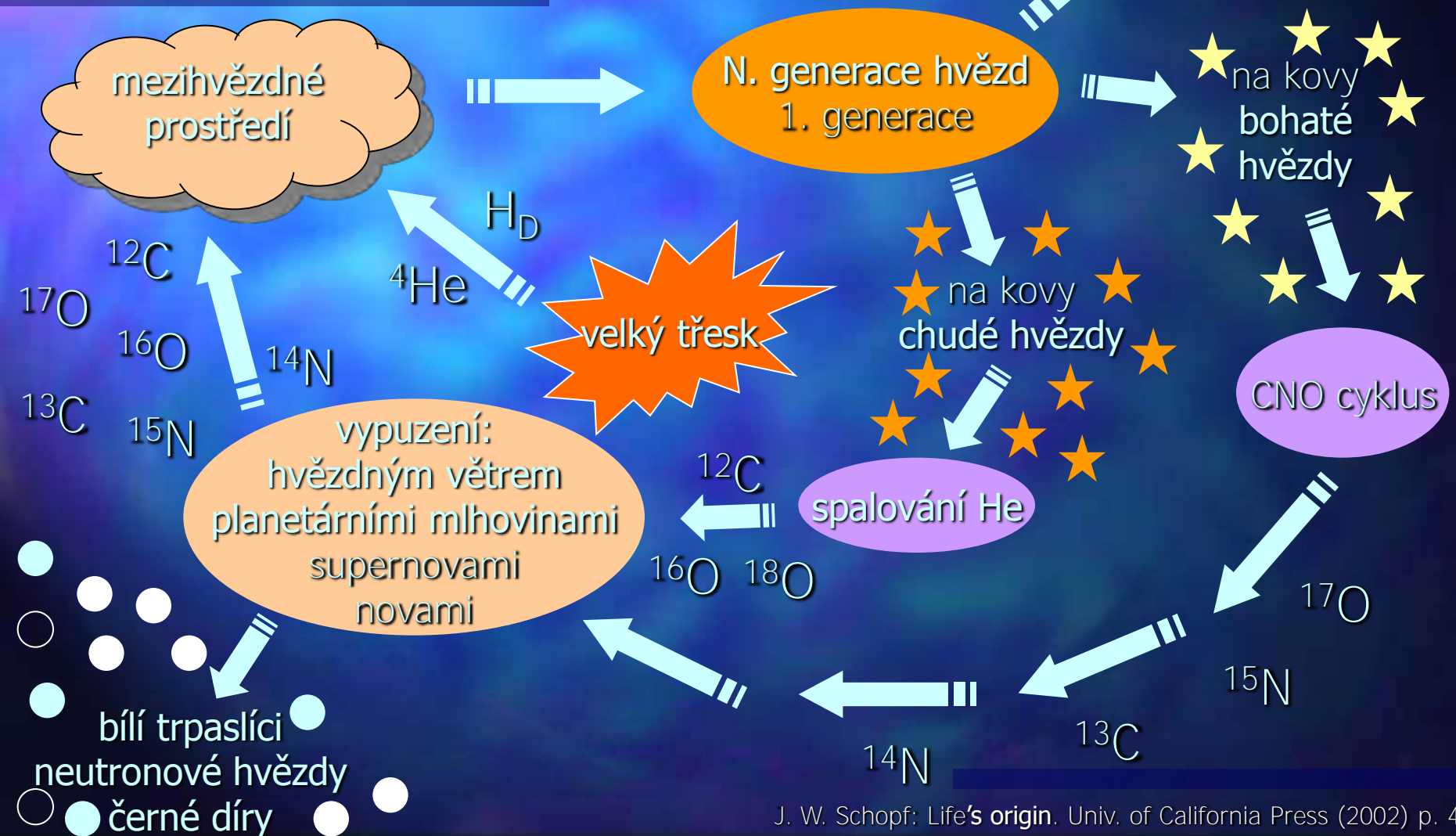
- Amoniak NH_3
 - Nejblíže H_2O , ale horší vlastnosti
 - O_2 nesmí být v atmosféře
 - Spolu s H_2O může sloužit jako kryoprotektant
 - Život by mohl fungovat podobně
- Kyanovodík HCN , N_2H_4
 - Větší resp. \sim dipól jako H_2O
 - Život je nefavorizuje před H_2O
 - Prudká reaktivita (hydrazin)
- HF , H_2S , CH_3OH ,
 - malý výskyt, nevhodné vlastnosti
- Nepochární rozp., CH_4 , C_2H_6
 - Možná exotická varianta (Titan)
 - Život na jiné bázi
 - Příliš velké molekuly



Porovnání teplotních rozsahů za kterých se jednotlivá rozpouštědla vyskytují v kapalném skupenství (při normálním tlaku)

Atomy v kosmu

Cyklus hmoty ve vesmíru



Galaktická zóna obyvatelnosti

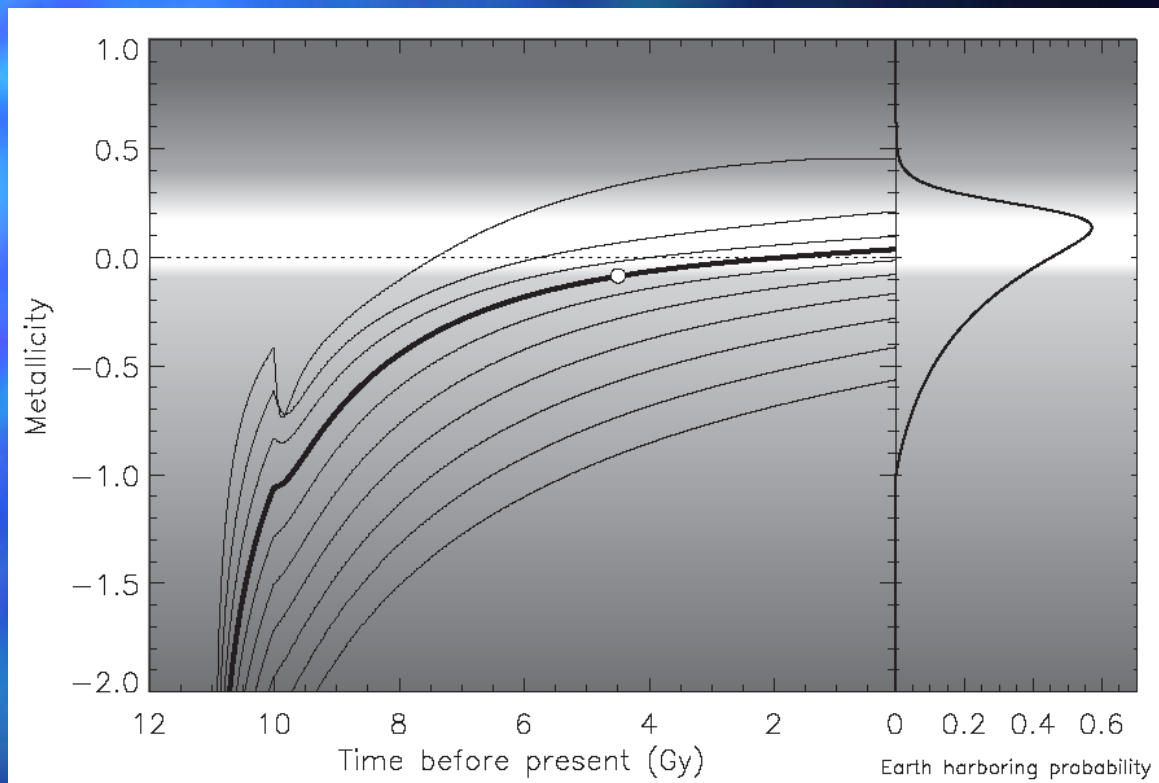
Zóna obyvatelnosti v Mléčné dráze

- V analogii se zónou obyvatelnosti kolem hvězd lze definovat obdobnou zónu v Galaxii
- Faktory ovlivňující obyvatelnou zónu v Galaxii jsou různé od těch, které definují zóny obyvatelnosti kolem hvězd
- Je třeba zdůvodnit slabou verzi antropického principu
- Pozice Slunce, stejně jako jeho oběh, či parametry složení nejsou náhodou

Galaktická zóna obyvatelnosti

Dostatek kovových prvků

- Metalicitou se rozumí výskyt prvků těžších než H a He
- Metalicita hvězdy se udává jako log poměr zastoupení železa ku vodíku (relativně vůči Slunci)
- Silná metalicita vede k tvorbě obřích planet na vnitřních oběžných drahách

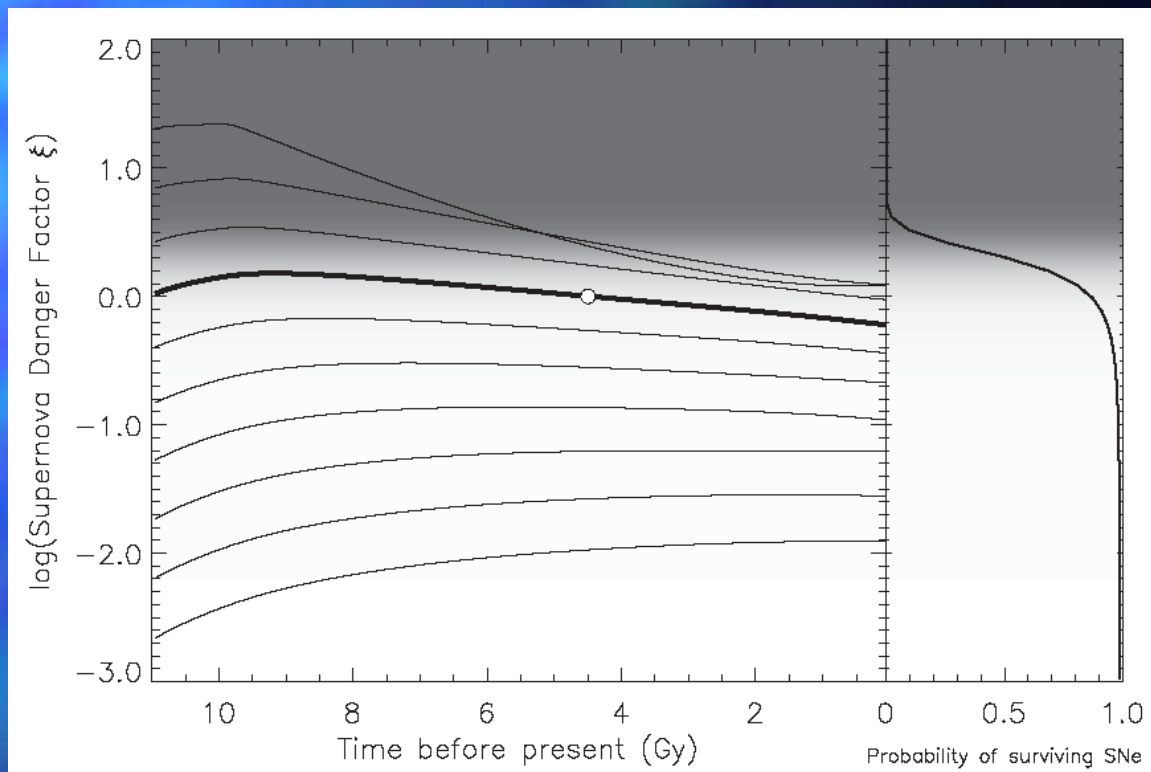


Tvorba kovových prvků v Galaxii jako funkce času. Křivky znázorňují vzdálenosti od jádra Galaxie po 2,5 kpc (počínaje 2,5 kpc – nahoře, a konče 20,5 kpc – dole). Bílý bod znázorňuje vytvoření Slunce. Křivka vpravo je pravděpodobnost vzniku planet zemského typu.

Galaktická zóna obyvatelnosti

Nebezpečí hrozí od supernov

- Výbuchy supernov sterilizují své okolí do vzdálenosti 30 ly
- Definuje se faktor ohrožení výbuchem supernovy $\xi(r, t)$ jako funkci vzdálenosti r , a času potřebného ke vzniku supernovy t , norm. na polohu Země
- Schopnost života přežít explozi není známa

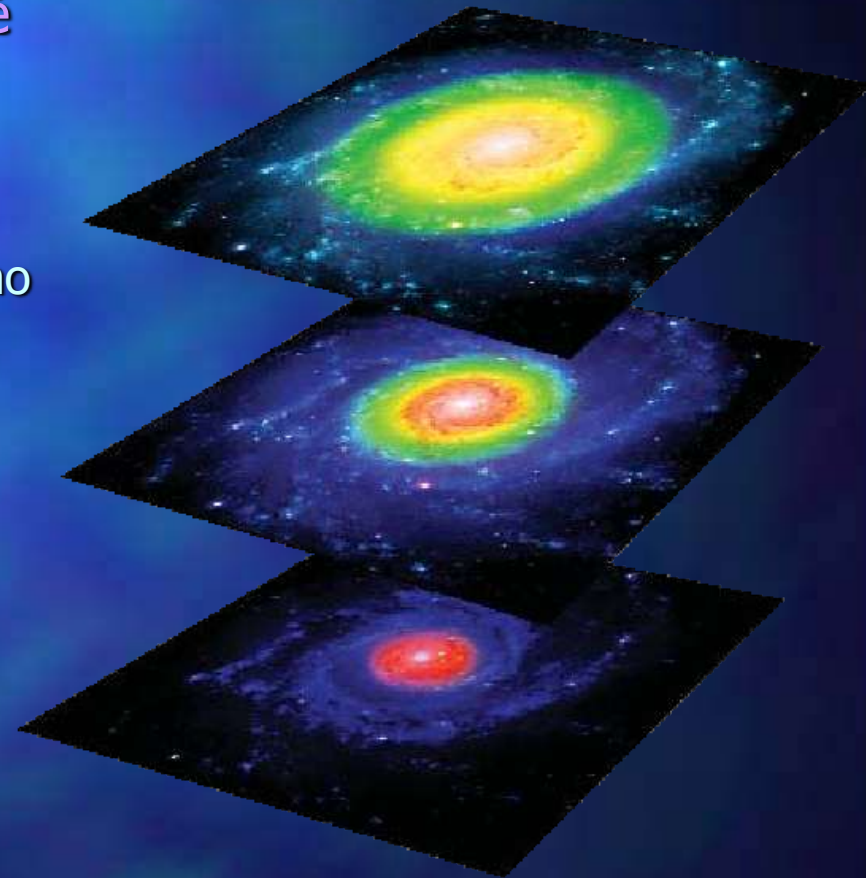


Faktor ohrožení výbuchem supernovy. Křivky znázorňují vzdálenosti od jádra Galaxie po 2,5 kpc (počínaje 2,5 kpc – nahoře, a konče 20,5 kpc – dole). Bílý bod znázorňuje vytvoření Slunce. Křivka vpravo je pravděpodobnost přežití výbuchu supernovy.

Galaktická zóna obyvatelnosti

Evoluce zóny obyvatelnosti

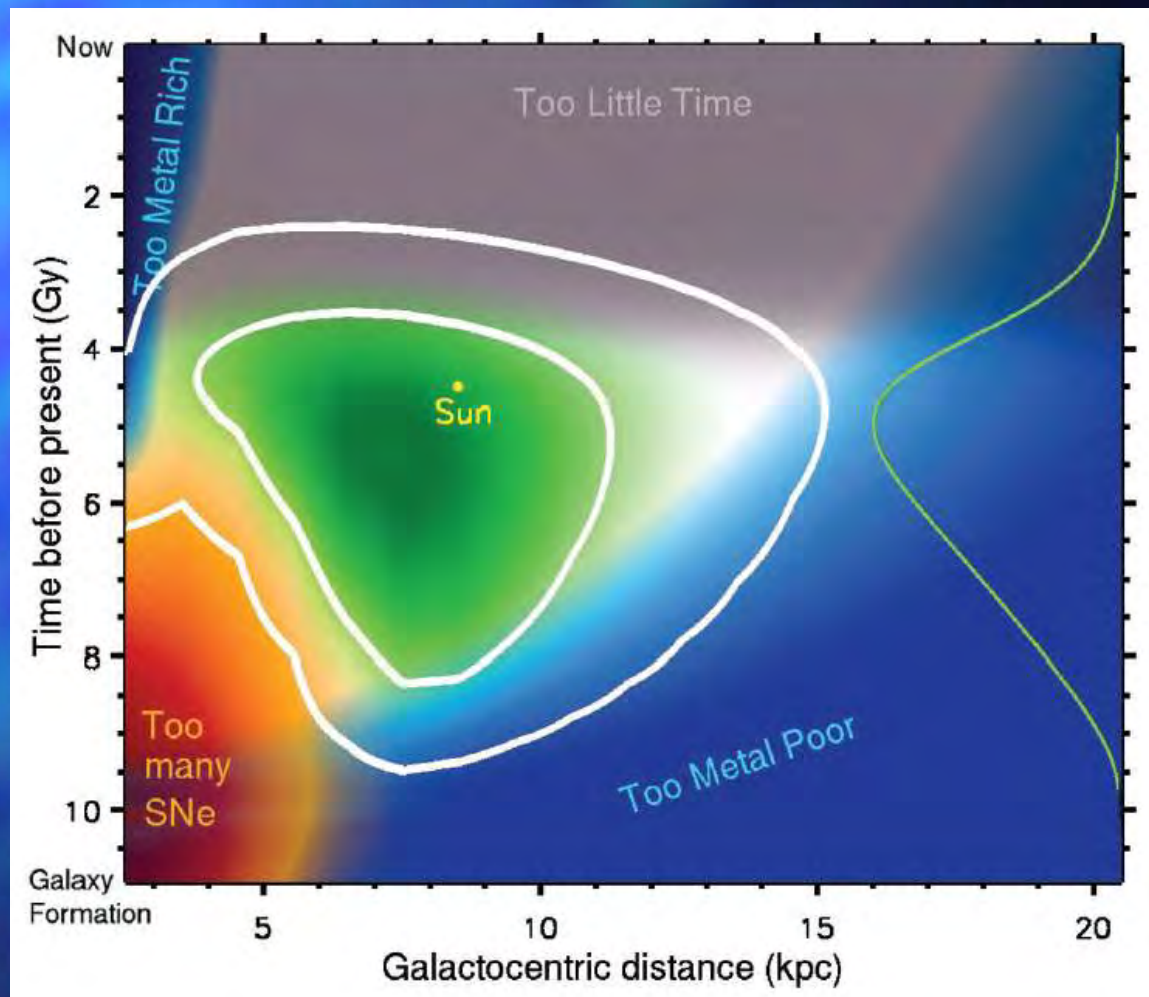
- Pravděpodobnost existence galaktické obyvatelné zóny (GHZ) je dána:
 - Pravděpodobností vzniku metalických planet – P_{metal}
 - Dobou potřebnou k vývoji komplexního života – $P_{\text{evol}}(t)$ [integrál normálního rozdělení 4 ± 1 Gy]
 - Pravděpodobností přežití výbuchu supernovy – P_{SN} [renorm. na Zemi]
 - Tvorbou nových hvězd – SFR
- $P_{\text{GHZ}} = \text{SFR} \times P_{\text{metal}} \times P_{\text{evol}}(t) \times P_{\text{SN}}$
- Je-li SFR velké P_{SN} klesá – narůstá počet supernov a klesá šance přežít jejich výbuch



Galaktická zóna obyvatelnosti

Zóna obyvatelnosti pro komplexní život

Obyvatelná zóna Mléčné dráhy sestavená na základě stupně tvorby nových hvězd, metalicity (modře), času potřebnému k evoluci života (šedě) a život ohrožujících explozí supernov (červeně). Bílé kontury zahrnují 68 % (vnitřní) a 95 % vznikajících hvězd s nejvyšší šancí na vývoj komplexního života v současné době. Zelená křivka vpravo je distribuce komplexního života jako integrál $P_{GHZ}(r, t)$ přes r .



Galaktická zóna obyvatelnosti

Závěry plynoucí z modelu zóny

- Obyvatelná zóna vznikla před 8 Gy
- Není překvapivé, že v ní nalezneme Slunce (s ohledem na způsob výpočtu)
- Hladinou pravděpodobnosti 68 % prošlo pouhých 10 % hvězd, které kdy v Mléčné dráze vznikly
- 75 % hvězd, které mohou hostit komplexní život je průměrně o 1 Gy starších než Slunce
- Neuvažujeme-li dobu potřebnou pro evoluční proces je starších pouze 30 % a ostatní jsou v průměru o 1 Gy mladší než Slunce
- Model nezahrnuje některé důležité faktory (dráhy hvězd, aktivitu jádra Galaxie, molekulární mračka atd.) 10 % hvězd je tak horním odhadem!

Astrochemie

Od atomů k molekulám

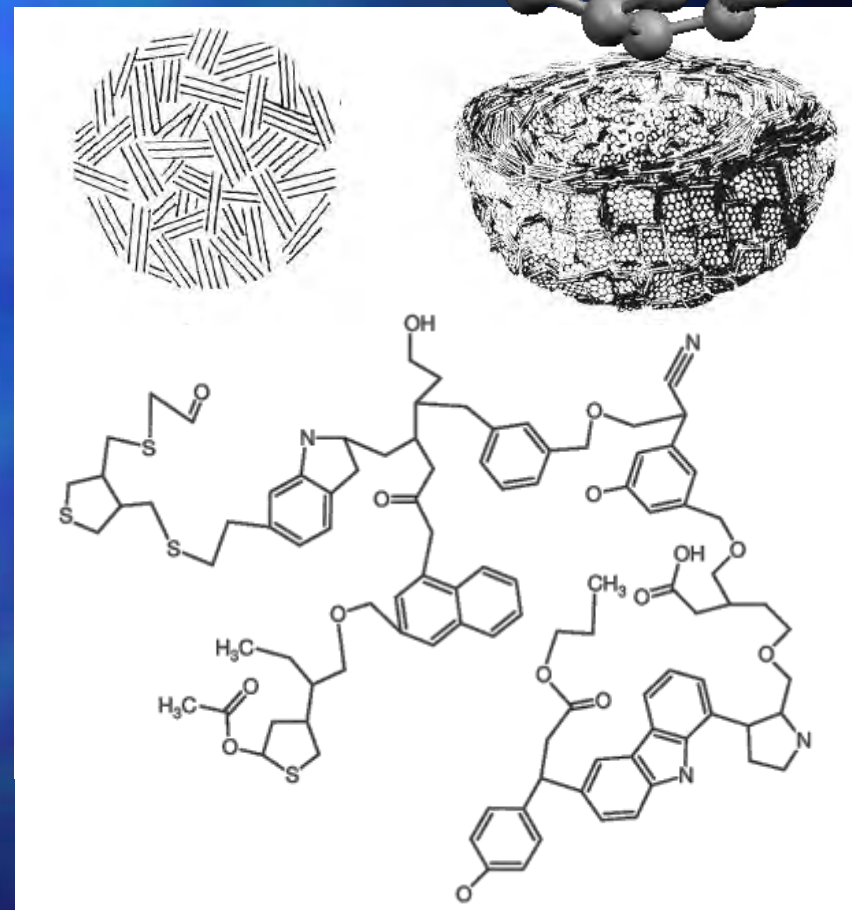
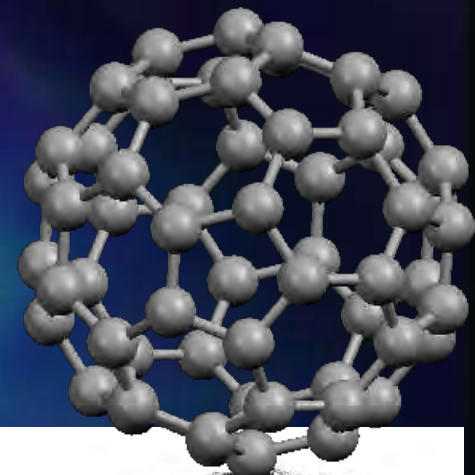
- Průměrná hustota mezihvězdného prostoru v Galaxii je 1 H na cm^3 (ve srovnání se vzduchem $2,7 \times 10^{19}$ molekul v cm^3)
- Ve velkých molekulárních mračcích s dobou života 10^6 – 10^8 let při teplotě 10 K se v průměru 50 ly nachází hmota o hustotě 10^6 cm^{-3}
- Při tvorbě hvězd stoupá hustota až na 10^{12} cm^{-3}
- Je známo ca. 4113 astrochemických reakcí v plynné fázi mezi 396 složkami (zhruba polovina mezihvězdného plynu je tvořena molekulami)



Velké molekuly v kosmu

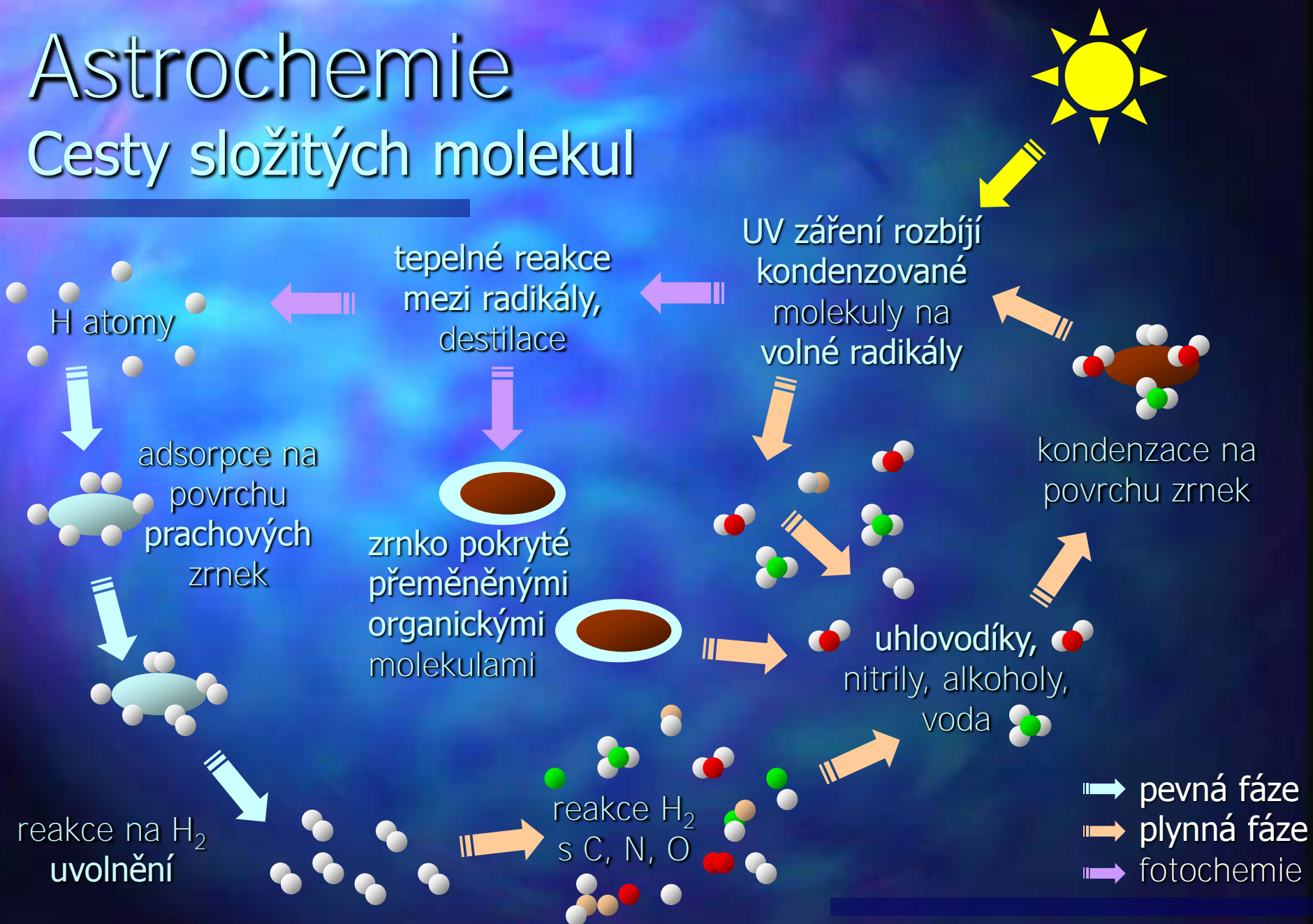
Uhlík ve vesmíru

- Uhlík se ve vesmíru vyskytuje ve všech svých základních podobách
 - Grafit (drobné saze, různé struktury, z atmosfér hvězd)
 - Diamant (v množství ca. 10^{-10} tvoří prachové obálky hvězd, nachází se též v meteoritech)
 - Fullereny a nanotrubičky (chladné atmosféry hvězd, $\sim 0,9\%$)
 - Uhlovodíkové řetězce
 - Polycyklycké aromatické uhlovodíky (PAH) $\sim 20\%$



Astrochemie

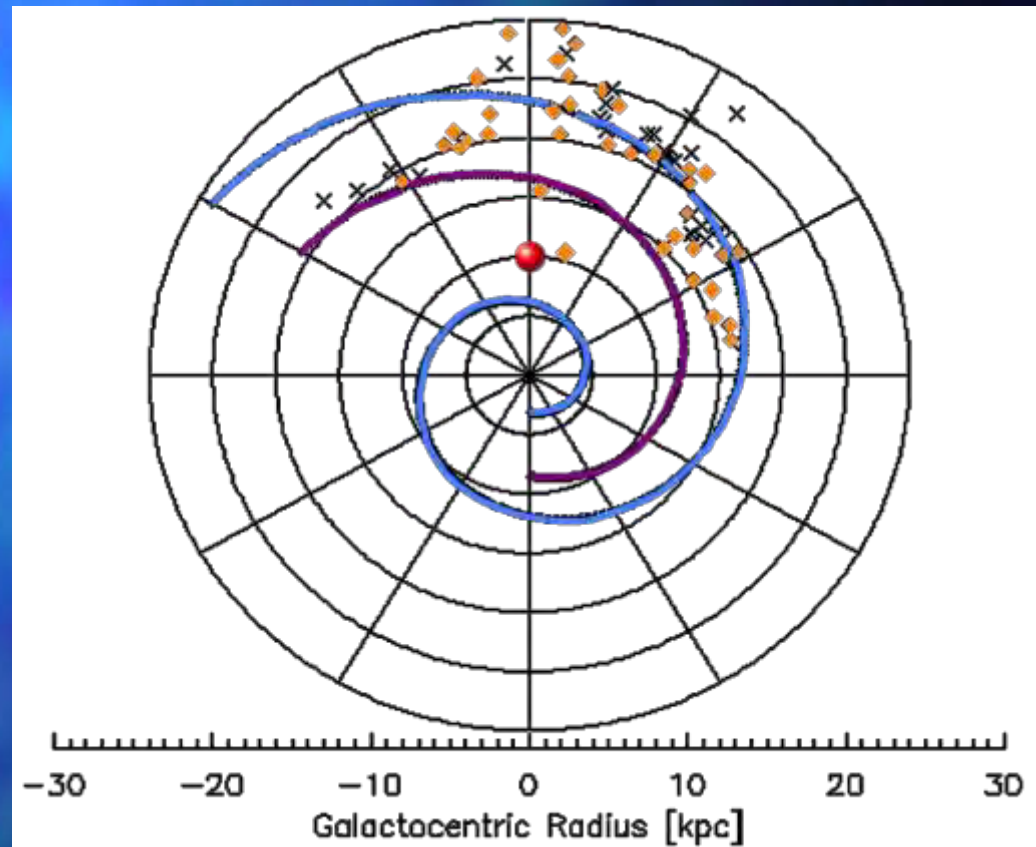
Cesty složitých molekul



Galaktická zóna obyvatelnosti

Formaldehyd v molekulárních mračcích

- Formaldehyd (H_2CO) je prekurzorem při vzniku řady biomolekul (aminokyselin)
- Lze jej detekovat na 140,8 GHz v molekulárních mračcích ve vnější části Galaxie
- Z 69 mračen byl nalezen v 65 %
- Dává omezení vnější oblasti zóny
- Detekce formaldehydu v Galaxii: **pozitivní** – diamanty, **negativní** – křížky. Rameno Persea (**modře**), rameno Labutě (**fialově**), **červeně** – Slunce.



Obyvatelnost jiných galaxií

Srážky galaxií

Galaxy Collision



Visualization by
Frank Summers

Simulation by
Chris Mihos &
Lars Hernquist

Spiral Galaxy M64



Hubble
Heritage



Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039

HST • WFPC2

PRC97-34a • ST ScI OPO • October 21, 1997 • B, Whitmore (ST ScI) and NASA

NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC04-04

Obyvatelná zóna v okolí hvězd

Definice obyvatelné planety

- Planeta má oceán a pevninu
 - Oceán reguluje teplotní výkyvy
 - Desková tektonika recykluje chemické prvky
- Mírně zvýšený obsah kyslíku
 - Kyslík vytváří ozonovou vrstvu chránící před UV zářením
 - Zvýšený obsah O_2 (a nízký obsah CO_2) je nezbytný pro vznik vyšších forem života
- Dlouhá období klimatické stability
 - Zahrnují stabilitu mateřské hvězdy, minimum ničivých impaktů, stabilizaci rotační osy planety satelitem, zdroj energie pohánějící deskovou tektoniku, nízká excentricita dráhy planety

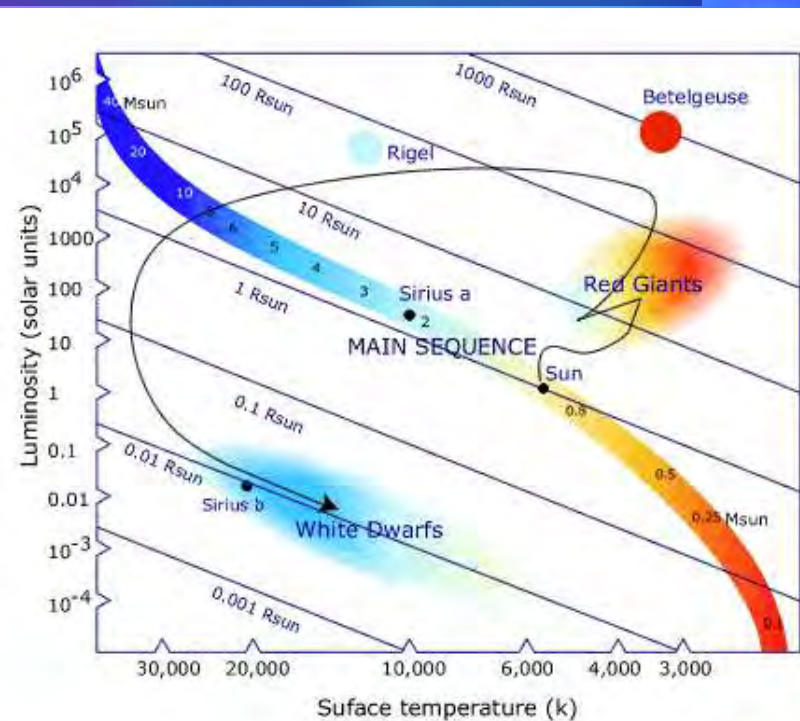
Obyvatelná zóna v okolí hvězd

Stabilizace klimatu obyvatelné planety

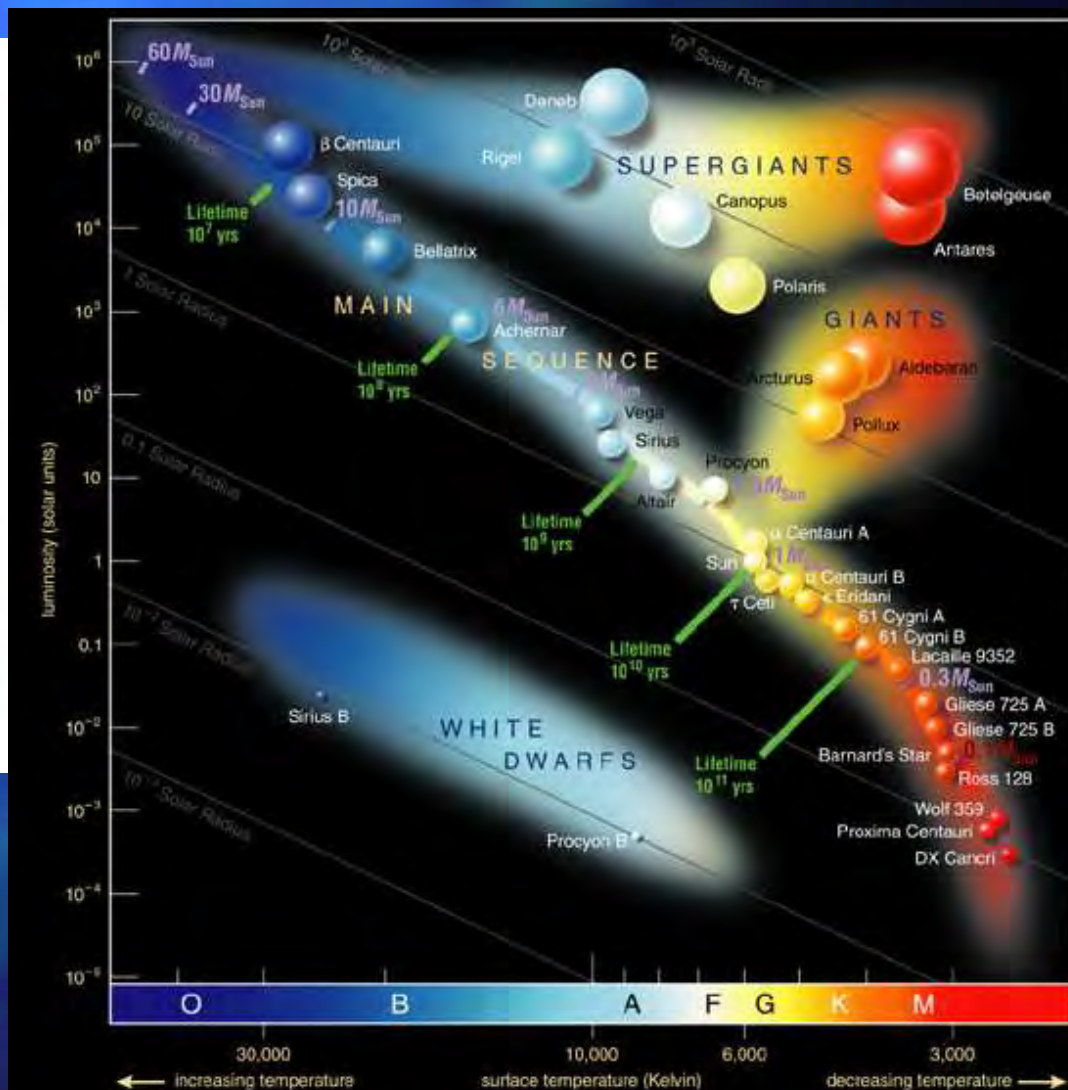
- **Vnitřní okraj** zóny je dán **ztrátou vody**
 - 1,1× slunečního toku vede k zvlhčení stratosféry (složitě formy života nemohou existovat)
 - 1,4× slunečního toku vede k překročení kritické teploty vody 647 K a k úplnému vypaření oceánů
- **Vnější okraj** obyvatelné zóny je dán **kondenzací CO₂**
 - Kondenzace vede ke vzniku oblačnosti a tím ke zvýšení albeda, a tím poklesne teplota povrchu
 - Snížení obsahu CO₂ vede ke snížení skleníkového efektu a k zamrznutí planety

Obyvatelná zóna v okolí hvězd

Vývoj mateřské hvězdy



Hertzsprung-Russellův diagram – vztah mezi jasností a spektrálním typem hvězdy, který odráží její vývoj. Poprvé použit roku 1913.



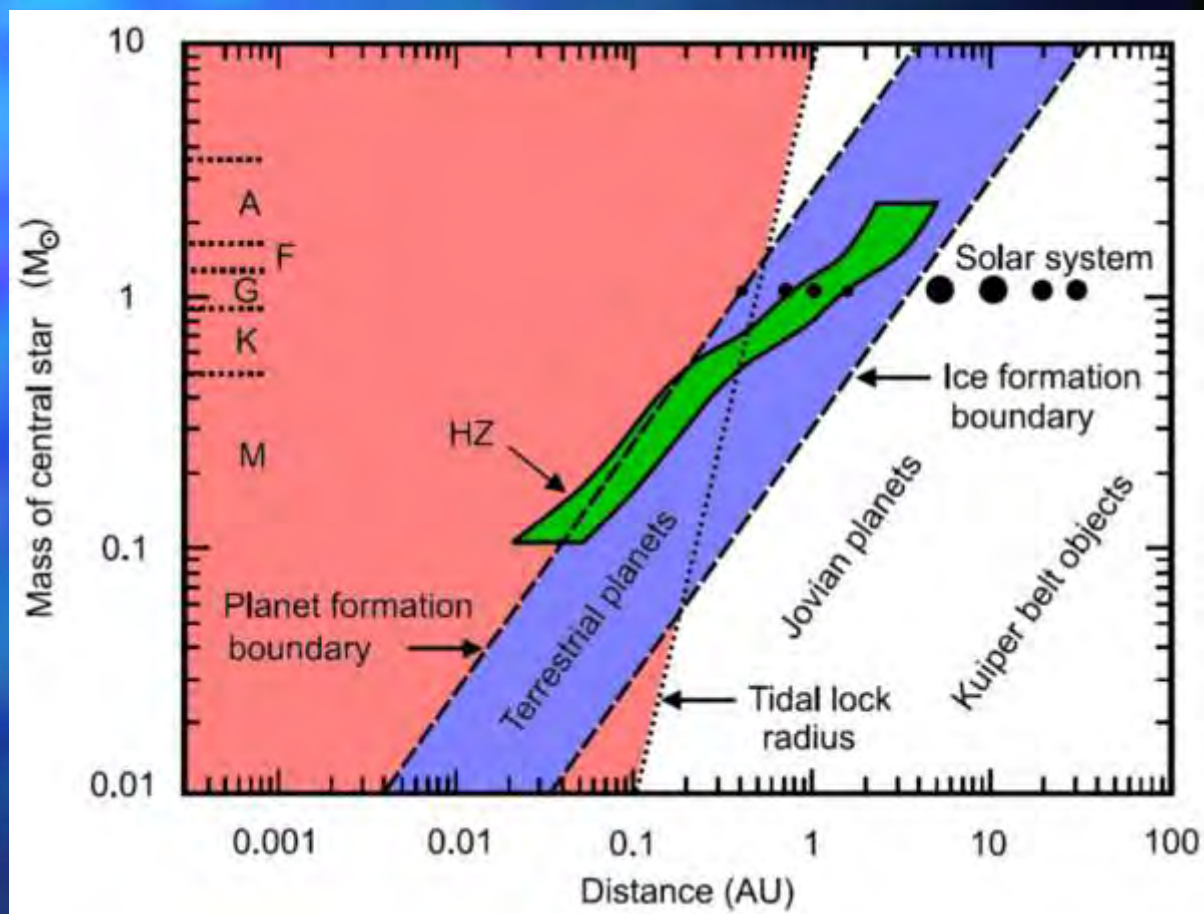
Obyvatelná zóna v okolí hvězd

Typ mateřské hvězdy vs. obyvatelná zóna

Diagram zóny obyvatelnosti v závislosti na hmotnosti mateřské hvězdy.

Zóna obyvatelnosti (HZ) je znázorněna plnou čarou a **zeleně**. Oblast ohraničená čárkovanými liniemi vyznačuje zónu pravděpodobné existence planety zemského typu (**modře**). Tečkovaná čára označuje zónu (**červeně**) vázané rotace planety (ustálené během 4,5 Gy).

U hvězd typu M budou mít všechny planety pozemského typu vázanou rotaci, sic!



Obyvatelná zóna v okolí hvězd

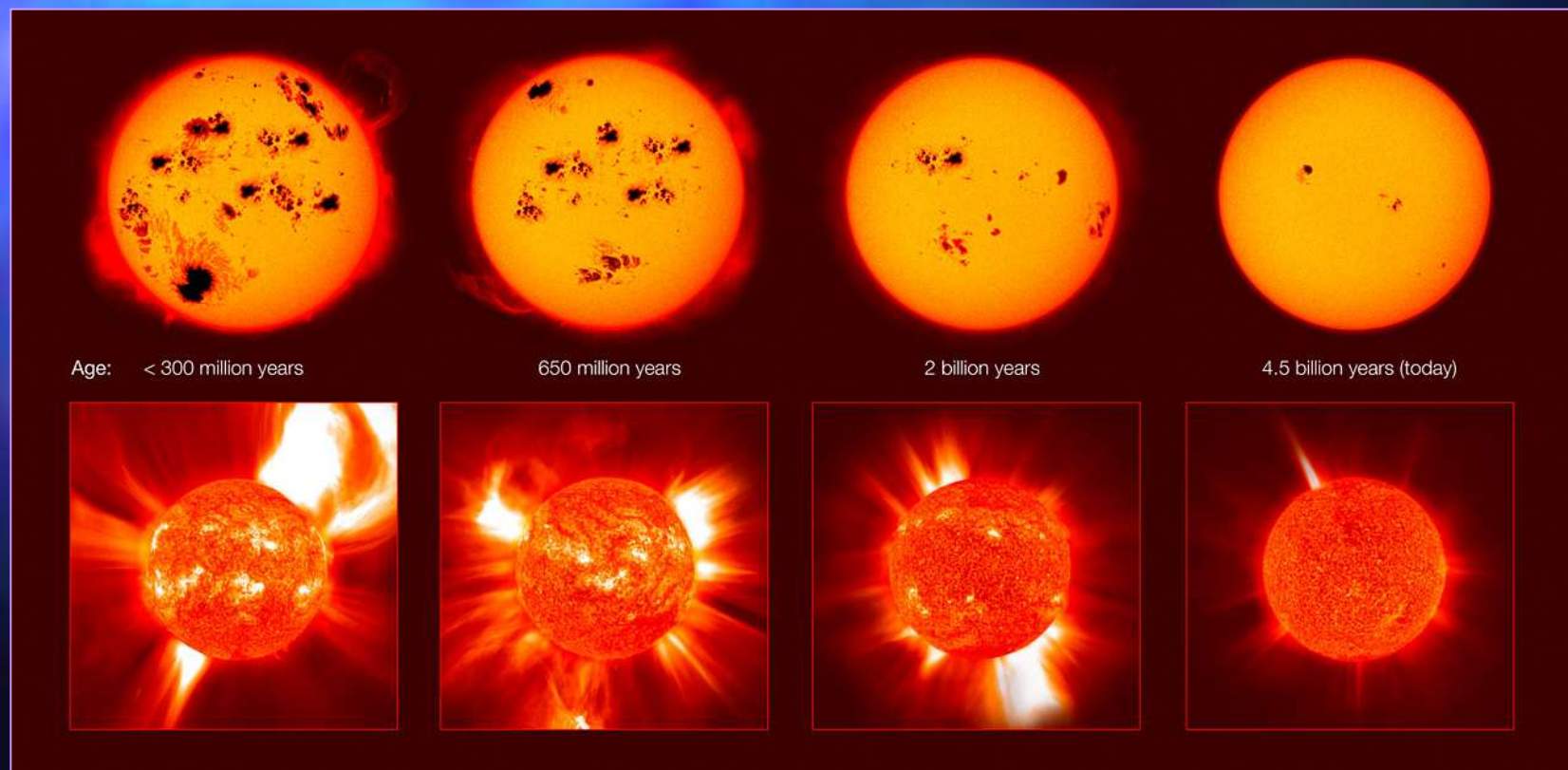
Definice a závěry zóny obyvatelnosti

- Vnitřní okraj zóny je dán ztrátou vody vedoucí k vypaření oceánů
- Vnější okraj zóny je dán kondenzací CO_2 jež vede k zalednění planety
- Pro Slunce vychází zóna min. 0,95–1,37, max. 0,75–1,90 AU
- Rozsahy a vzdálenosti zón obyvatelnosti pro hvězdy typu F až M jsou řádově stejné
- Existuje 3× více K hvězd než G a jejich vývoj je pozvolnější než u Slunce (G2) – jsou potenciálně nejvhodnějšími mateřskými hvězdami pro život
- Hvězdy typu F setrvávají na hlavní posloupnosti pouze 2 Gy a také vyzařují více v UV – parametry vylučují komplexní život

Obyvatelná zóna v okolí hvězd

Slabiny definice – mladá léta Slunce

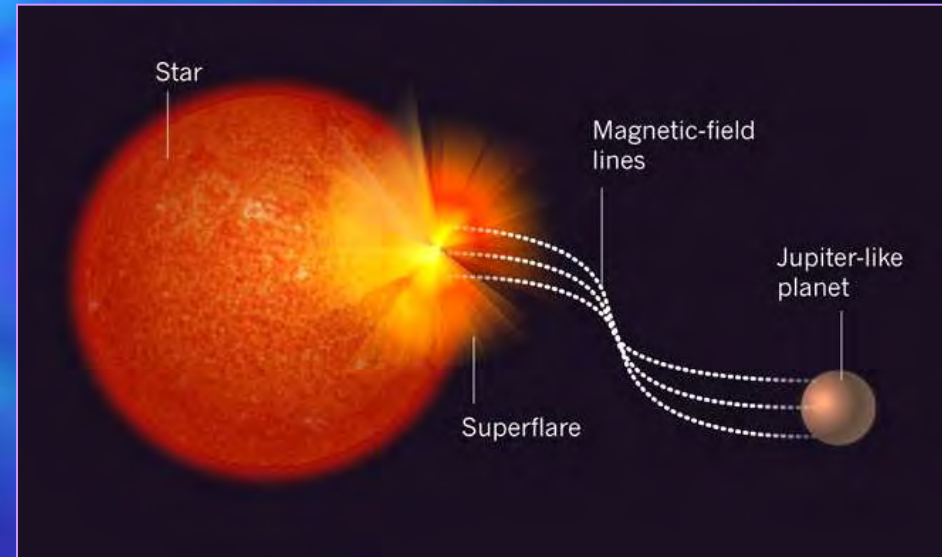
- Z počátku Slunce rotovalo 10× rychleji → silnější dynamo
- Vysokoenergetický tok byl 2,5× vyšší před 2,5 Gyr a 6× před 3,5 Gyr



Obyvatelná zóna v okolí hvězd

Slabiny definice – supererupce...

- Supererupce se vyskytují na pomalu rotujících hvězdách středního věku F8–G8
- Trvají od minut po dny při zjasnění hvězdy o 0,1–30 %
- Energie 10^{33} – 10^{39} erg (největší pozorovaná u Slunce 1859 Carrington 10^{32} erg)
- U Slunce nebyla žádná supererupce pozorována v posledních 2000 letech a s energií 10^{36} erg v poslední Gy
- Supererupce s energií 10^{32} se u Slunce vyskytne ~450 let
- ~0,2 % hvězd typu G má supererupce



Vznik supererupce působením horkého Jupitera se ukázal být velkou výjimkou díky datům z družice Kepler

Obyvatelná zóna v okolí hvězd

Slabiny definice – Sluneční střední věk

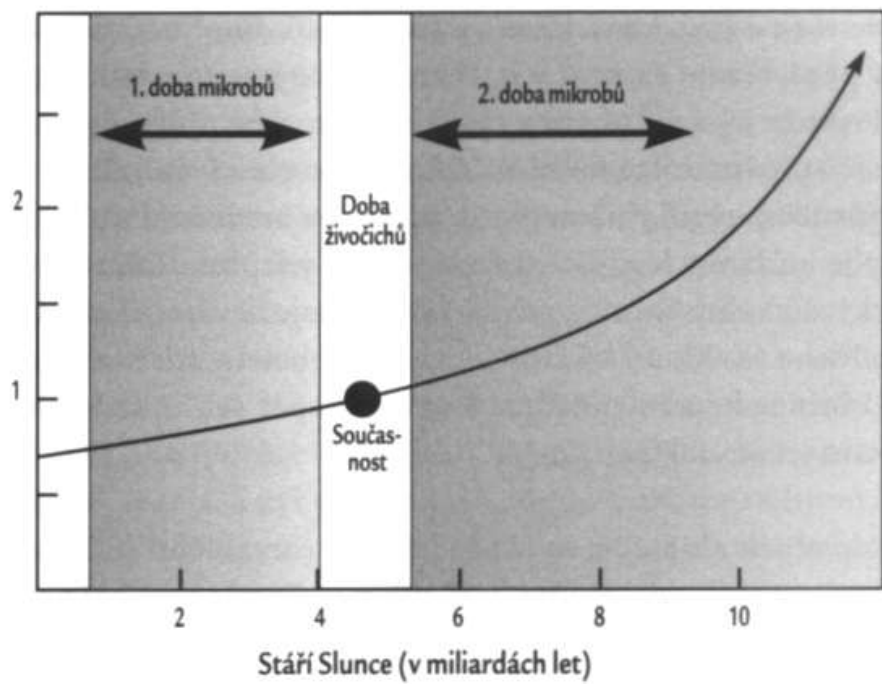
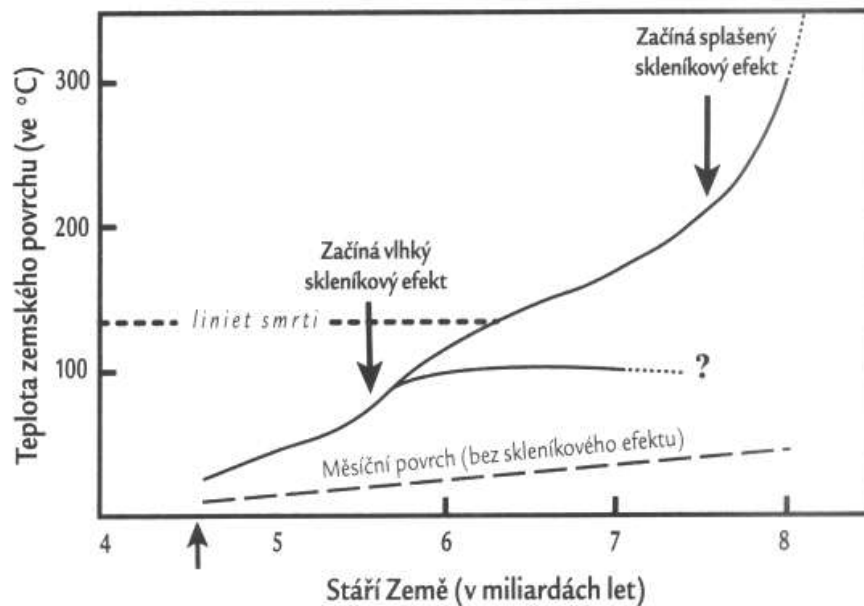
- Oceánská voda neustále uniká do vesmíru
- Z vesmíru lze pozorovat fluorescenci H v Lymanově čáře alfa (UV záření)
- Závoj unikajícího vodíku se táhne do vzdáleností tisíců km
- Oceány se vypařují tempem ~ 1 mm za 1My
- Vypařování (přechodu do stratosféry) zabraňuje rychlý pokles teploty v atmosféře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



Vývoj Země

Nárůst teploty

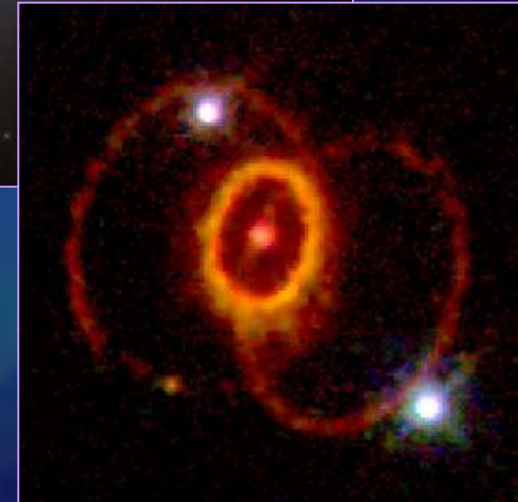
- Nárůst povrchové teploty bez skleníkového efektu by měl být lineární odezvou na zvyšování jasnosti Slunce
- Vypařování oceánů způsobí na Zemi lavinovitý skleníkový efekt a zánik života
- Pokud Země ztratí oceány do 1,5 Gy, pak bude nárůst teploty pozvolnější a skleníkový efekt se nerozeběhne
- Období, kdy může existovat komplexní život je velmi krátké
- Planeta Země vždy byla planetou mikrobů



Je v Galaxii bezpečno?

Nebezpečné výbuchy supernov

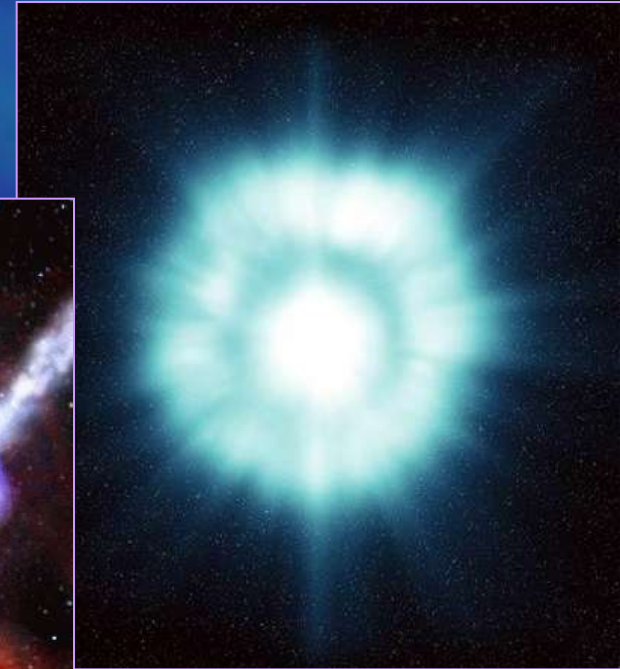
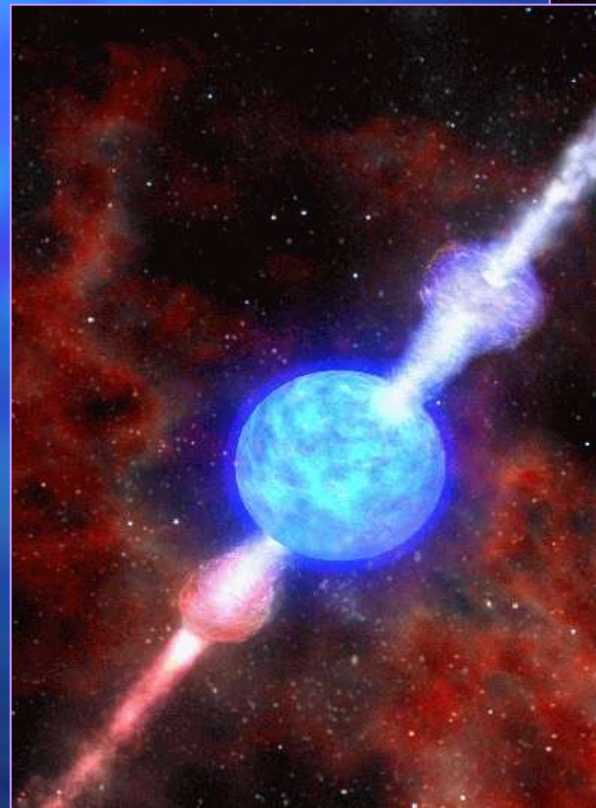
- V Galaxii vybuchne supernova zhruba jednou za 100 let
- K výbuchu supernovy do vzdálenosti 10 pc od Země dochází v průměru za 240–500 milionů let
- Ionizující záření může trvat 10^1 – 10^5 let
- Výbuch zničí ozonovou vrstvu na ca. 300 let, vytvoří nadbytek NO na 2–6 let
- Vyšší organismy zahynou okamžitě působením UV záření okolo 250 nm
- Dojde k silnému narušení ekosystémů



Je v Galaxii bezpečno?

Ještě nebezpečnější gama záblesky...

- Během ca. 10 s je vyzářeno 5×10^{44} W; v UVB (218–315 nm) oblasti ~ 20 W/m, tj. $7\times$ sluneční tok v UVB
- Gama záblesk (GRB) do vzdálenosti 2 kpc by měl podobné účinky jako výbuch supernovy
- Pravděpodobnost jevu je 1 za 1 Gy



Obyvatelnost jiných galaxií

Seyfertovy galaxie

- Pojmenovány po Carlu Seyfertovy (1911–1960), který je definoval roku 1943
- Spirální galaxie s malým, jasným jádrem, vykazujícím široké spektrální čáry
- Poukazují na přítomnost žhavého, rychle obíhajícího plynu v malém prostoru, nejspíše kolem černé díry
- Podobají se kvasarům, jsou 100× jasnější než obyčejné spirální galaxie
- Při vzplanutí emitují X-ray, a kosmické záření

Galaxy NGC 7742



Obyvatelnost jiných galaxií

Je každá spirální galaxie někdy Seyfertova?

- Galaxie mohou procházet aktivními obdobími s periodou 10^6 – 10^9 let
- Při zjasnění stoupne X-ray $10^8\times$, kosmické záření zaplní celou galaxii (10^{13} ly) na dobu 10^6 let
- Vzplanutí je účinky totožné s výbuchem supernovy do vzdálenosti 30 ly
- Ozonová vrstva planet zemského typu je zničena, radioaktivní pozadí stoupne min. $100\times$

Spiral Galaxy NGC 3949



NASA, ESA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC04-25

Hubble
Heritage

Obyvatelnost jiných galaxií

Jak přežít v Seyfertově galaxii?

- Perioda aktivity spirální galaxie (10^8 let) je souměřitelná s dobou průchodu Slunce spirálními rameny Galaxie (100 My, průchod 10 My)
- Ve spirálních ramenech mohou být hvězdy po dobu 10^6 let chráněny před kosmickým zářením silnějším magnetickým polem (10–100×)
- Pravděpodobnost periodických „záchranných“ průchodů hvězdy spirálními rameny Galaxie je $<10^{-9}$
- Nepravidelné galaxie (bez jádra), dostatečně vzdálené od spirálních galaxií mohou být mnohem příjemnějším místem pro život

Dwarf Irregular Galaxy NGC 1705

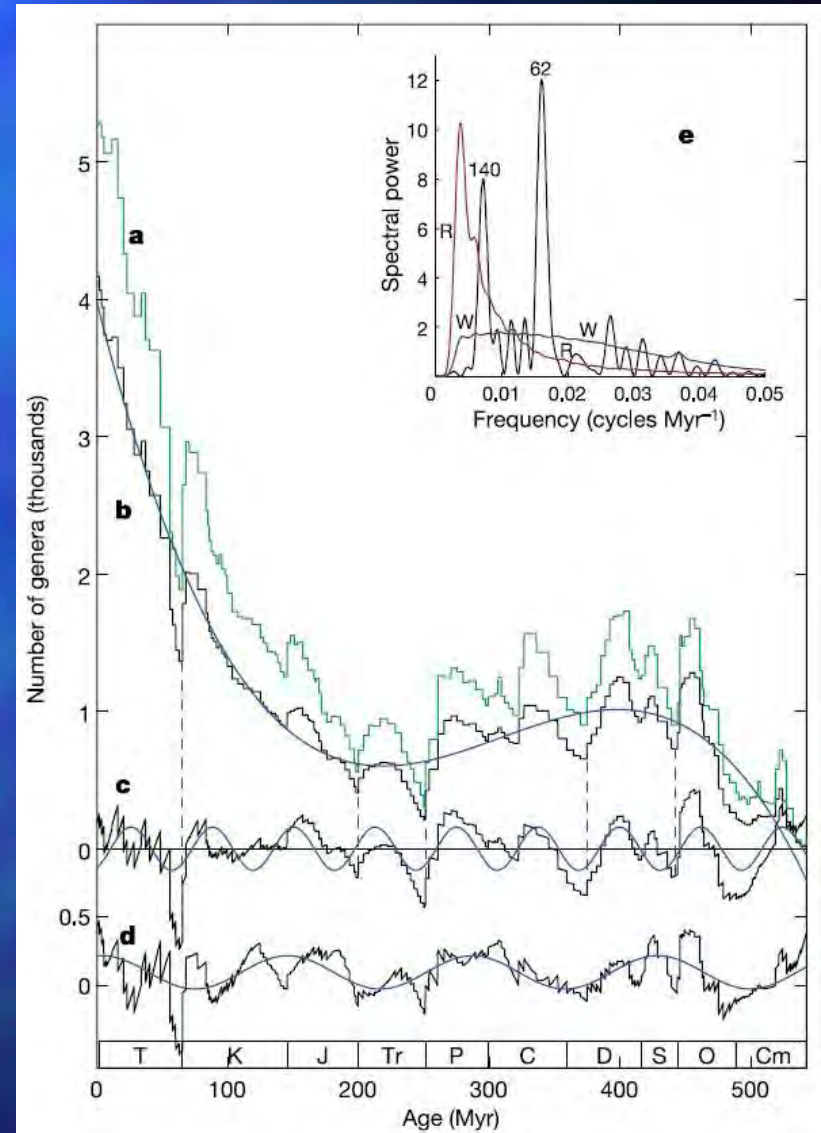


Hubble
Heritage

Masová vymírání

Nové otázky...

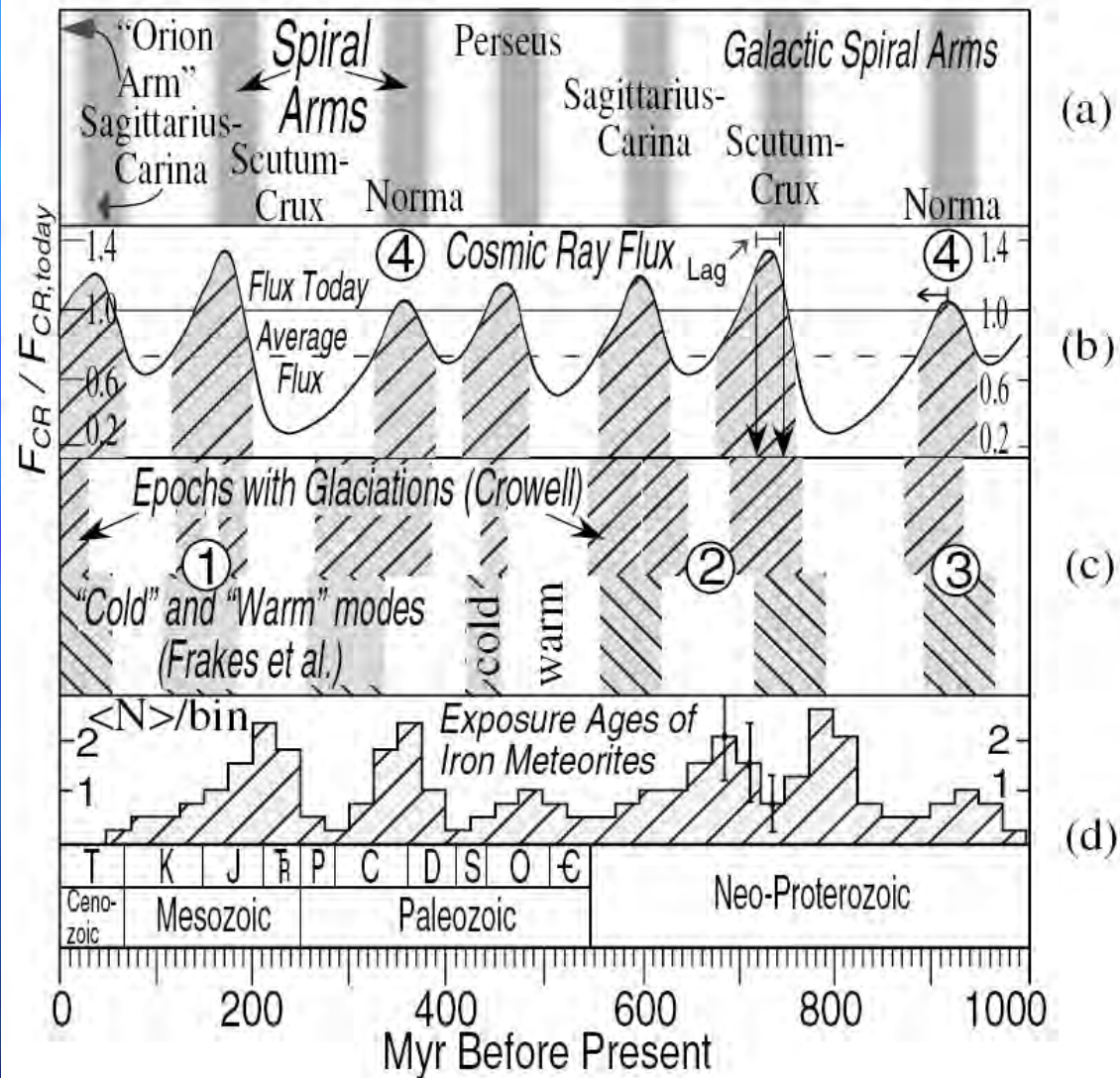
- Analýzou Sepkovského kompedia 36 680 rodů mořských živočichů s pevnou skořápkou (0–542 My) byla nalezena **perioda vymírání** 62 ± 3 My a 140 ± 15 My
- Cyklus 62 My a 140 My je **signifikantní na hladině** v pozici $3,6 \times 10^{-4}$ a **magnitudě** 1×10^{-2} , respektive $5,6 \times 10^{-3}$ a 0,13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



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 yastoupeni $^{40}\text{K}/^{41}\text{K}$ v Fe meteoritech, které odráží minima CRF



Všude dobře... ... doma nejlépe!



JÁ VÍM, ŽE NIC TAKOVÉHO NEEXISTUJE. CELEJ TEN VĚSMÍR JSTE SI
VYMYŠLELI, ABYSTE MĚLI NĚCO NA HRANÍ.