

MUNI  
SCI

# Klimatické změny a jejich odraz ve vývoji života na Zemi

Část 3.

Vnik moderní atmosféry a Země v ledovém sevření

Tomáš Kumpan

[kumpan@sci.muni.cz](mailto:kumpan@sci.muni.cz)

*Ústav geologických věd PŘF MUNI*

2024

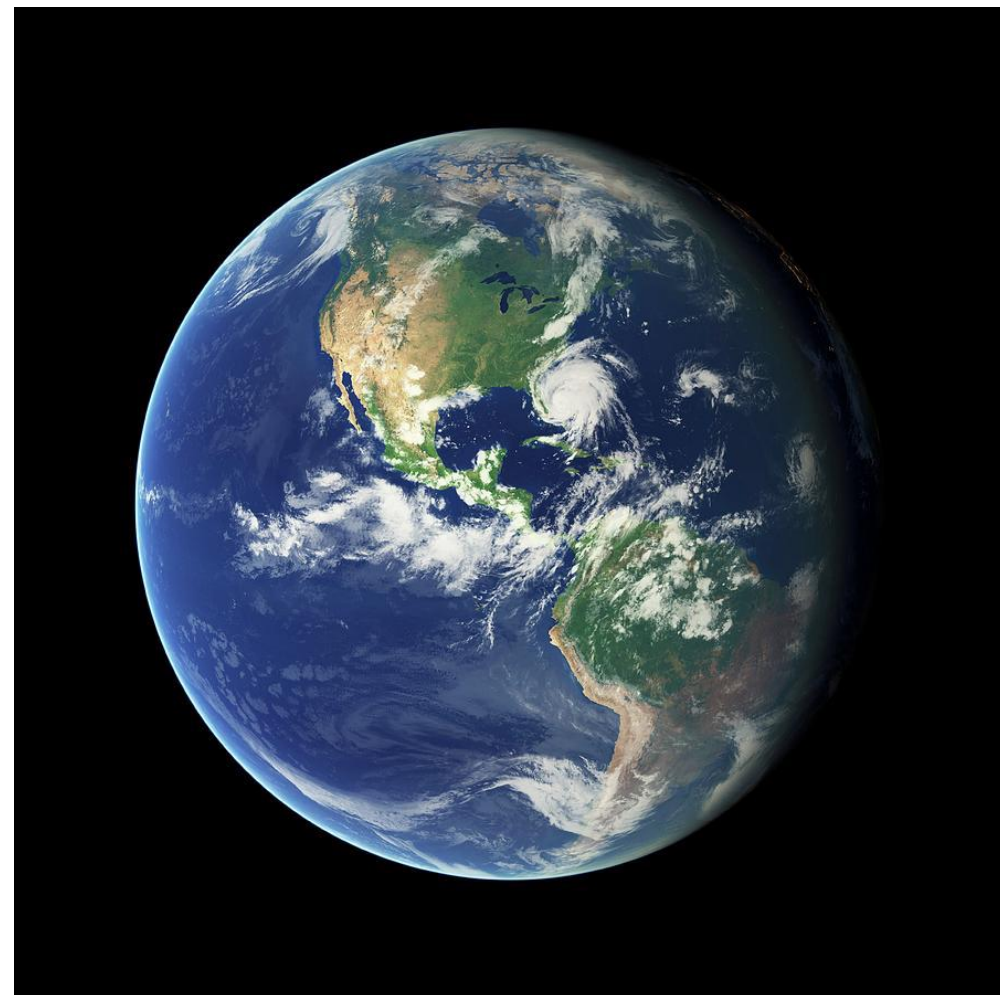
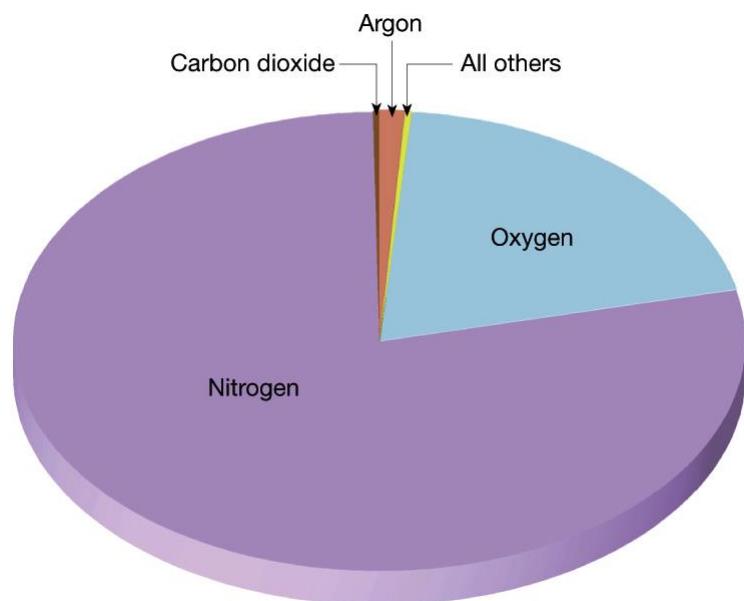
# Složení současné atmosféry Země

Moderní Zemi můžeme lidským okem vidět jako modrozelenou planetu.

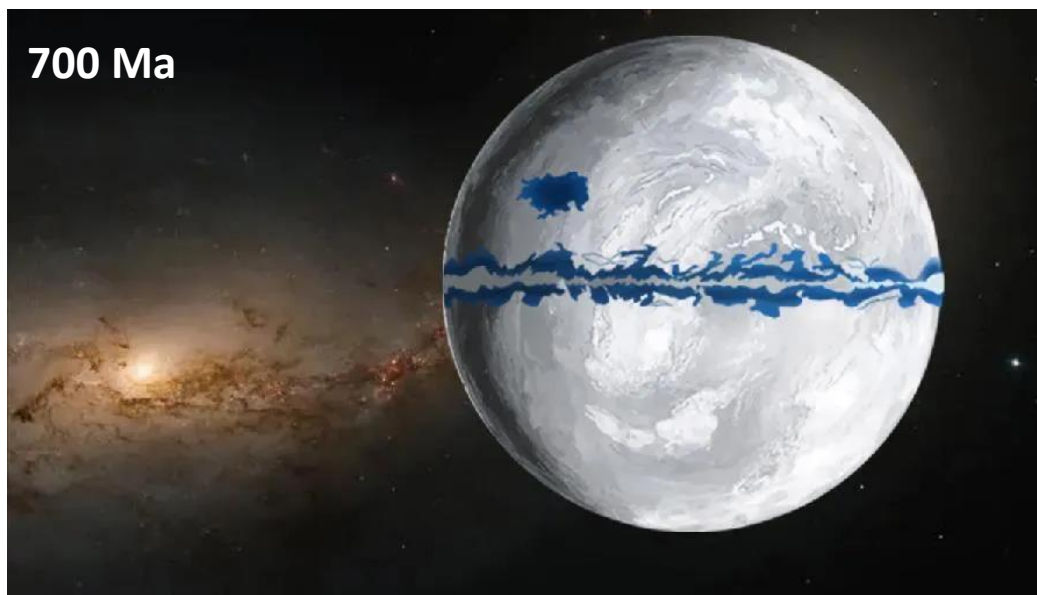
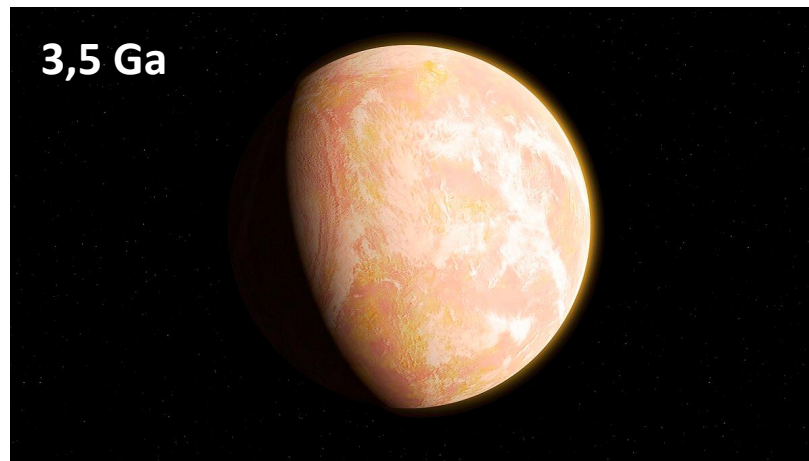
Modrá je proto, že **voda v tekutém skupenství** absorbuje celé barevné spektrum viditelného světla kromě modré.

Zelená díky sinicím, rostlinám a jejich **chlorofylu**.

		Objemová %
dusík	N <sub>2</sub>	78,1
kyslík	O <sub>2</sub>	21,0
argon	Ar	0,9
oxid uhličitý	CO <sub>2</sub>	0,03



V daleké minulosti se však chemické složení atmosféry a oceánů měnilo, společně s organizmy, které Zemi obývaly  
- s tím se měnila i barevná podoba Země během prvních miliard let její existence

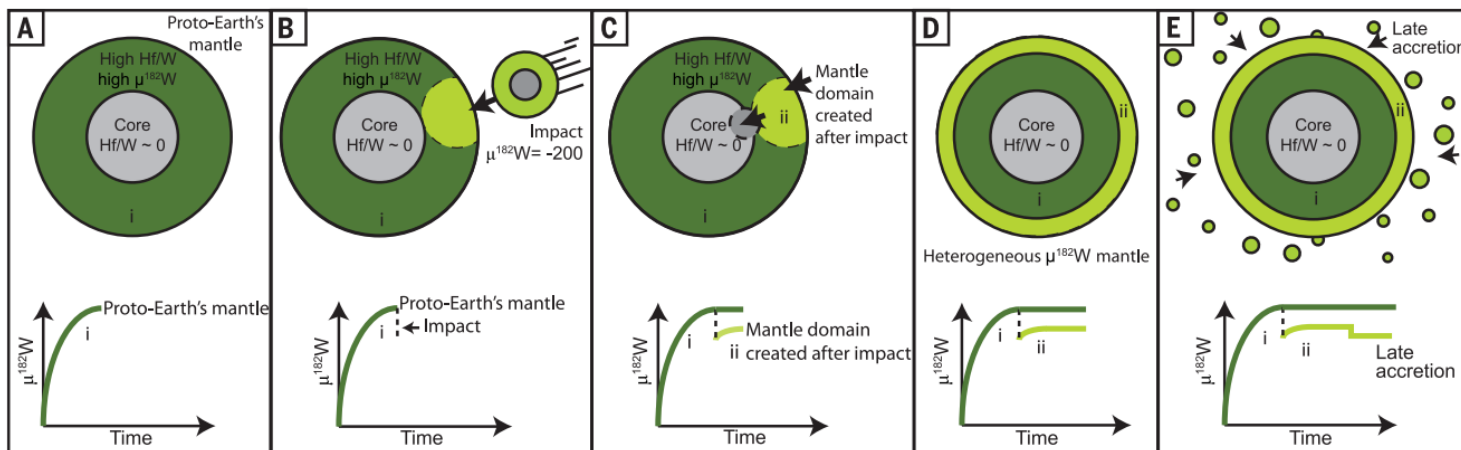


Ga (giga annum) = miliardy let  
Ma (mega annum) = miliony let  
Ka (kilo annum) = tisíce let

- Jaké procesy vedly k zásadním změnám **chemického složení atmosféry a oceánů**?
- Jaký vliv měla změna složení atmosféry na vývoj dalších geosfér, především biosféry?
  
- Následující část kurzu představí ty nejzásadnější milníky ve vývoji života na pozadí **klimatických, geologických oceánografických a dalších změn**
- Sledován bude vývoj (paleo)**ekologických vztahů**
- Probírané události velmi názorně dokumentují provázanost všech přírodních složek/systémů a vzájemné působení mezi „živou“ a „neživou“ přírodou
- Začneme v nejvzdálenější historii Země a budeme pokračovat až do současnosti

# Vznik Země

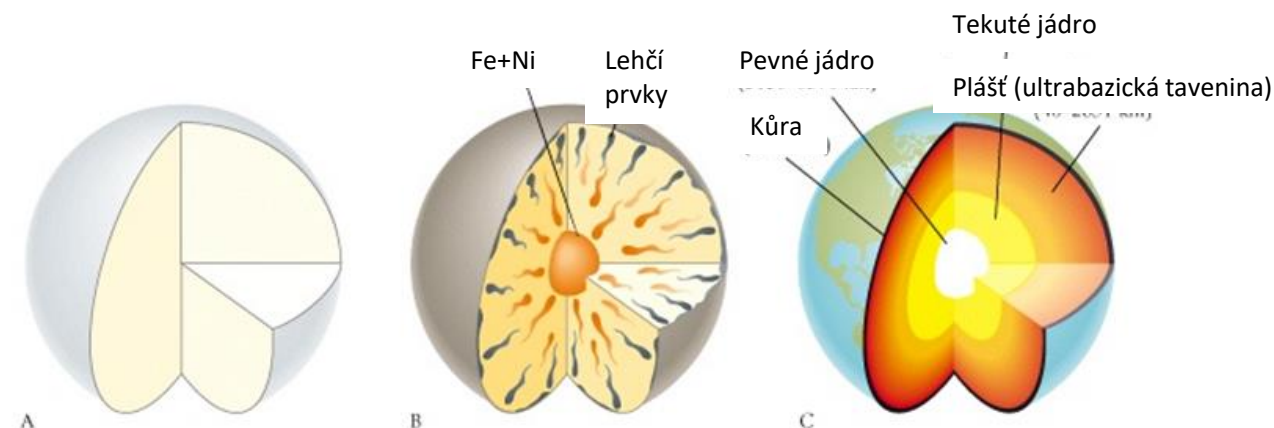
- vznik vesmíru před 15 miliardami lety
- vznik Země před 4,54 miliardami let
- shluknutím zbytkového oblaku prachu a plynu , který rotoval kolem Slunce po jeho vzniku
- Vznik protoplanety – dále srážky s meteority (železné meteority – jádro; kamenné chondrity – plášť)
- raná Země byla tvořena především taveninou (magmatem)



Hypotéza vzniku jádra nárazy

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.aad8563>

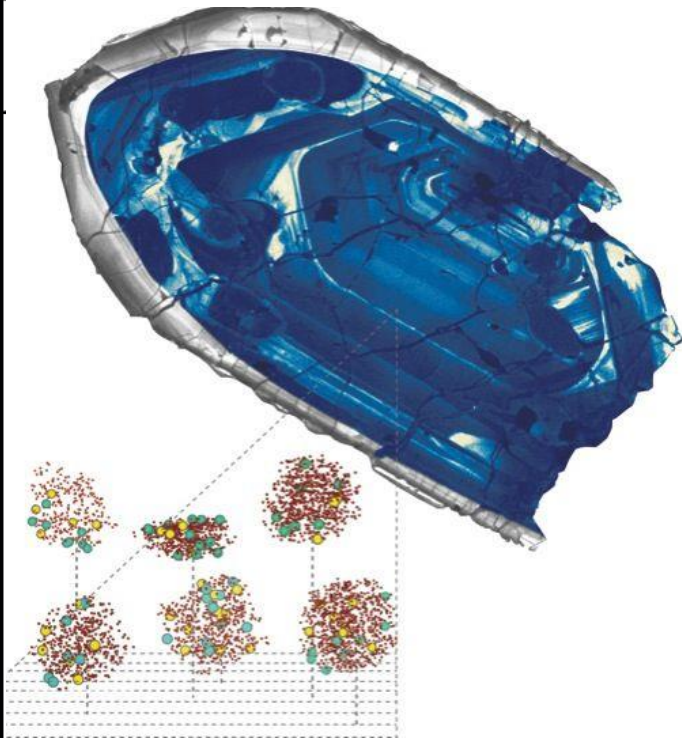
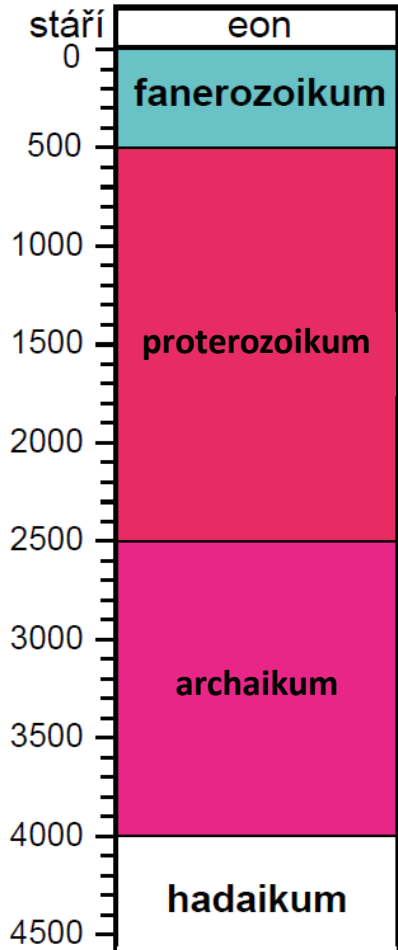
- oddělování prvků podle hustoty do jednotlivých slupek Země (Fe+Ni) do jádra, lehčí prvky do pláště a do kůry



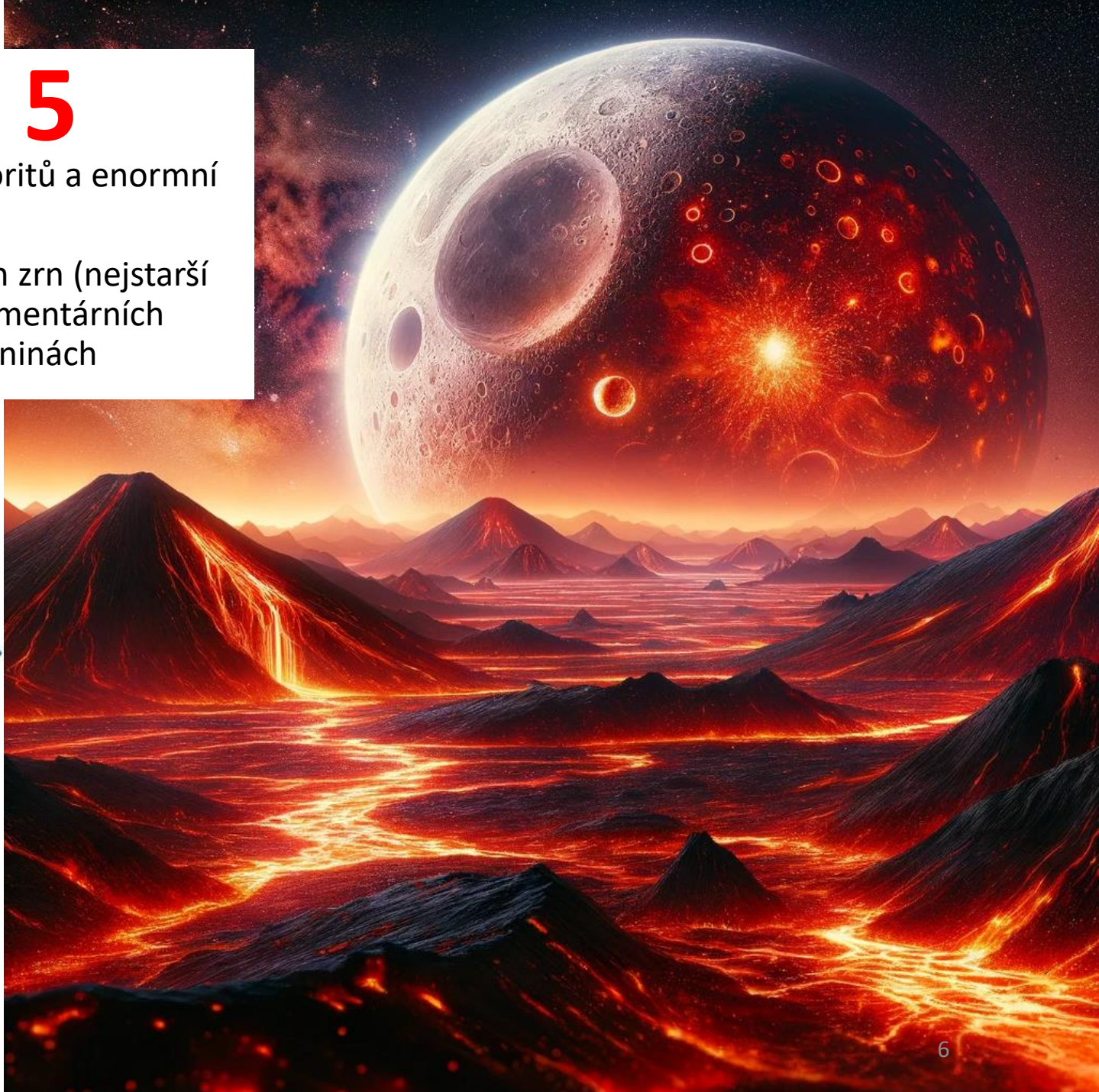
# Hadaikum

- nejstarší období geologického času (podle ř. boha podsvětí Háda)
- povrch Země byl neustále natavován nárazy meteoritů a enormní magmatickou činností
- hmotné doklady ve formě jednotlivých minerálních zrn (nejstarší zirkon 4,4 miliard let), uchovaných v mladších sedimentárních horninách

## KVÍZ 5



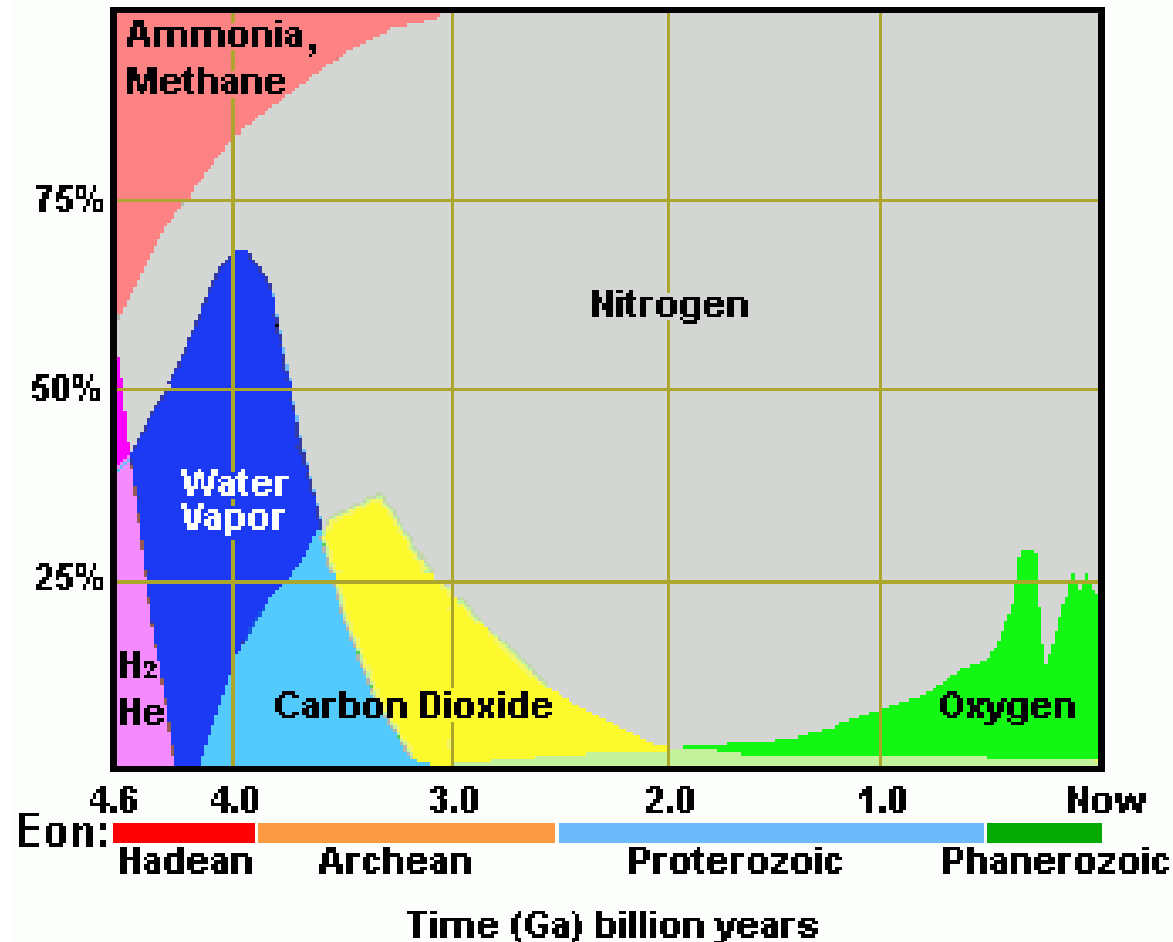
<https://www.livescience.com/43584-earth-oldest-rock-jack-hills-zircon.html>



# Atmosféra v hadaiku

- Chemické složení nejstarších zirkonů dokládá, že už v hadaiku existovaly první oceány a atmosféra
- Atmosféra byla nejprve složena z vodíku, hélia, metanu, čpavku
- Při postupném chladnutí a tuhnutí povrchu se vlivem vulkanického odplyňování její složení změnilo a převažovala vodní pára, metan a čpavek

**% of Atmosphere    Composition of Earth's atmosphere**



<https://i.stack.imgur.com/X9asV.gif>

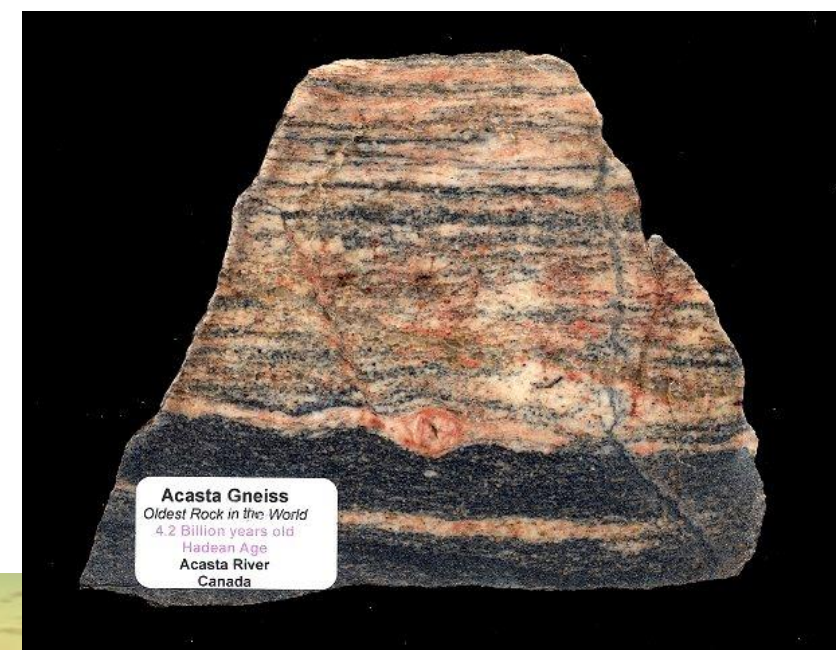
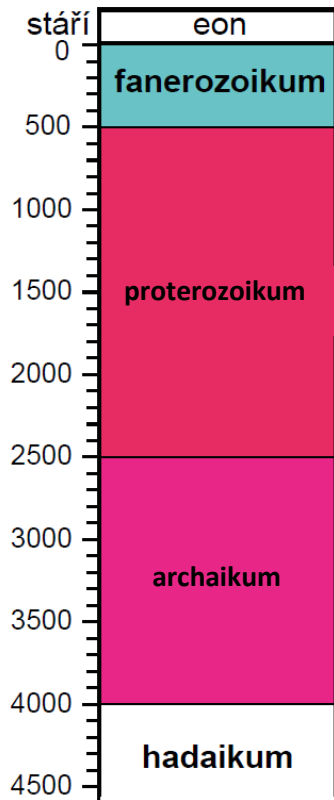
**ARCHAIKUM**  
**(prahory)**



# Archaikum

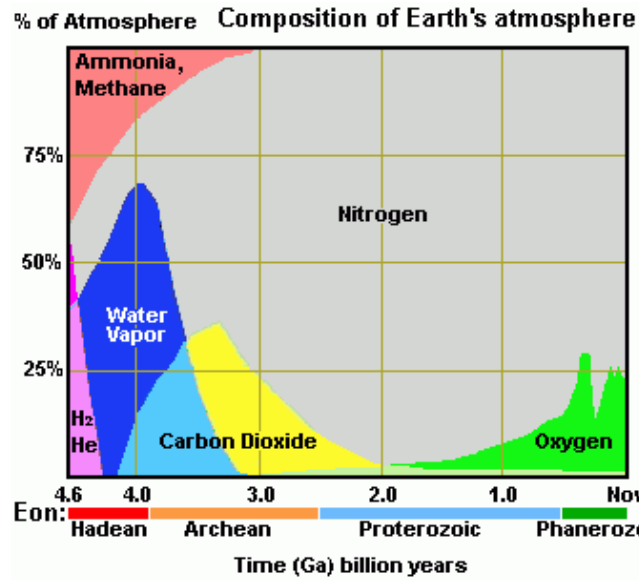
- acastské ortoruly (přeměněné „žuly“ tonality) z Kanady mají datace mezi 4,2 až 3,5 Ga, jsou tak nejstaršími horninami (*hornina je složena z minerálů*)
- hranice mezi hadaikem a archaikem byla stanovena na dobu před 4 miliardami let – hranice jednotek geologického času jsou však jinak většinou vztažené k nějaké konkrétní globální události

**Archaický svět byl světem oceánů – minimum kontinentů;  
kontinentální kůra postupně narůstá jako struska při pochodech  
deskové tektoniky**

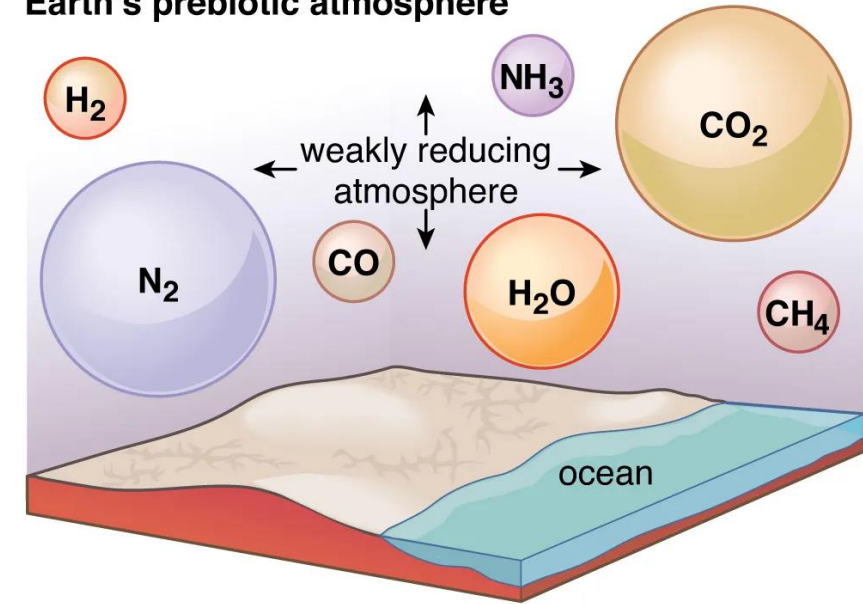


# Atmosféra archaika

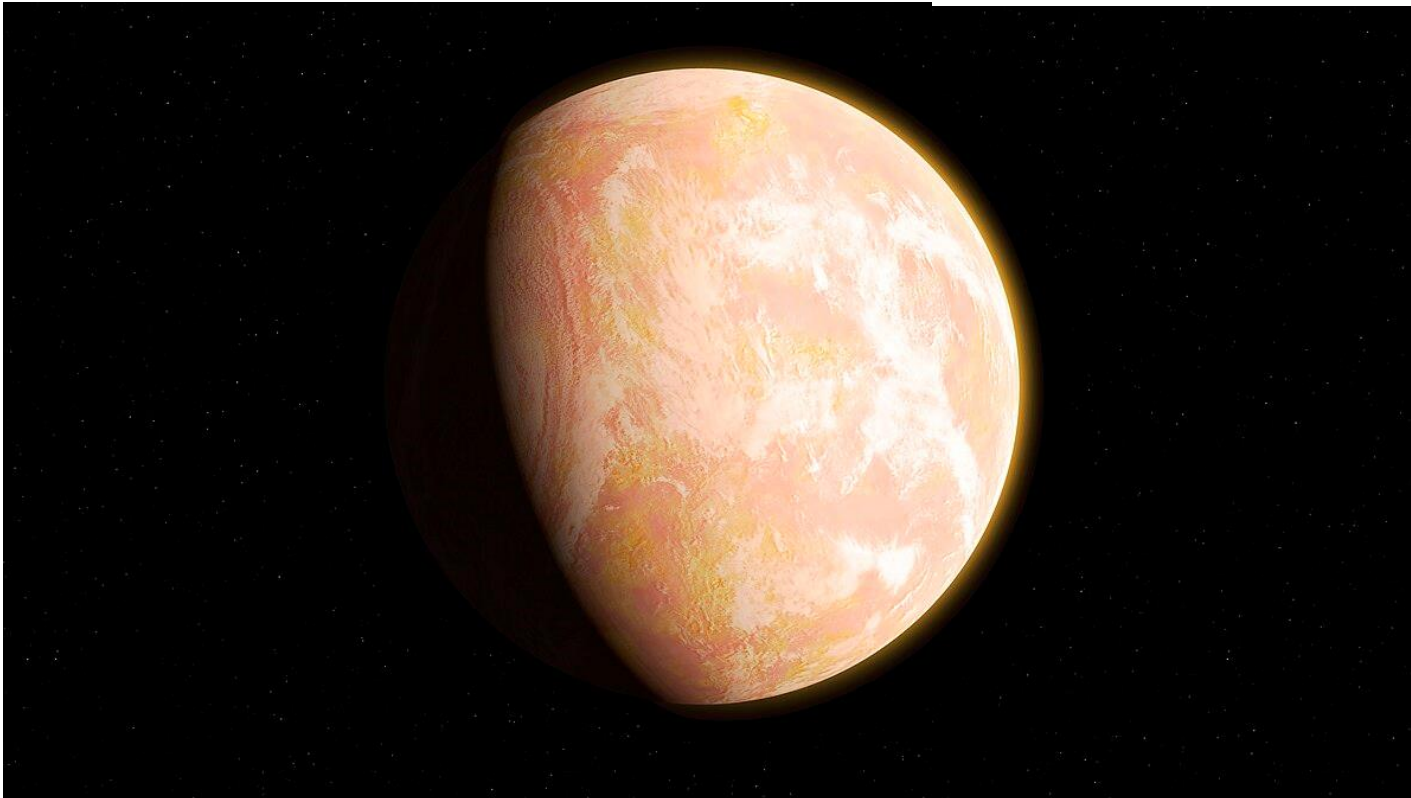
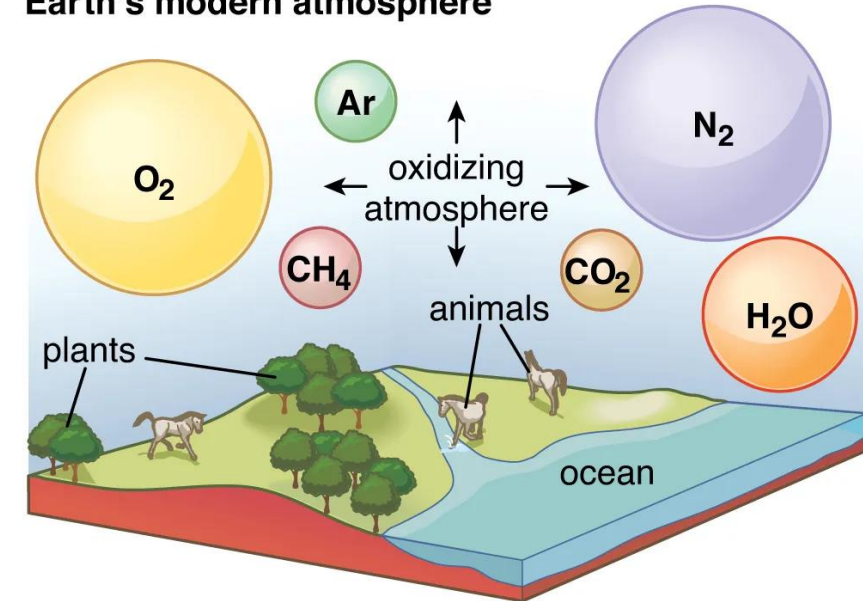
- vznik vulkanickým odplyněním Země
- především dusík a oxid uhličitý + metan,  $H_2O$ ,  $CO$ ,  $H_2$
- světle oranžové zbarvení atmosféry s významnou přítomností **metanu** (podobně jako měsíc Titan)
- bez volného kyslíku



## Earth's prebiotic atmosphere



## Earth's modern atmosphere



- Dokladem pro absenci kyslíku jsou výskyty sedimentárních hornin, složených z úlomků minerálů, jako je uraninit, pyrit a další
- Tyto minerály se při kontaktu s O<sub>2</sub> velmi rychle přeměňují na jiné minerály nebo jsou rozpuštěné



<http://geologie.vsb.cz/loziska/loziska/enersur/uraninit.html>

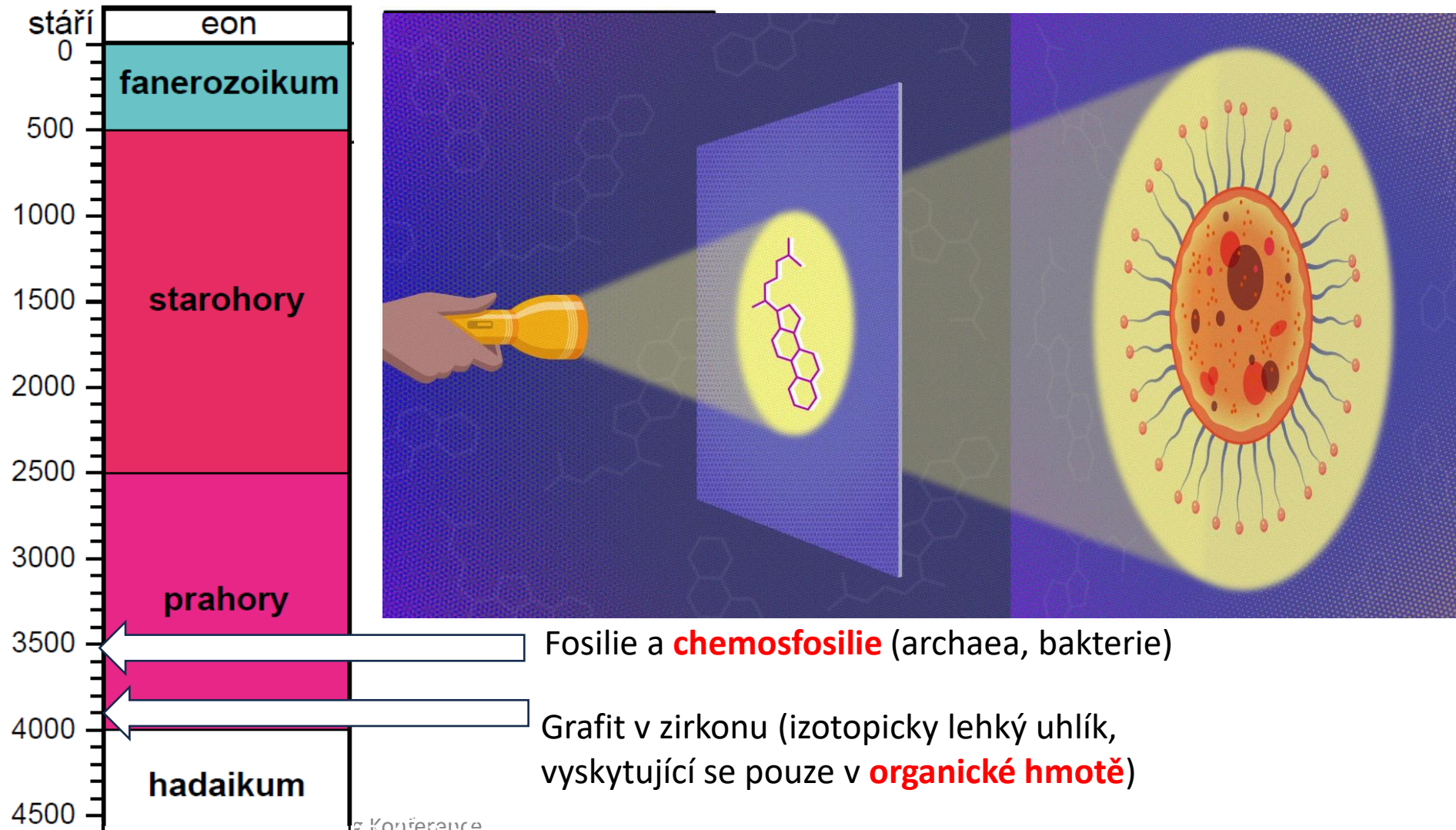
Tyto minerály byly ovšem běžně ukládány ve vodním i suchozemském prostředí archaika – musel tedy chybět volný atmosférický O<sub>2</sub>  
+ celá řada geochemických dokladů (izotopické složení síry v sedimentech)



# Nejstarší záznamy života

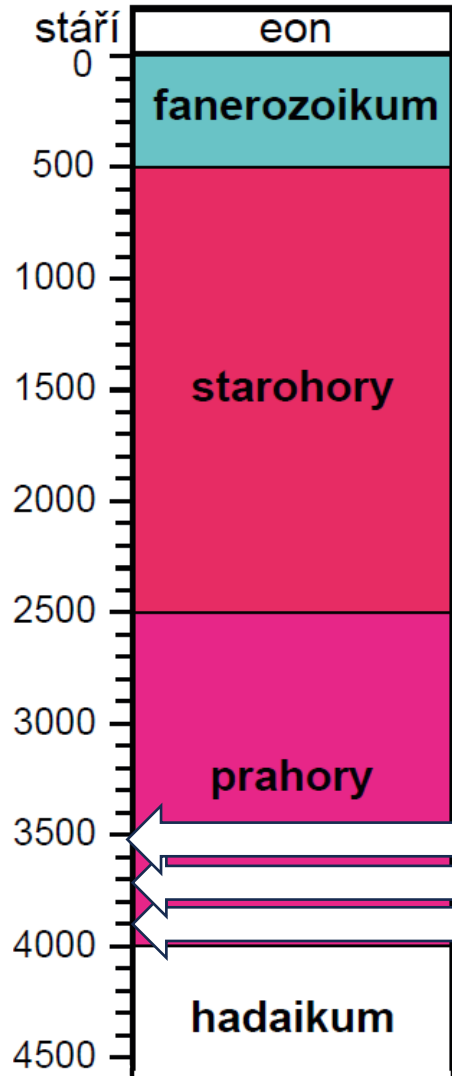
- Z archaika jsou známy nejstarší doklady života
- Nejstarší jsou **chemofosilie** (3,9 Ga)

- **Chemofosilie** jsou organické molekuly nebo izotopické poměry, u kterých je znám původ pouze z živých organismů
- Samotné organismy (bakterie, archeobakterie) se nezachovaly, jen jejich chemický „otisk prstu“

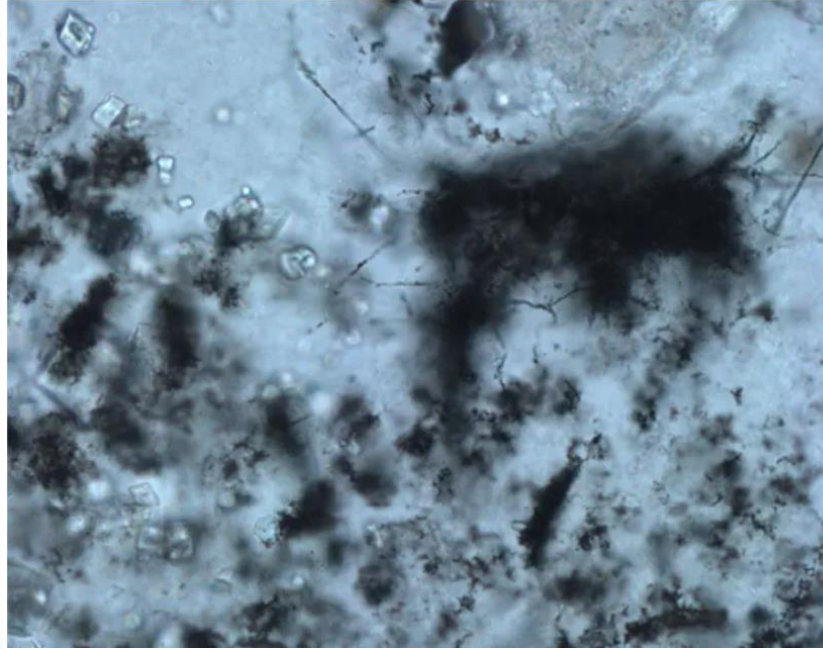


# Nejstarší záznamy života

- Fosilie mikrobů (3,7 Ga)



<https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B9780124095489119748-f11974-10-9780081029084.jpg>



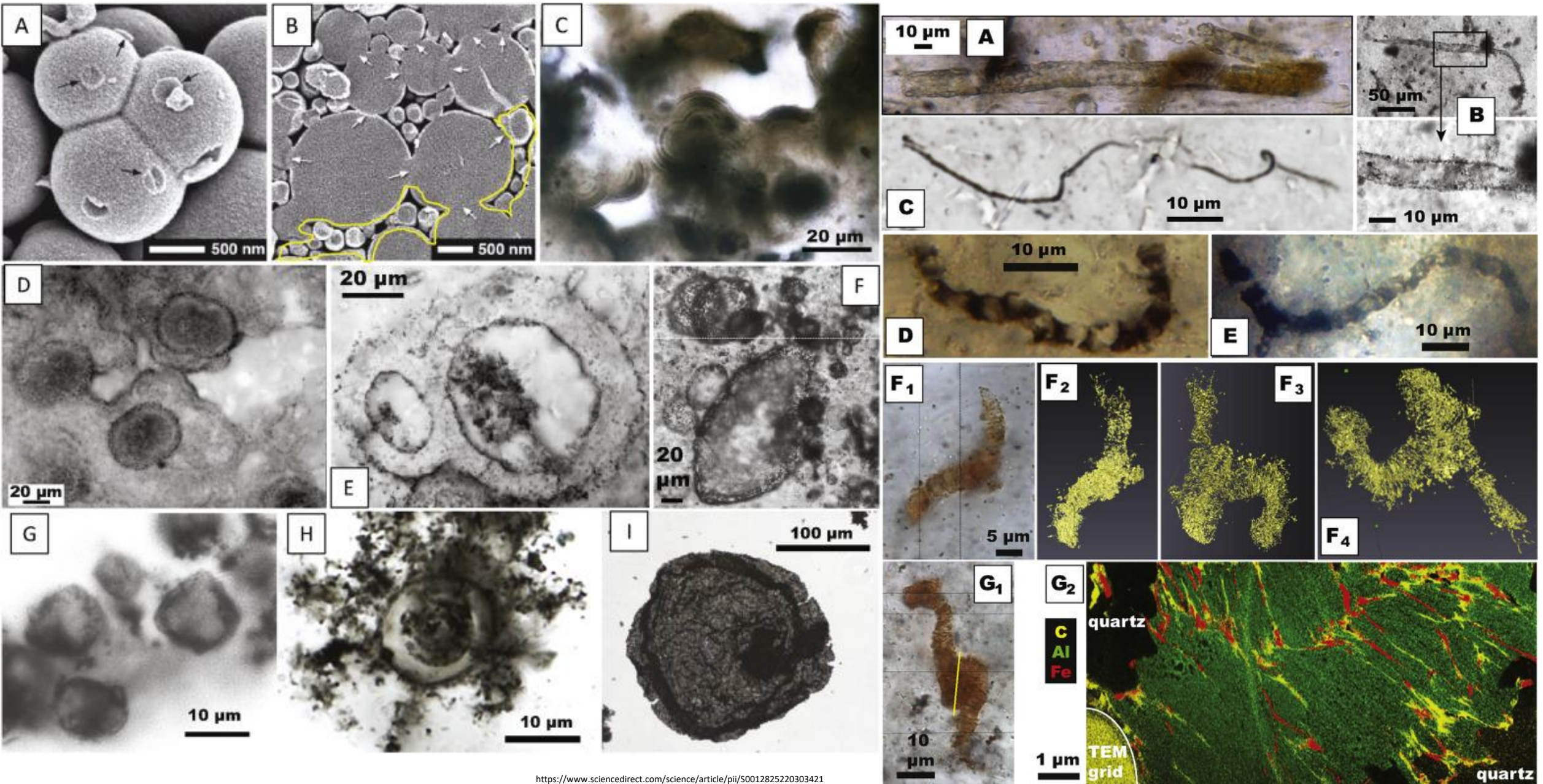
<https://www.sciencenews.org/article/oldest-archaea-microbe-fossil-fillaments-life-evolution>

Fosilie a **chemosfosilie** (archaea, bakterie)  
**Stromatolity** (bakterie)  
Grafit v zirkonu (izotopicky lehký uhlík, vyskytující se pouze v **organické hmotě**)



<https://www.mq.edu.au/research/research-centres-groups-and-facilities/groups/organic-geochemistry/our-projects/archaeoan-stromatolites-signal-of-the-great-oxidation-event>

Jedny z nejstarších zkamenělých organismů – bakterie (3,7 – 3,5 miliard let), archaea (3,5 miliardy let)

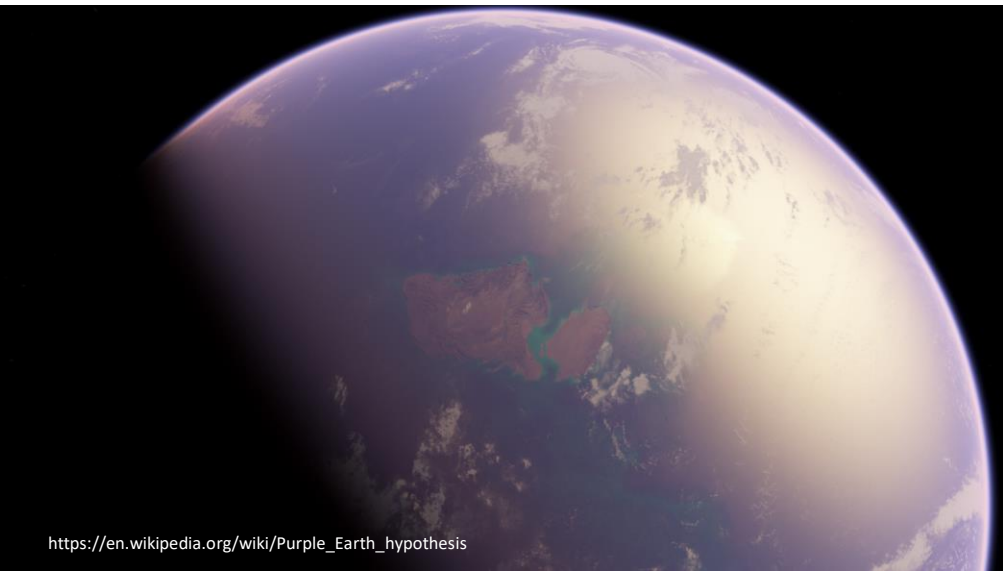
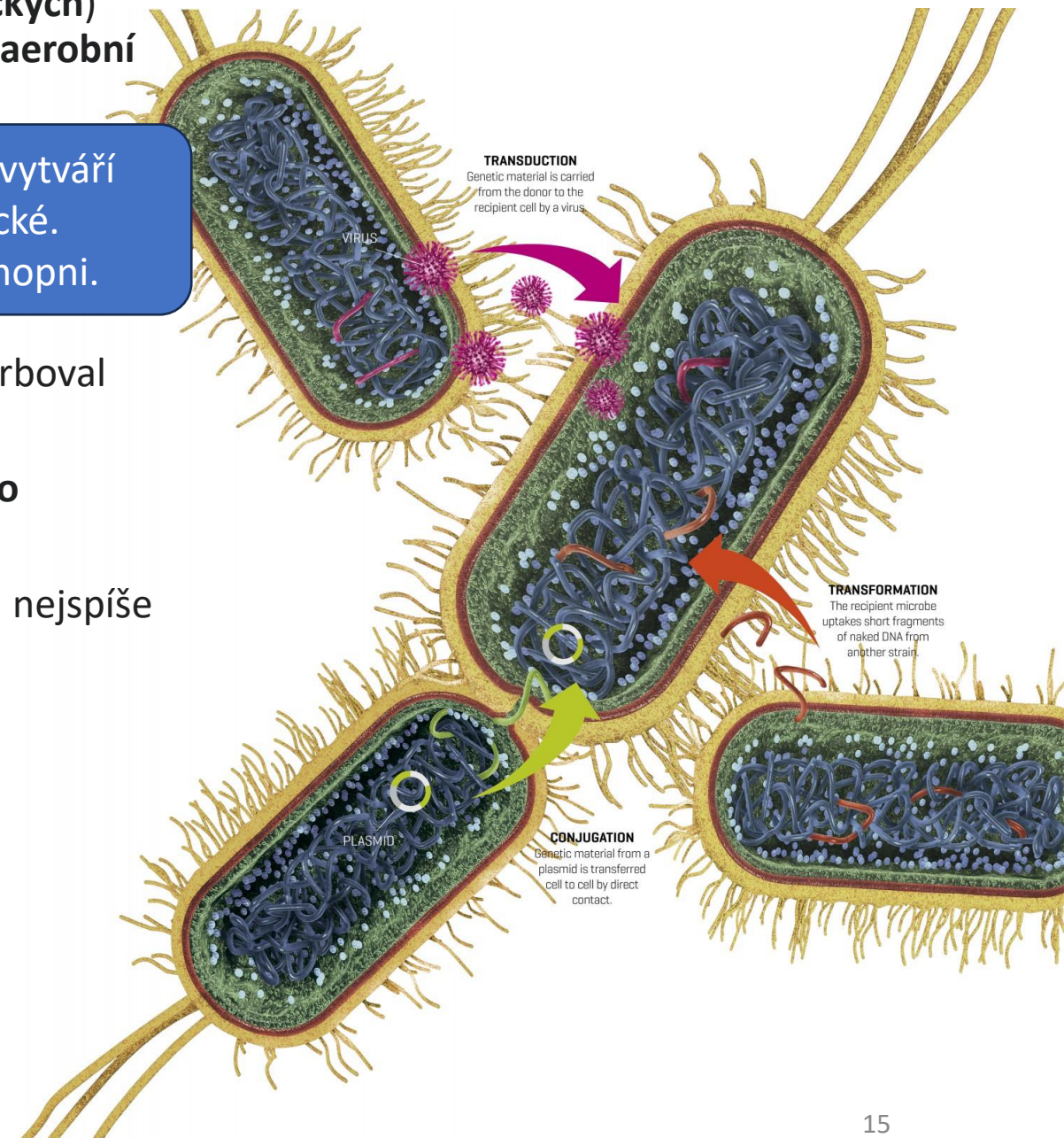


# Anaerobní ekosystémy archaika

- bezjaderné organizmy (a viry?) se vyvíjely v redukčních (**anoxických**) oceánech (tedy bez kyslíku) s vysokou kyselostí, **převládaly anaerobní organizmy**

Základem potravních řetězců jsou **autotrofové** – organizmy, které vytváří chemosyntézou nebo fotosyntézou z abiotických sloučenin organické. Autotrofové jsou potravou pro **heterotrofy**, kteří syntéz nejsou schopni.

- Většina autotrofů se v archaiku živila rozpuštěným Fe, S a absorboval metan a čpavek (chemosyntéza).
- Fotosyntetizující organizmy využívaly v archaiku **retinal namísto chlorofylu** (nevzniká O<sub>2</sub>, ale volná síra)
- **retinal odráží fialovou barvu** – biosféra povrchu Země tak měla nejspíše fialovou barvu namísto zelené



# **PROTEROZOIKUM**

## **(starohory)**

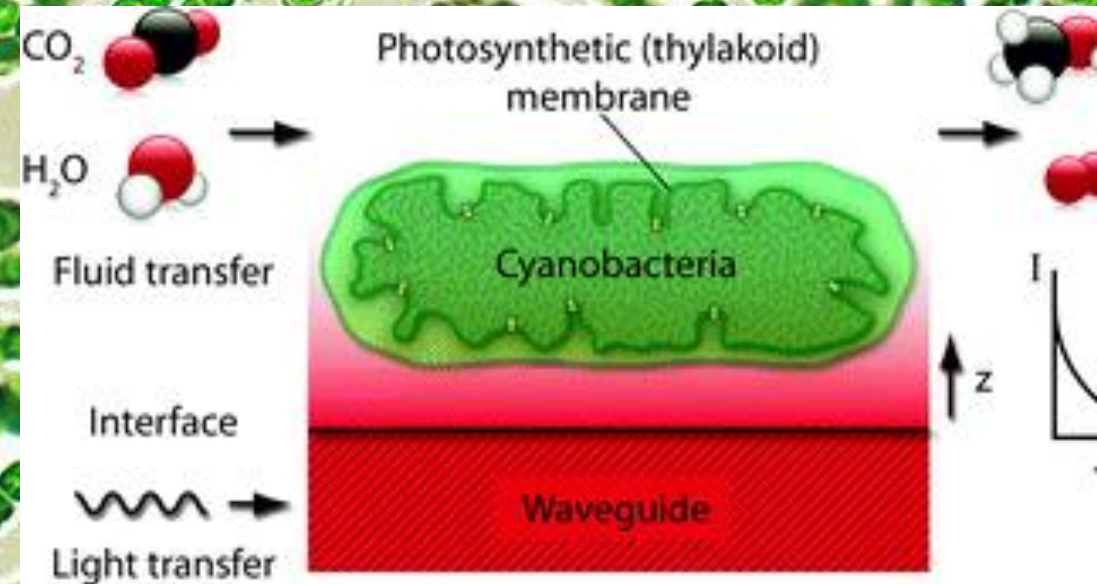


# Sinice



- Z různých bezjaderných organismů stojí za zmínku kmen sinic (cyanobakterie) – jsou zásadním organismem Země
- Nezpochybnitelné fosilie sinic až od 1,9 Ga, diskutabilnější nálezy jsou už z archaika
- **Sinice využívají porfyrinovou (chlorofylovou) fotosyntézu**  
- ta je **doložena geochemicky už z archaika**
- v thylakoidních membránách dochází k syntéze uhlovodíků – cukrů  
- za účasti slunečního záření reaguje  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$
- **odpadním produktem syntézy je  $\text{O}_2$**

(na rozdíl od retinalové fotosyntézy produkující síru)



<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6880289/>

<https://algaepianet.com/cyanobacteria-as-a-surrogate-mother-for-meat-like-proteins/>

- Sinice jsou velmi hojné v mnoha prostředích
- Při velké dostupnosti živin (**eutrofizace vod**) a světla se mohou přemnožit
- Známe např. z letních vodních nádrží jako vodní květ



Některé sinice (a jiné bakterie) rostou v povlacích, vrstvičkách a rohožích. V nich může během jejich života (i po něm) krystalizovat minerál kalcit nebo aragonit (nebo jiné minerály; nebo taky žádné). Generace sinic za generacemi narůstají ve vrstvičkách na sebe a vzniká mikrobiální hornina (mikrobialit).

<https://youtu.be/45mF7ZHWMaw?si=VyClkY4qy5h6H1B4>

Nejvýraznější jsou **stromatolity**  
(první stromatolity před  
3,7 - 3,5 miliardami let)

<https://newsroom.unsw.edu.au/news/science-tech/stromatolites-fossils-earliest-life-earth-may-owe-existence-viruses>



Stromatolity ovšem mohou tvořit i jiné bakterie než sinice – ty nejstarší jsou tedy spornými doklady

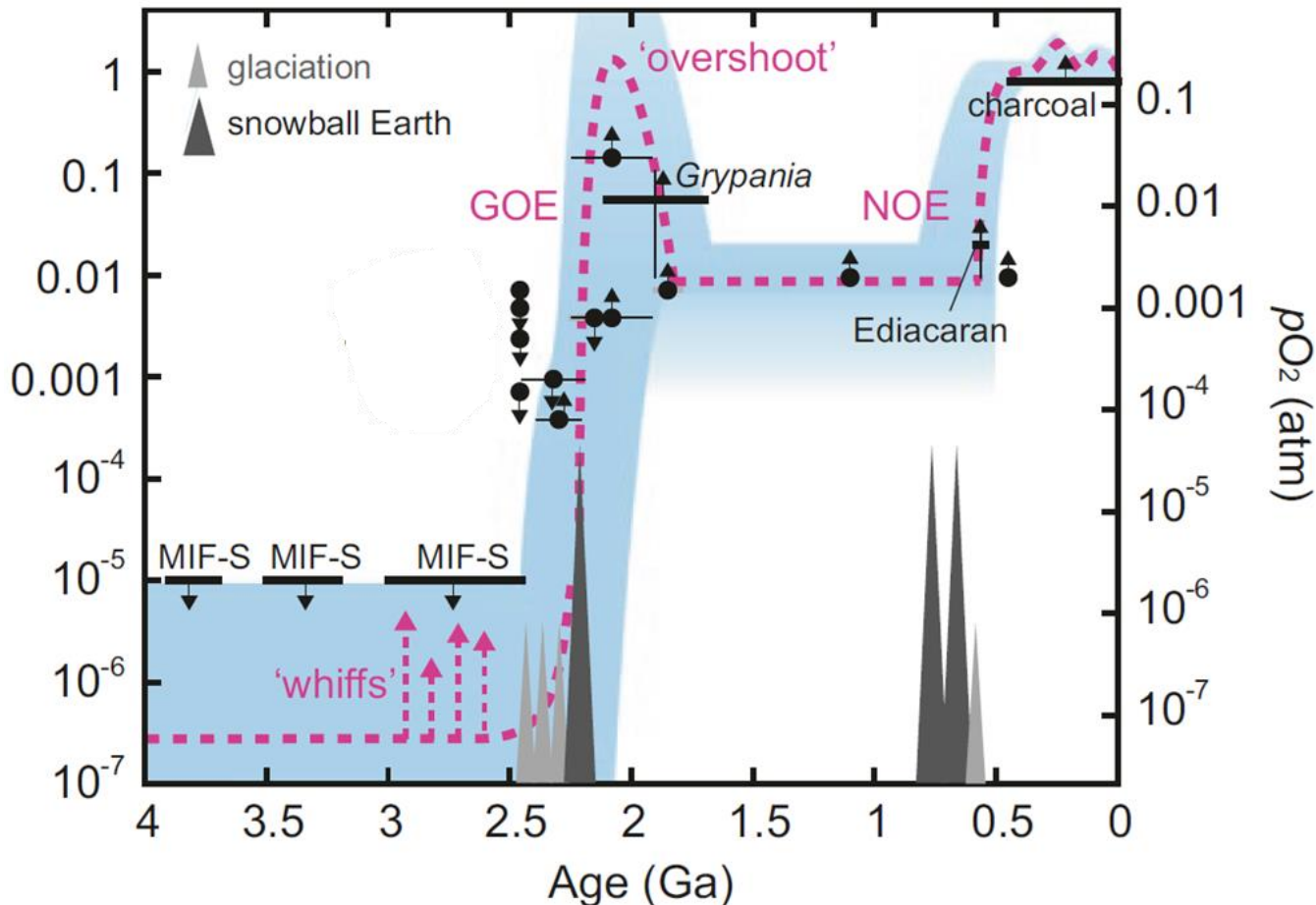
<https://woostergeologists.scotblogs.wooster.edu/2017/11/17/woosters-fossils-of-the-week-encrusting-cyanobacteria-from-the-upper-ordovician-of-the-cincinnati-region/>



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stromatolite\\_%28Fort\\_Laclede\\_Bed\\_Laney\\_Member\\_Green\\_River\\_Formation\\_Lower\\_Eocene\\_ancient\\_Lake\\_Gosiute\\_southwestern\\_Wyoming\\_USA%29\\_1\\_%2815009280980%29.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stromatolite_%28Fort_Laclede_Bed_Laney_Member_Green_River_Formation_Lower_Eocene_ancient_Lake_Gosiute_southwestern_Wyoming_USA%29_1_%2815009280980%29.jpg)

# Velká oxidační událost aneb Velká kyslíková katastrofa

- sinice, využívající k fotosyntéze chlorofyl, postupem času vytvářely stále více O<sub>2</sub> (+ „dark oxygen“?)
- v rozmezí od 2,5 do 2,1 miliard let došlo ke „skokovému“ nárůstu koncentrace O<sub>2</sub>  
(uvozovky kvůli skoku trvajícím 400 milionů let :)
- koncentrace O<sub>2</sub> vzrostla až na 10 % dnešního stavu

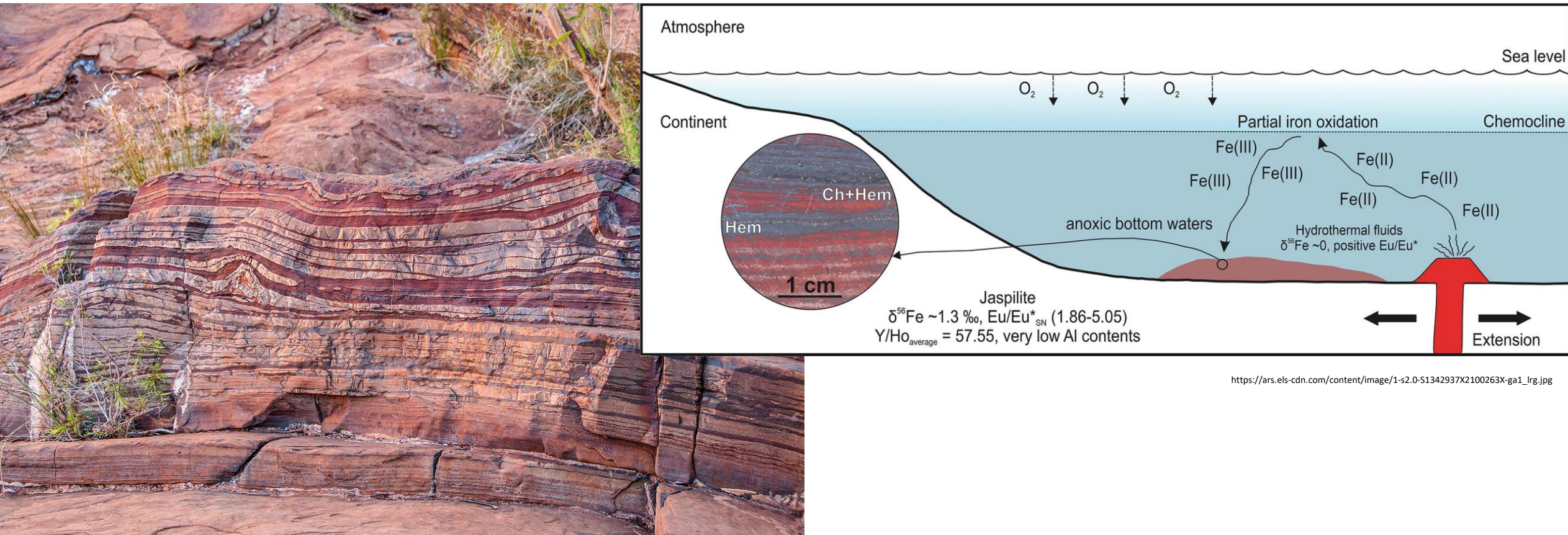


- **Kyslík produkující organizmy existovaly i před touto událostí. Proč tedy došlo ke skokovému růstu?**

- Kyslík z fotosyntézy reagoval v oceánech s železem, manganem, uranem, sírou, molybdenem atd., které uvolňoval vulkanizmus
- Byl tak z oceánské vody odebírán do minerálů, které oxidačními chemickými reakcemi mezi O<sub>2</sub> a Fe, U nebo S vznikaly a hromadily se na dně oceánu
- Vulkanická aktivita byla v hadaiku a archaiku obrovská, postupně však slábla
- Naopak narůstalo množství fotosyntetizujících organismů, které produkovaly O<sub>2</sub>

# Příčiny velké kyslíkové katastrofy

- jak přibývalo biomasy a O<sub>2</sub>, docházelo k stále většímu množství oxidačních reakcí s Fe<sup>2+</sup> v oceánech
- Produktem oxidace Fe je Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, který tvoří nerozpustné minerály – např. **hematit a goethit**
- Tyto minerály se hromadily v sedimentech
- **Fe<sup>2+</sup> tak z oceánu rychle zmizelo a kyslík s ním už nemohl masově reagovat – a začal se v oceánu hromadit**
- Za spoluúčasti bakterií vznikly velmi specifické sedimenty - **páskované železné rudy (BIF – Banded Iron Formation)**
- Jedná se o světově největší ložiska pro těžbu železa

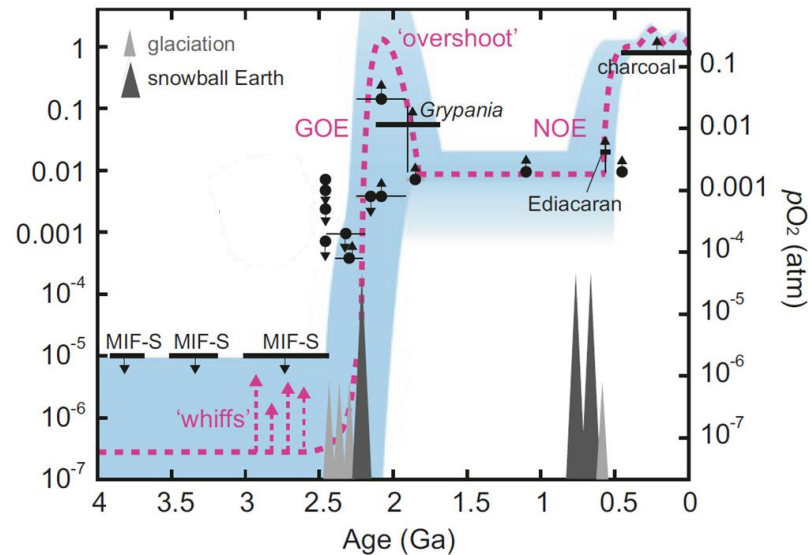


[https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1342937X2100263X-ga1\\_lrg.jpg](https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S1342937X2100263X-ga1_lrg.jpg)

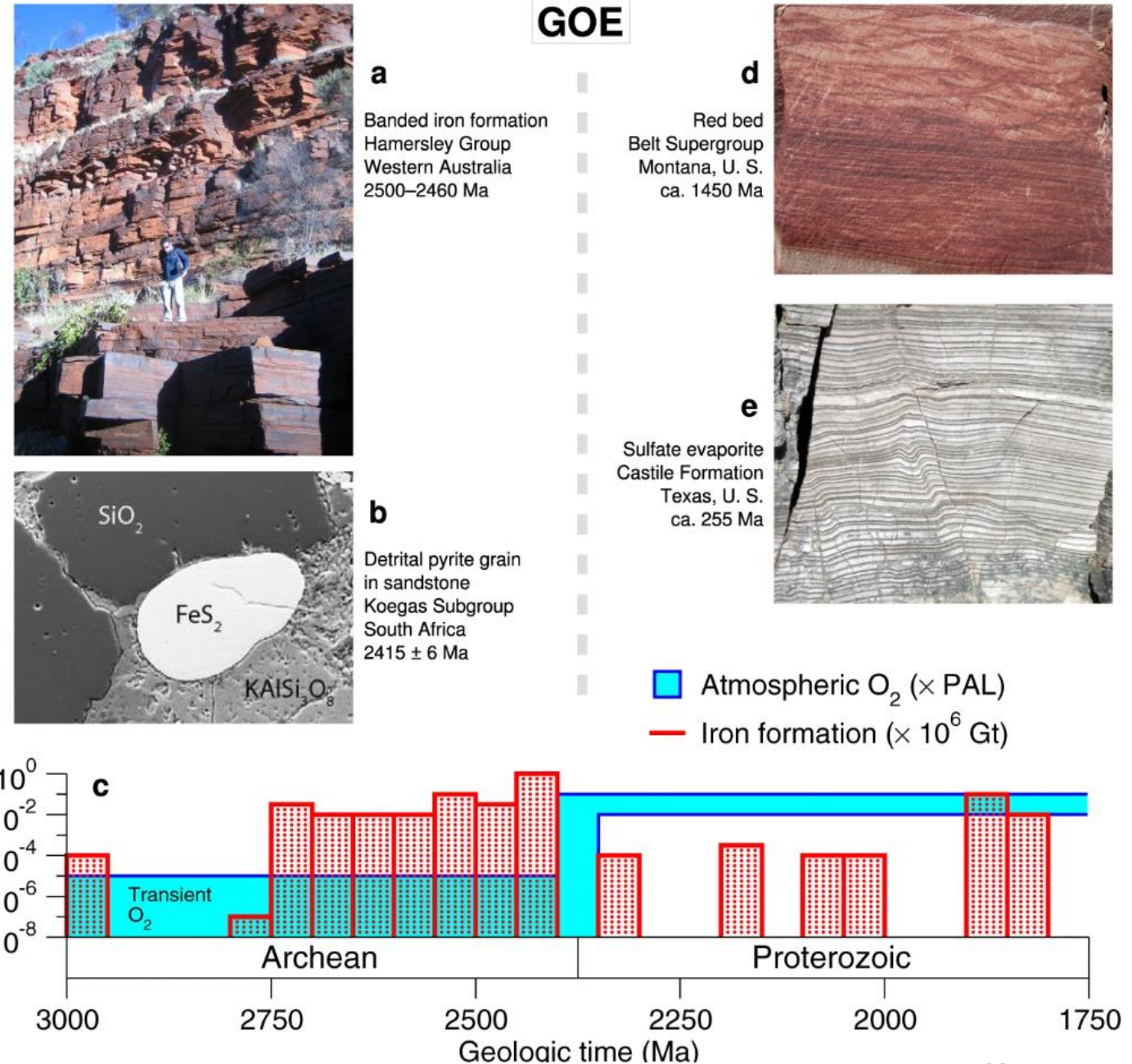
Země měla během událostí vzniku  
BIF pravděpodobně červenavé  
zbarvení



- Zrychlování spotřeby Fe<sup>2+</sup> z oceánů dokládá enormní výskyt páskovaných železných rud před velkou kyslíkovou událostí (méně hojné výskyty byly pak ještě ve zbytku období proterozoika, kdy nebylo mnoho kyslíku; později už nevznikaly)
- Po velké kyslíkové události začaly vznikat červené kontinentální pískovce nebo hornina sádrovec, které potřebují ke vzniku volný O<sub>2</sub>
  - tyto horniny nejsou před velkou kyslíkovou událostí známé z žádného místa na Zemi



[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-3639-3\\_17](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-3639-3_17)



<https://www.nature.com/articles/s41467-021-23286-7>

# Následky velké kyslíkové katastrofy

- velká kyslíková událost, způsobená sinicemi vedla k:

## Změně složení atmosféry a hydrosféry

### Vzniku nových minerálů

- mnoho prvků se v blízkosti zemského povrchu vyskytuje v jedné nebo více oxidovaných formách (2 500 z celkového počtu asi 4 500 minerálů nalezených dnes na Zemi)

### Zesílení zvětrávání

- oxidace je jeden z hlavních procesů chemického zvětrávání (vedoucí k - uvolňování iontů a molekul do vody – ty fungují jako živiny – odjímání CO<sub>2</sub> do biomasy - nebo k odjímání **CO<sub>2</sub> z atmosféry do produktů zvětrávání – významné z pohledu změn klimatu**)

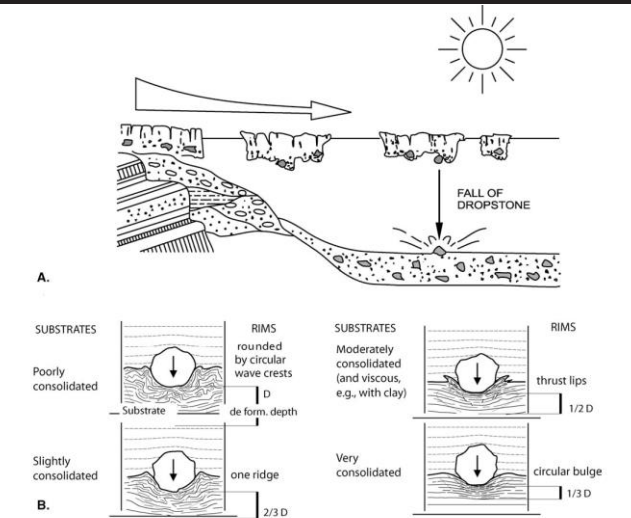
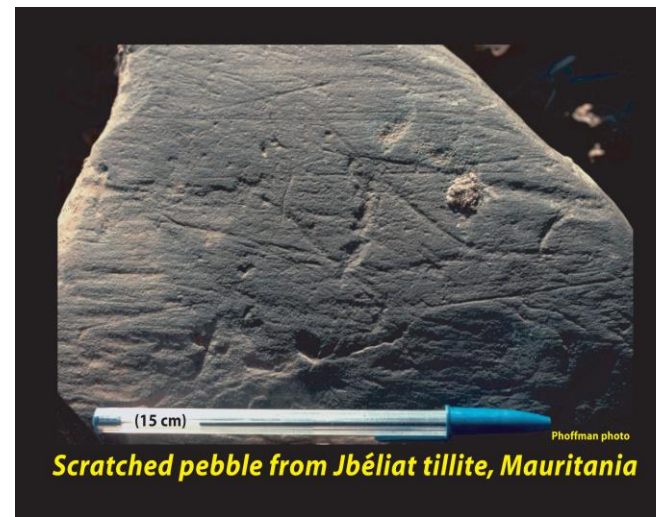
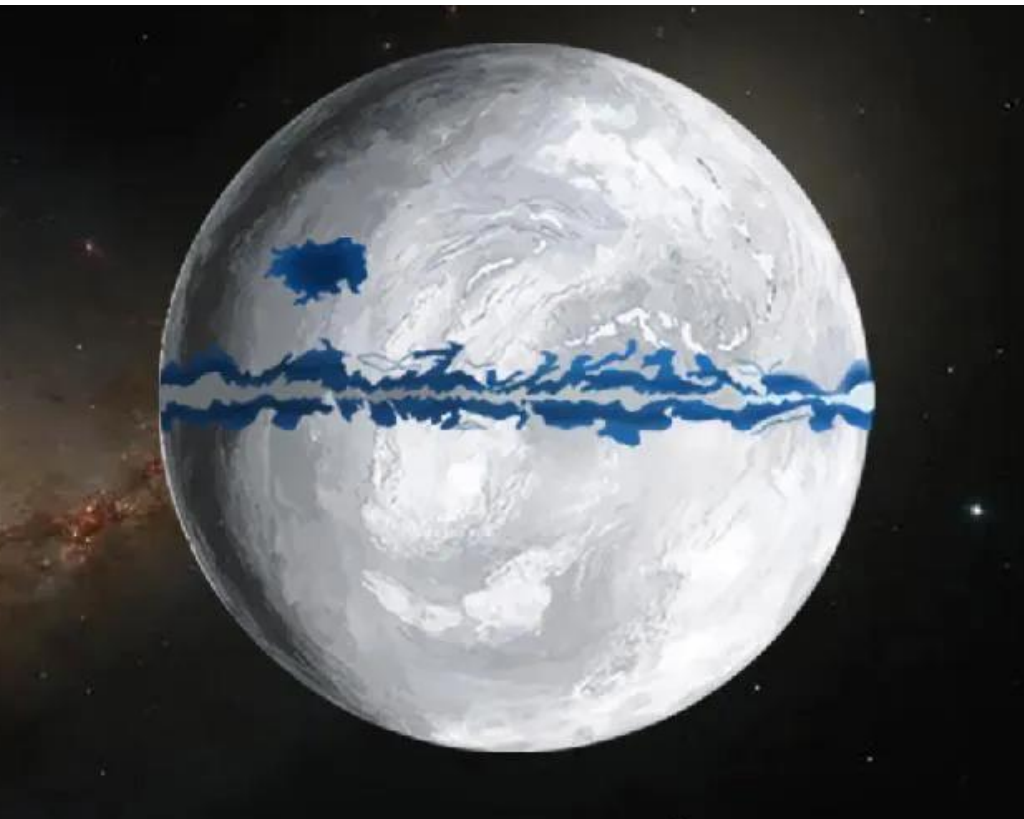
### Zvýšení dostupnosti živin

- nárůst O<sub>2</sub> a změny zvětrávání zvýšili dostupnost volné energie pro organizmy
- to vedlo k rychlému rozvoji nových typů organizmů
- vznik „moderního“ biologického cyklu uhlíku – významné z pohledu změn klimatu



# Následky velké kyslíkové katastrofy: Země jako sněhová koule

- ze sedimentů doby velké kyslíkové události (a pak ještě několikrát během proterozoika) pocházejí záznamy o nejvýraznějším globálním poklesu teplot v historii Země,
- Nálezy sedimentárních a geologických struktur, které vytvořily ledovce v proterozoických horninách - **od pólu k rovníku** (tillity, rýhování, dropstones)
- tzv. **Snowball Earth Hypothesis** – Země prodělala mohutné zalednění, (téměř?) globálního (?) rozsahu



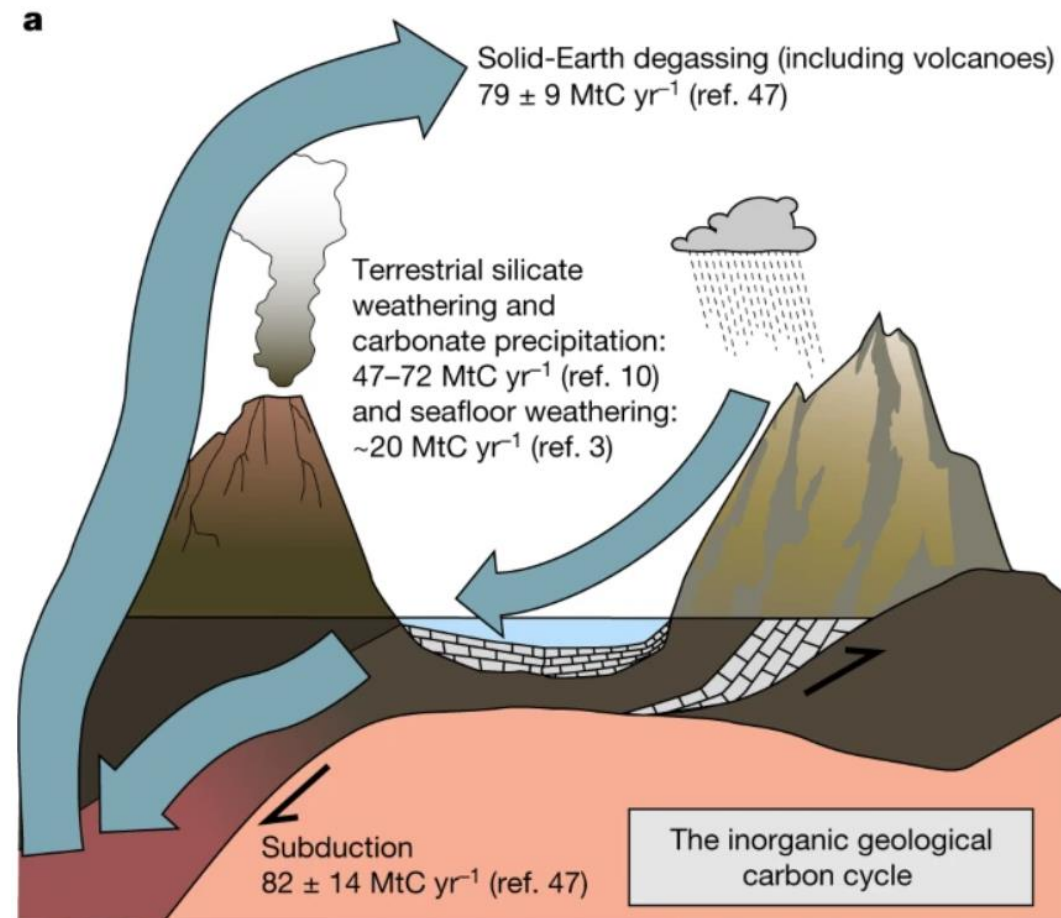
- konkrétní příčiny „**snowball**“ **klimatického režimu** jsou stále v hledáčku výzkumů, ale mnoho dokladů svědčí pro to, že okysličení atmosféry vyvolalo řetězec změn se smyčkami pozitivních zpětných vazeb odjímání CO<sub>2</sub> z atmosféry

1) oxidace hojného atmosférického metanu na slabší skleníkové plyny CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O

- **zeslabení skleníkového efektu atmosféry**

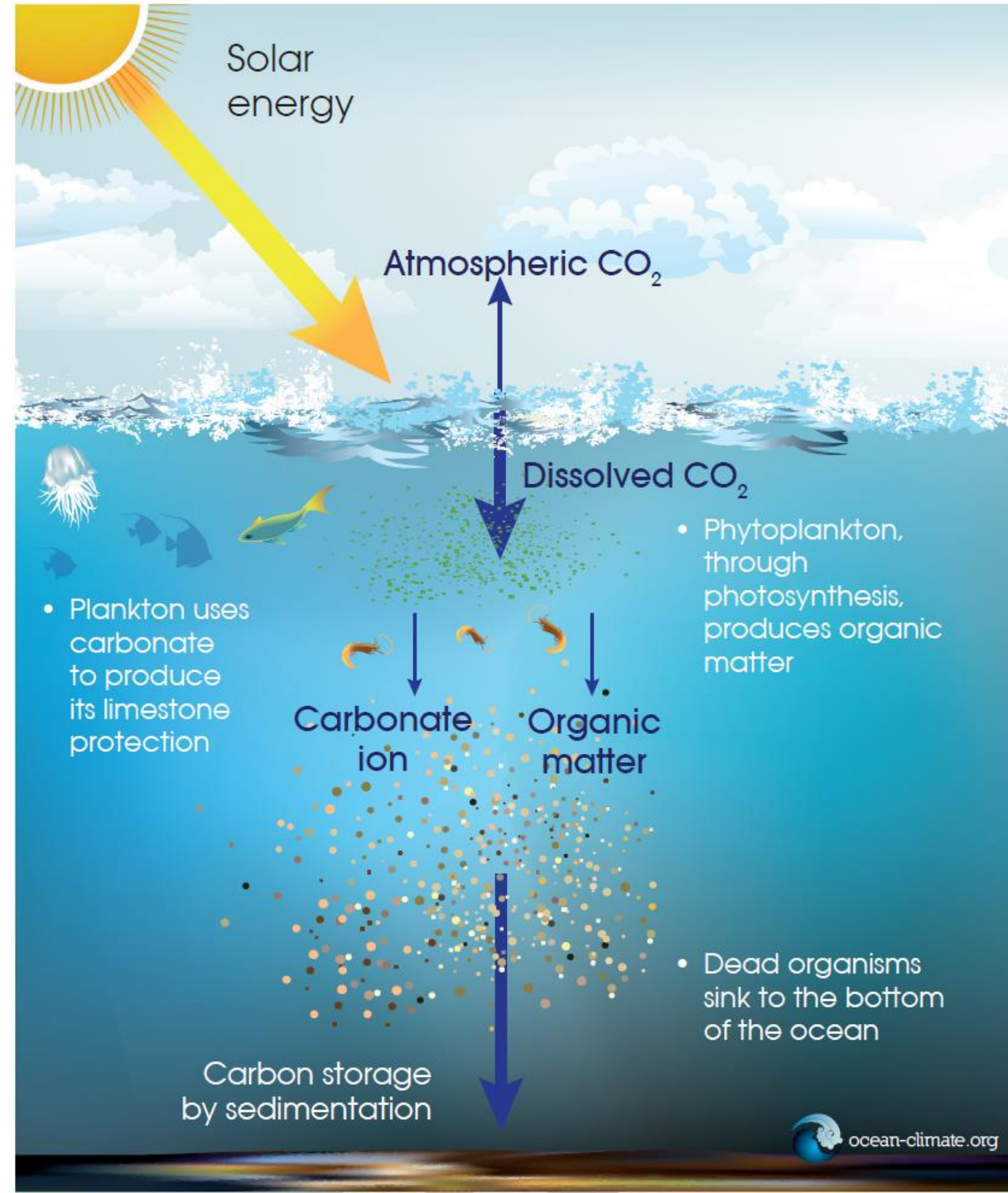
2) zvyšování intenzity chemického zvětrávání díky O<sub>2</sub> v atmosféře

- odjímání CO<sub>2</sub> z atmosféry
- **zeslabení skleníkového efektu atmosféry**



### 3) Pohřbívání organické hmoty

- růst koncentrací O<sub>2</sub> v oceánech (a stále více živin ze zvětrávání) stimuloval výrazný rozvoj biomasy
- odumřelá biomasa = organická hmota (C<sub>org</sub>), klesala z prokysličených svrchních částí oceánů na neokysličená hluboká oceánská dna
- usazovaly se jíly bohaté na organickou hmotu, ze kterých vznikají **černé břidlice**
- V mělkých částech moří rostly a srážely se **vápence** (odjímání C<sub>carb</sub>; v proterozoiku především stromatolity a anorganické srážení)
  - odjímání CO<sub>2</sub> - **zeslabení skleníkového efektu atmosféry**



# Následky velké kyslíkové katastrofy: vymírání v anaerobních ekosystémech

- „vítězství aerobního metabolismu“
- evoluční tlak prostředí zvýhodnil organizmy s aerobním metabolismem, pro které nebyl O<sub>2</sub> toxický

## Evoluční výhoda aerobního metabolismu:

- vytváří mnohem efektivněji energii nežli anaerobní
- 1000 x více biosyntetických reakcí než anaerobní
- mohou vznikat uhlovodíky s dlouhými řetězci: steroidy, alkaloidy, mastné kyseliny, tvořící orgány a membrány buněk

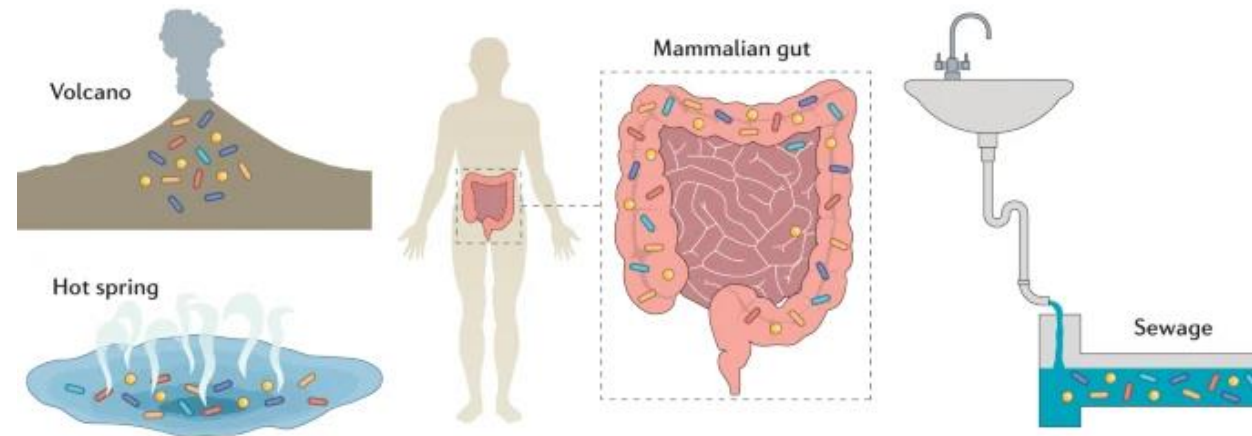
## Anaerobní archeobakterie a bakterie při kyslíkové katastrofě

- 1) vymřely (pravděpodobně největší vymírání všech dob)
- 2) stáhly se do prostředí bez kyslíku
  - do sedimentu, hydrotermálních vývěrů, hlubokých oceánů
- 3) **přizpůsobily se – vznik moderních jaderných buněk (eukaryota)**

- přizpůsobení přežívajících archaea prostřednictvím endosymbiózy s aerobními bakteriemi mohla vést k vzestupu jaderných (eukaryotických) organizmů

(metabolismus = vytváření energie pro životní funkce a stavbu organické hmoty  
aerobní metabolismus = chemický proces, při kterém se kyslík používá k výrobě energie ze sacharidů)

Anoxic and hypoxic environments inhabited by anaerobic bacteria



# Spolupráce se vyplácí - symbiózou k novým formám života

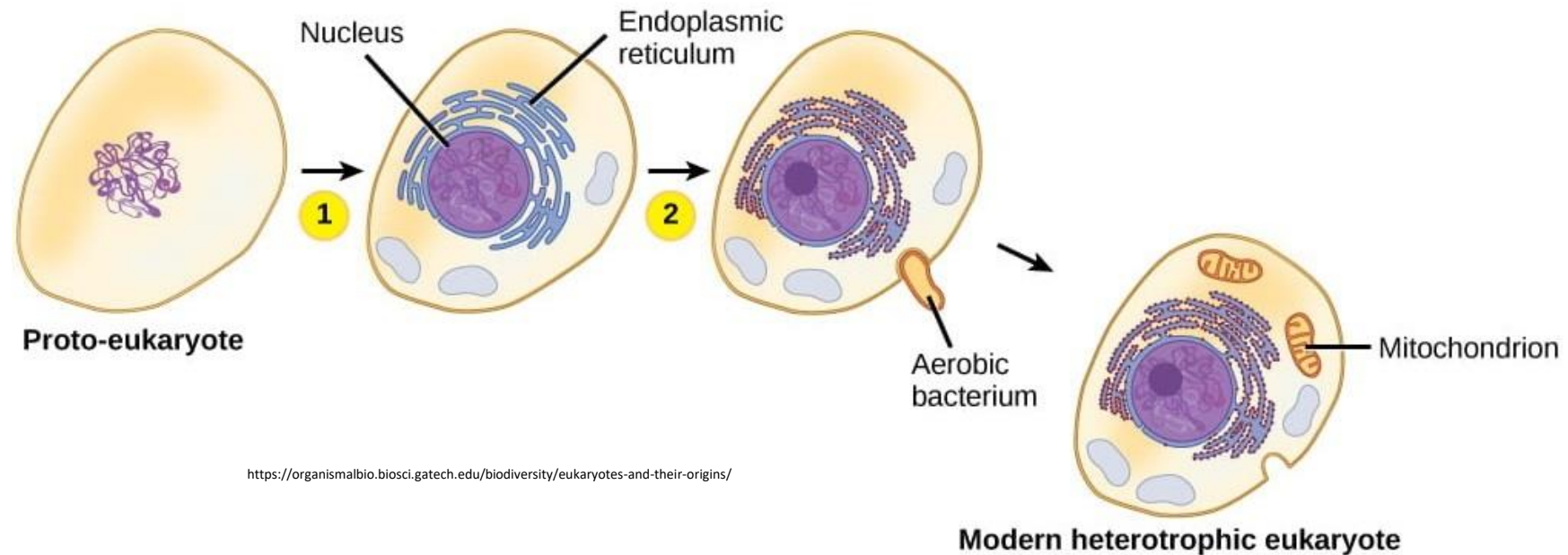
Vznik jaderných buněk – **doklad o jedné z nejstarších (a „osudových“) symbióz**  
**Endosymbiotická teorie vzniku jaderných organizmů (eukaryot)**

**Větší anaerobní archaea byla „obydlena“ aerobní bakterií**

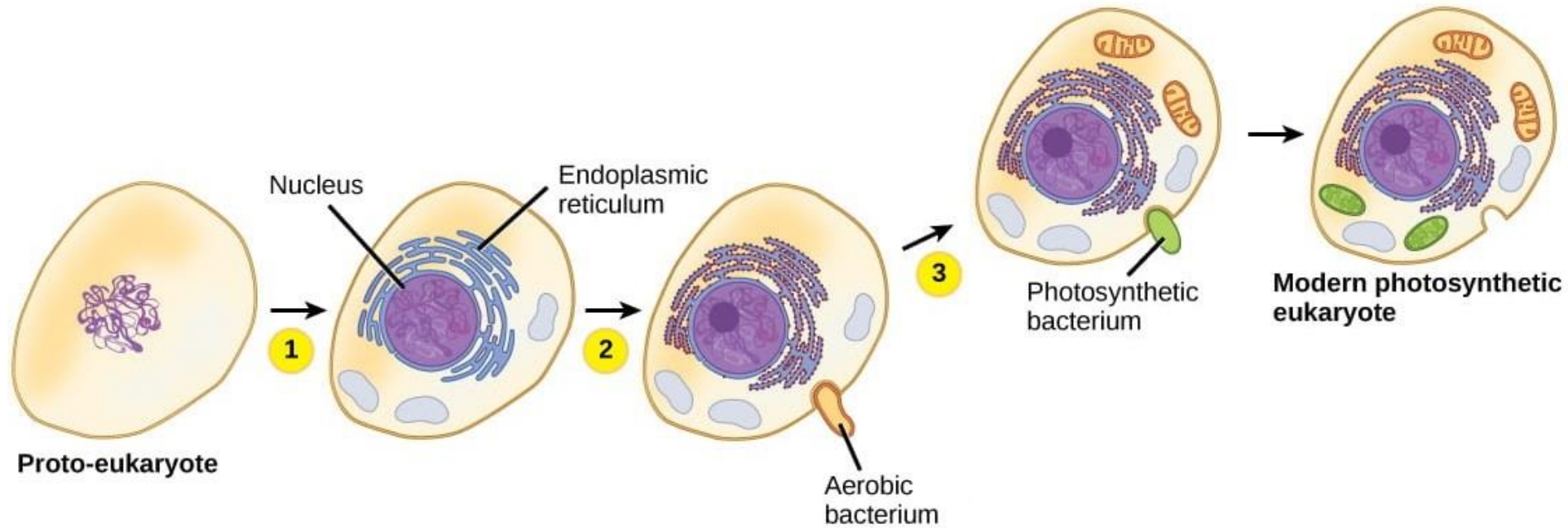
- pohlčená bakterie „detoxikuje“ prostředí hostitelské buňky od kyslíku a využívá ho k uvolnění energie uložené v živinách
- hostitelská archaea bakteriální buňce dodává organické živiny a chrání ji před okolními vlivy (např. predátory)

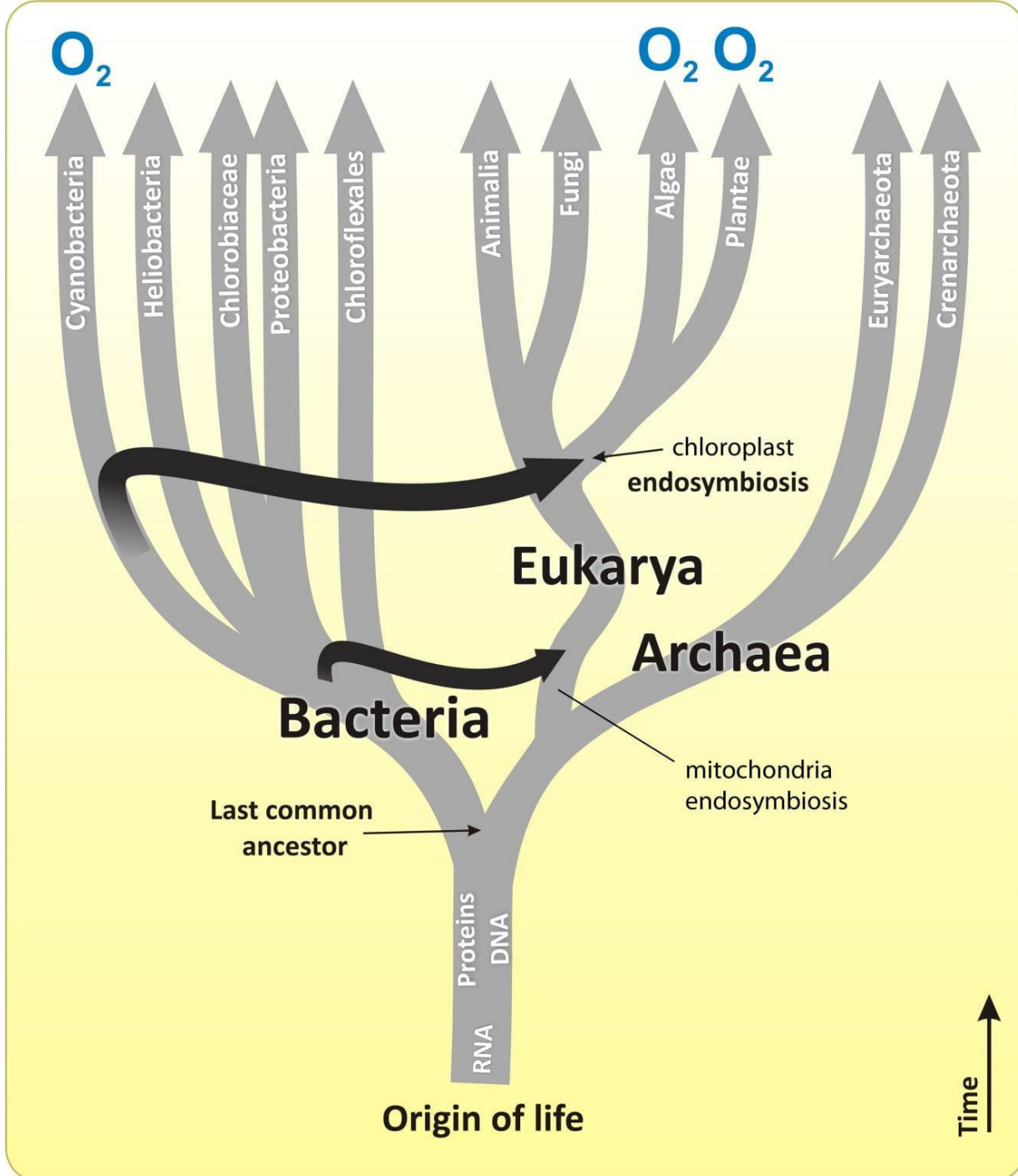
- během mnoha generací se mezi nimi vyvinul **symbiotický vztah** tak dokonale, že buňky nemohly přežít sami

- potomci této pohlčené buňky jsou dnes přítomni ve všech eukaryotických buňkách jako organely **mitochondrie**



- Později během proterozoika došlo k pohlcení další bakterie – **fotosyntetizující sinice**
  - sinice získaly ochranu a hostitelská buňka „elektrárnu“ (zdroj energie z fotosyntézy)
  - během prohlubování symbiózy ze sinic vznikly organely **chloroplasty**





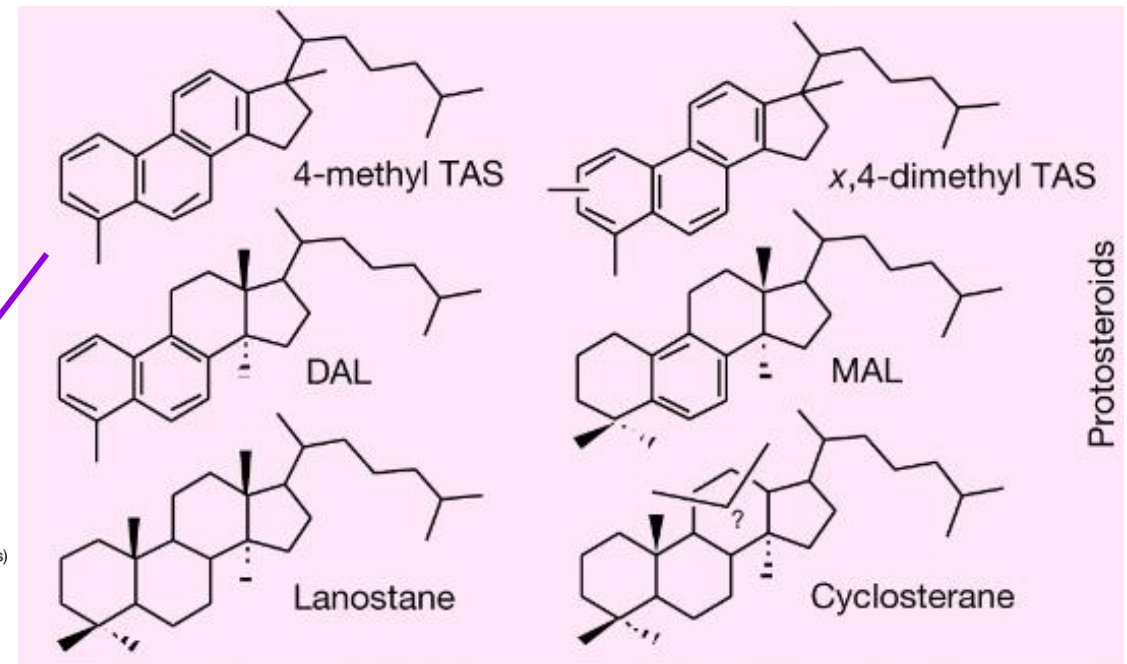
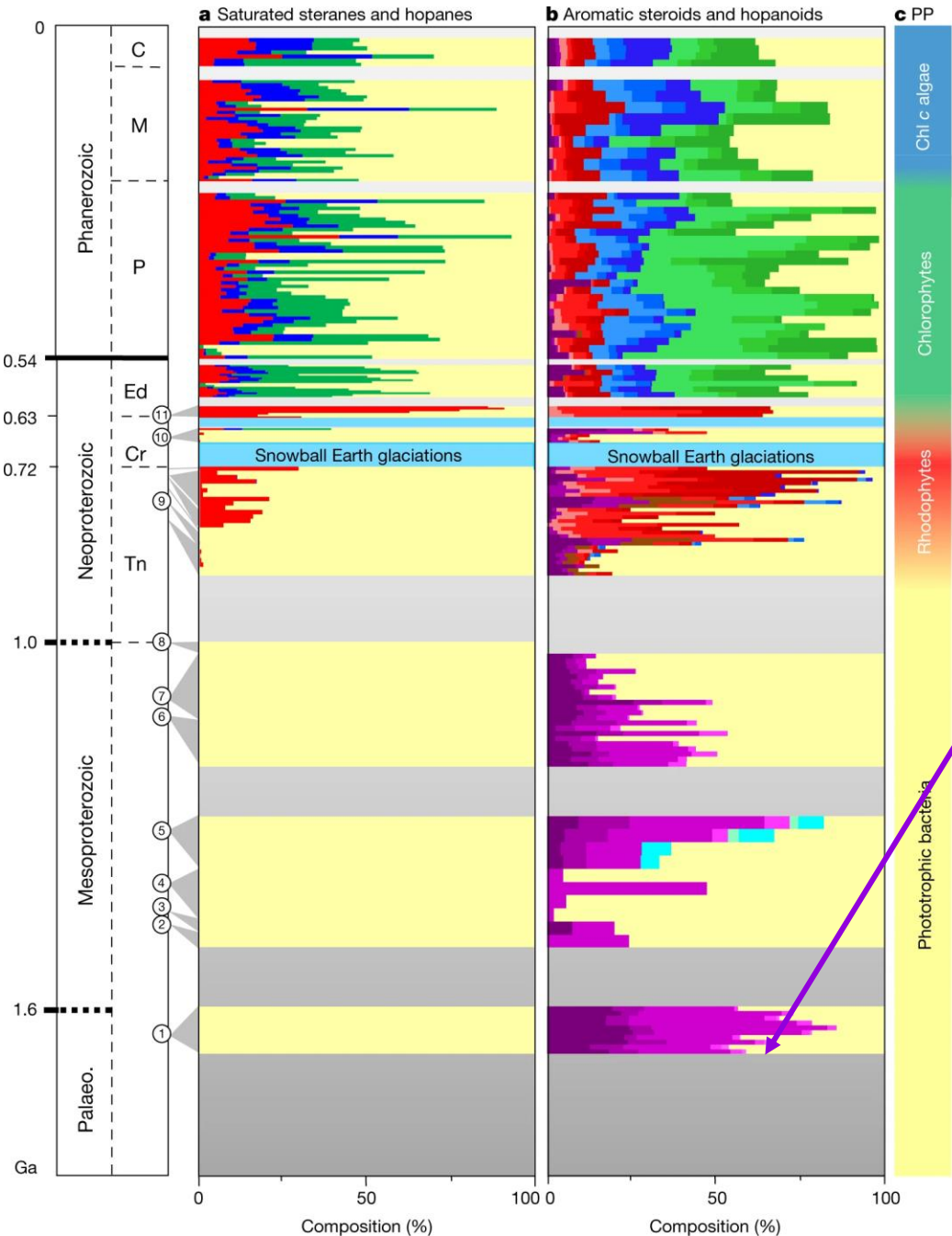
## Rozdělení hlavních větví stromu života

- Zmíněné vztahy dokládají zásadní evoluční momenty ve vývoji vyšších organismů
- **nejprve vznikla evoluční linie všech eukaryot mající mitochondrie**
- v ní společný předek všech živočichů, hub, rostlin a řas
- **druhá symbiotická událost vedla k oddělení evoluční větve jaderných buněk schopných fotosyntézy**
- řas a rostlin

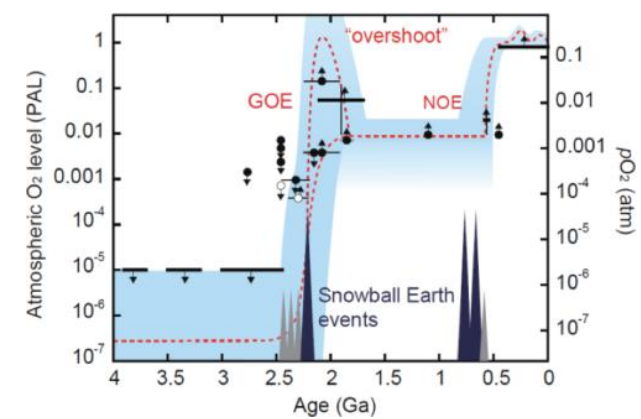
Většina moderních eukaryot potřebuje minimální koncentraci molekulárního kyslíku k syntéze svých sterolových membrán.

# Doklady nástupu prvních jaderných organizmů

- chemofosilie - protosteroidy (nejstarší 1,8 miliardy let)
- vytvářejí je fototrofní bakterie a primitivní eukaryota



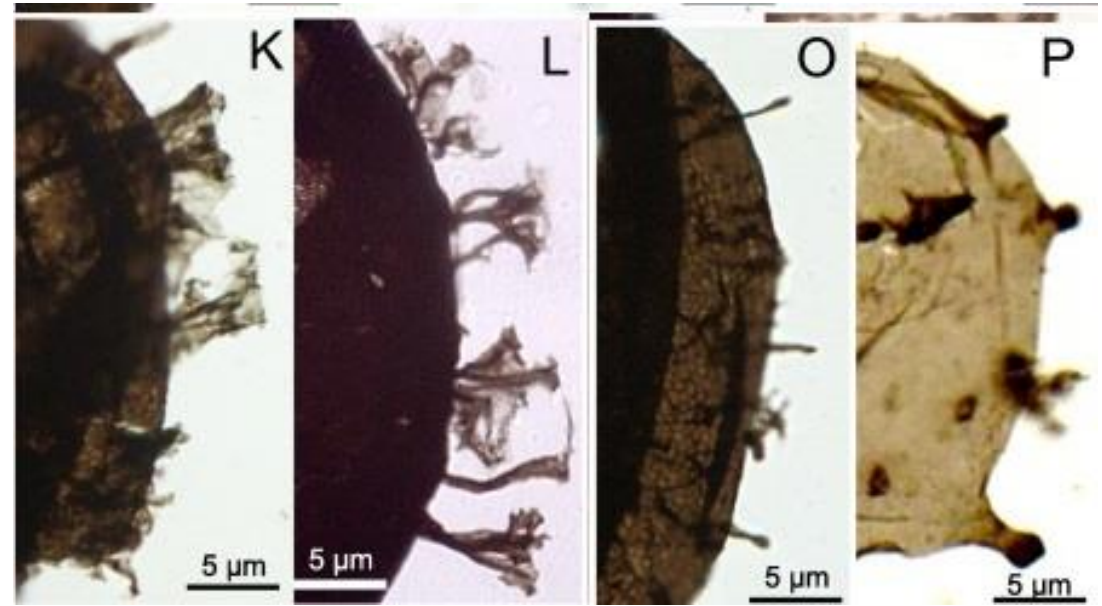
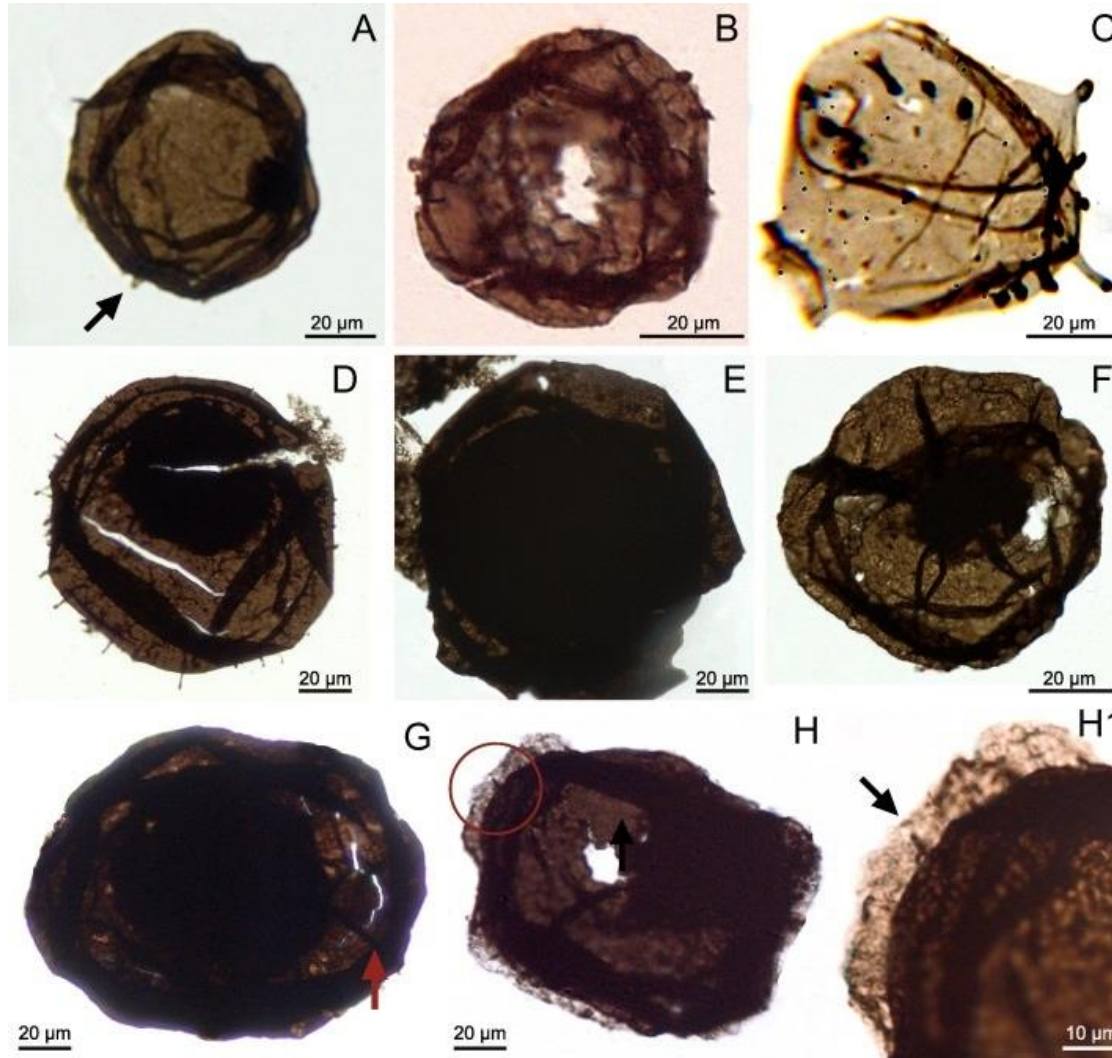
<https://www.nature.com/articles/s41586-023-06170-w>





# Doklady nástupu prvních jaderných organizmů

- Mikrofosilie tvořené organickou stěnou, primitivní jaderné organizmy, (1,65 Ga)
- umělá skupina akritarcha (nejisté systematické postavení v rámci primitivních eukaryot, „řasy“)
  - běžně interpretována jako plankton



<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adk3208>

**Plankton** – většinou mikroorganizmy pasivně se vznášející ve vodě

## Co jsme se dnes naučili?

- nejstarší období vývoje Země je "prekambrium" (zaujímá 4 z 4,54 miliard let existence Země)
- rozděleno na období (eony) hadaikum, archaikum a proterozoikum
- vznik Země, atmosféry a hydrosféry v hadaiku
- složení atmosféry se raznatně měnilo od hadaika, přes archaikum do proterozoika
- velká kyslíková katastrofa v proterozoiku - nárůst kyslíku v atmosféře díky fotosyntéze  
- vyvolal pravděpodobně největší vymírání druhů (anaerobních), způsobené samotným životem (sinicemi)
- vymírání anaerobních ekosystémů
- vznik jaderných organizmů symbiozou anaerobní bakterie a aerobní archeobakteria (endosymbiotická teorie)
- hypotéza "Země jako sněhová koule" - extrémní doby ledové - jedny z prvních drastických klimatických změn, způsobené životem
- vznik mnohobuněčných organizmů - další symbiotické události, hnané změnami klimatu