Co je biofyzika?

- Termín biofyzika se začal objevovat počátkem 20. století, ale už dávno předtím byla provedena řada studií na pomezí biologie a fyziky

- Definice biofyziky

Biofyzika je mezioborová disciplína (hraniční obor) zkoumající biologické objekty a problémy fyzikálními metodami (*Wikipedie – česká)*

Co je fyzikální metoda? (elektroforéza vs NMR)

Lékařská biofyzika - účinky fyzikálních faktorů (např. elektromagnetické záření) na živou hmotu.

Alternativní „definice“ ☺:

Biofyzika je to, co dělají biofyzici.
Biofyzika je to, co se publikuje v biofyzikálních časopisech.

Co je biofyzika?

- **Biofyzika je věda, ve které se biologické objekty studují z fyzikálního hlediska** (tj. se snahou o exaktní fyzikálně-chemický popis biologických systémů a dějů)
- **Biophysics is an interdisciplinary science that applies <u>approaches</u> and methods traditionally used in physics to study biological <u>phenomena</u>.** *(Wikipedie – angl., Biophysical Society*)

- zahrnuje poznatky poznatky z matematiky, fyziky, chemie, biologie, genetiky, fyziologie, medicíny ...

https://www.biophysics.org/Portals/0/BPSAssets/Brochures/Documents/WhatisBiophysics.pdf

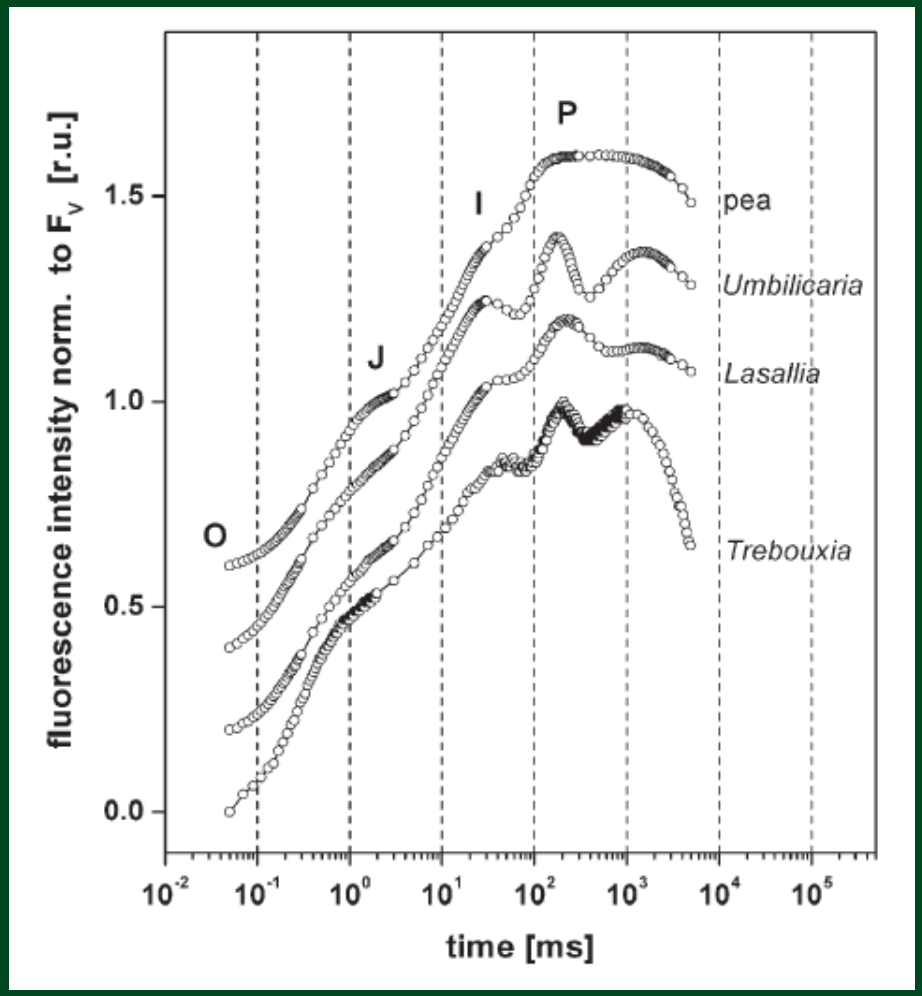
- Rozdíl mezi biologií a biofyzikou:

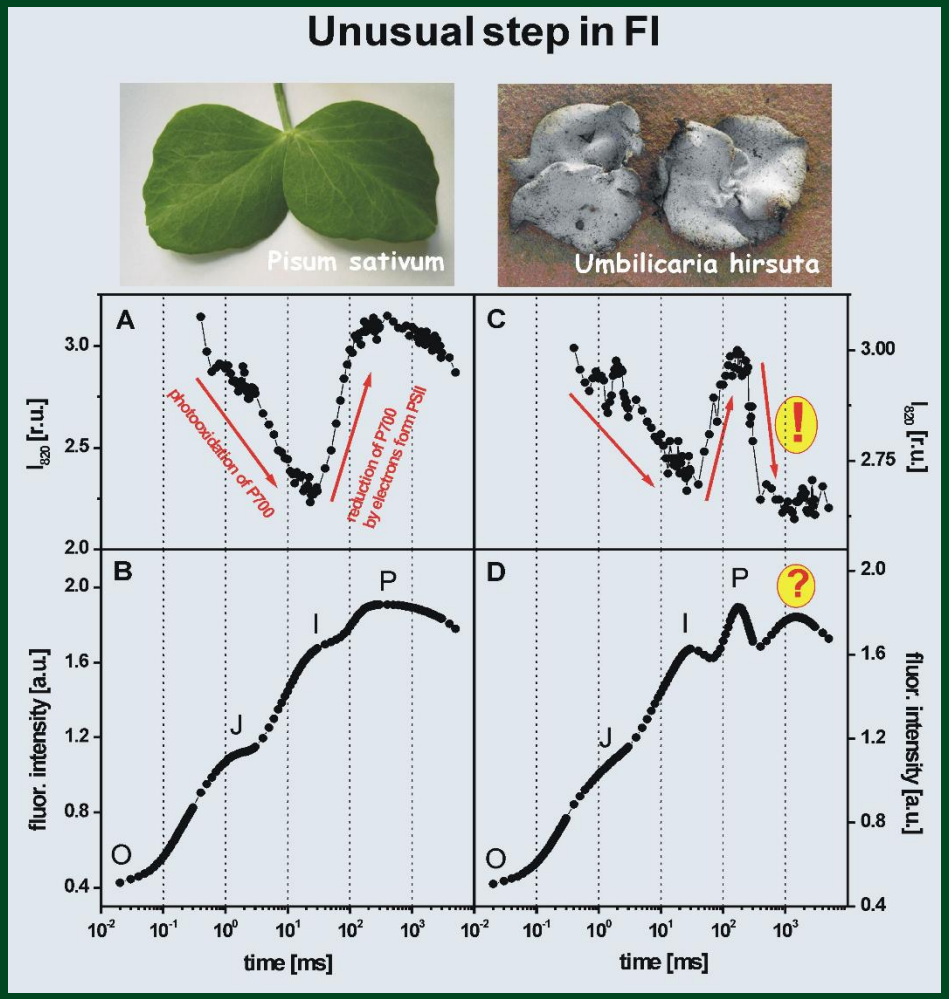
biologie: porozumět tomu **JAK** biologické děje probíhají.

biofyzika: porozumět tomu **PROČ** biologické děje probíhají tak, jak probíhají

Příklad z našeho pracoviště (KBF):

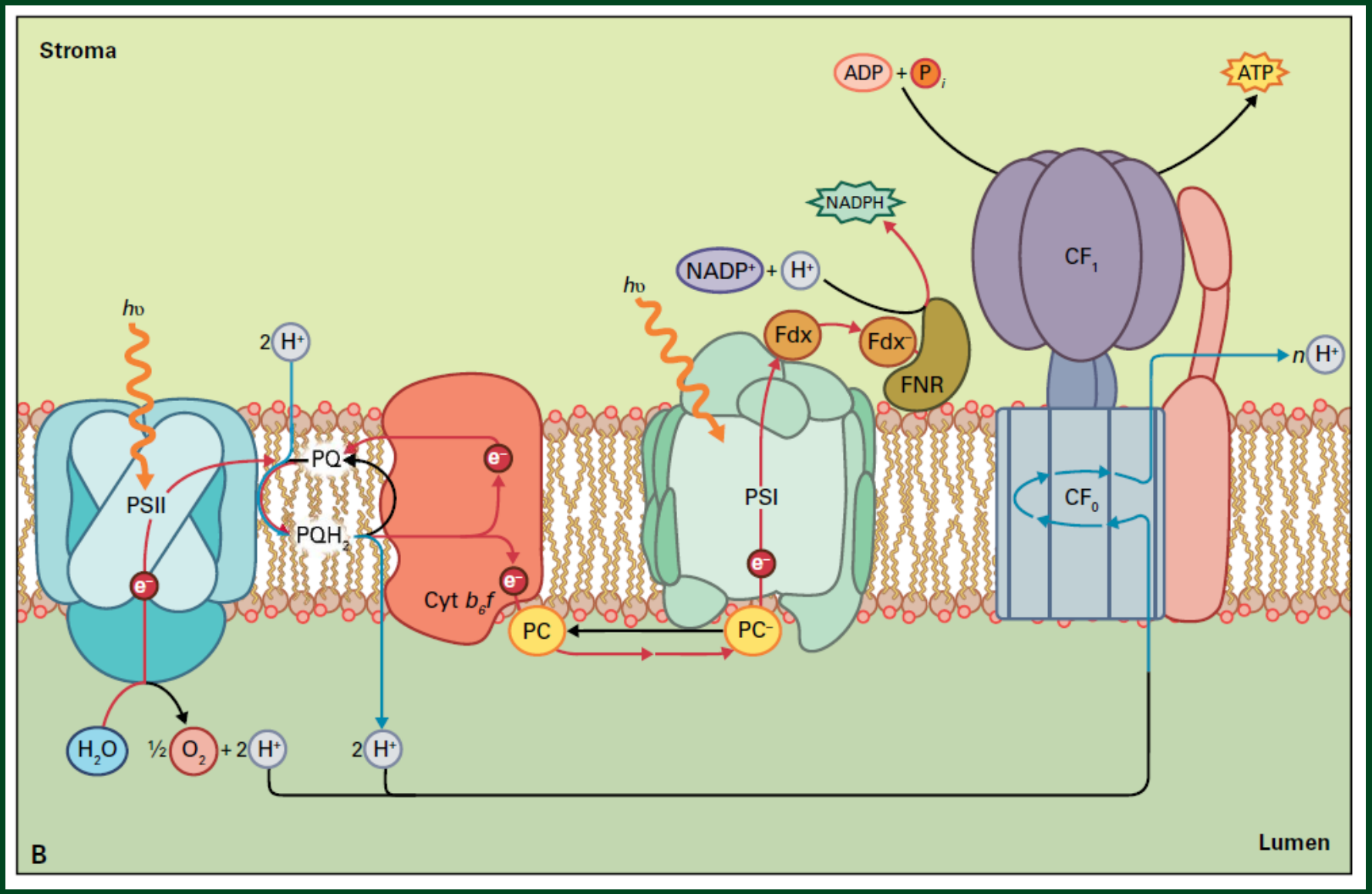
Biofyzikální projekt - KBF





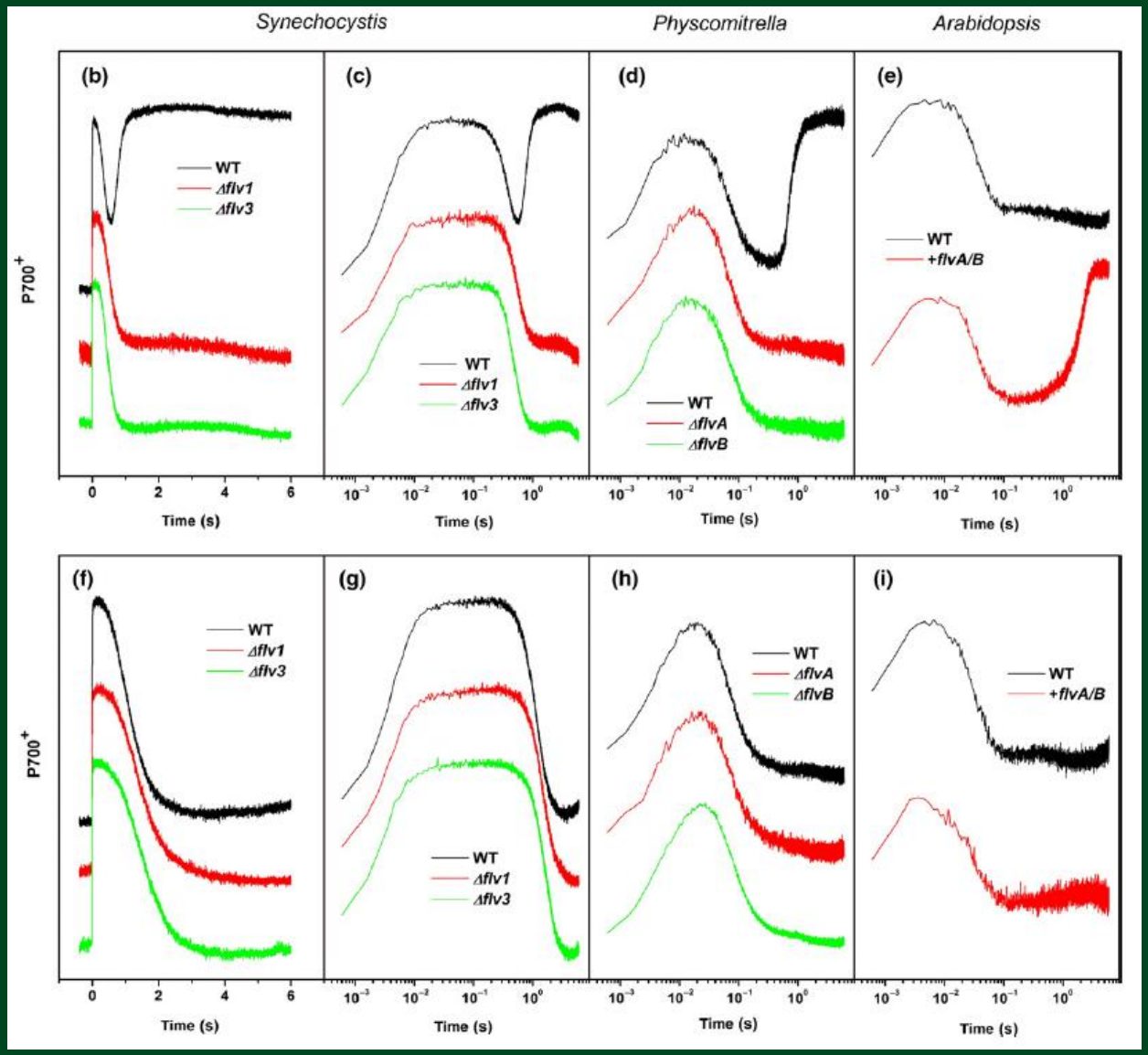
Ilík et al. 2006 Biochim. Biophys. Acta 1757, 12-20.

Green plants: linear electron transport



Buchanan et al. (2015) Biochemistry and Molecular Biology of Plants, John Wiley and Sons, Chichester, UK

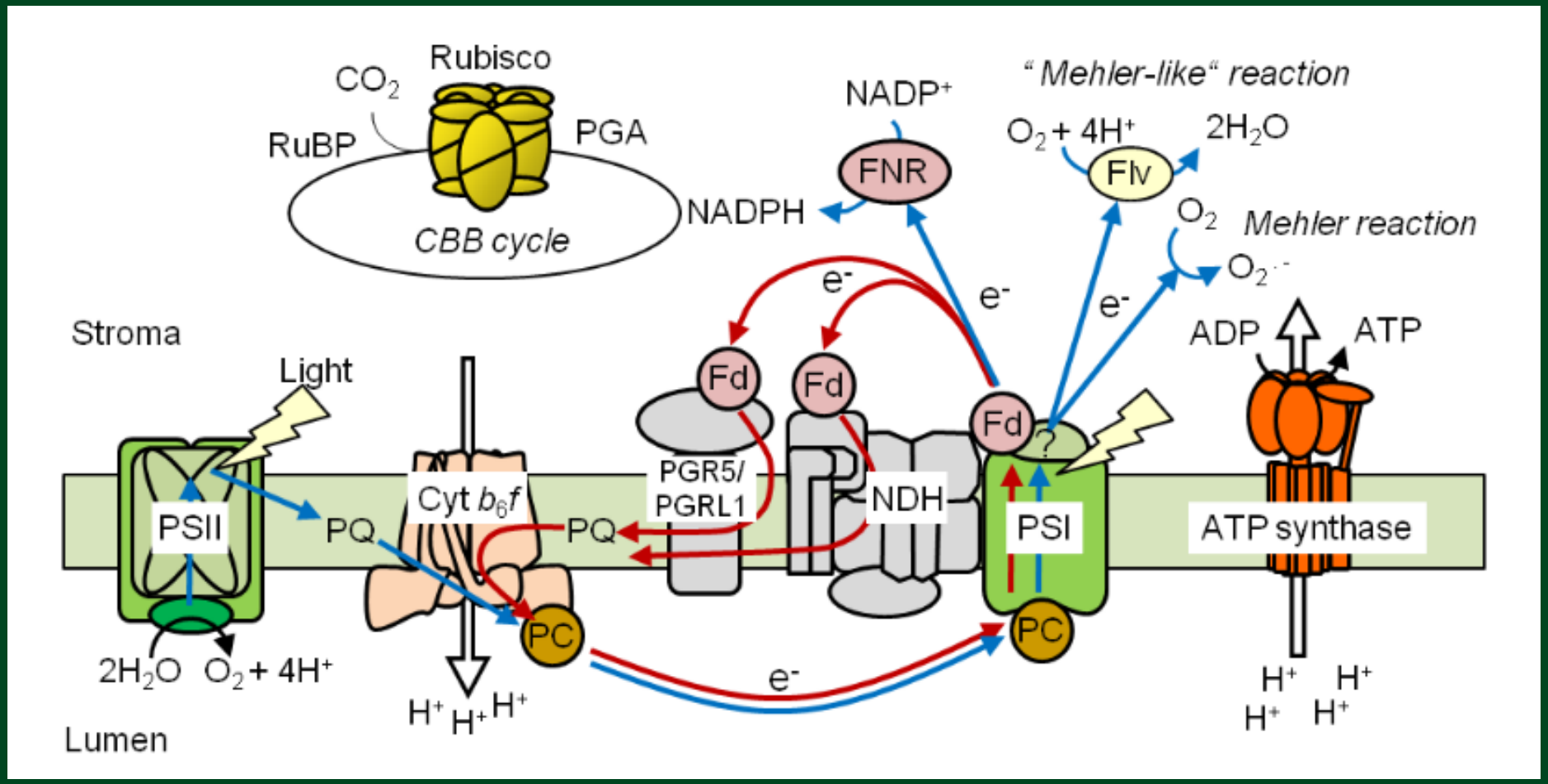
Flv-dependent electron transport



Ilík et al. 2018 New Phytol. 2017, 967-972

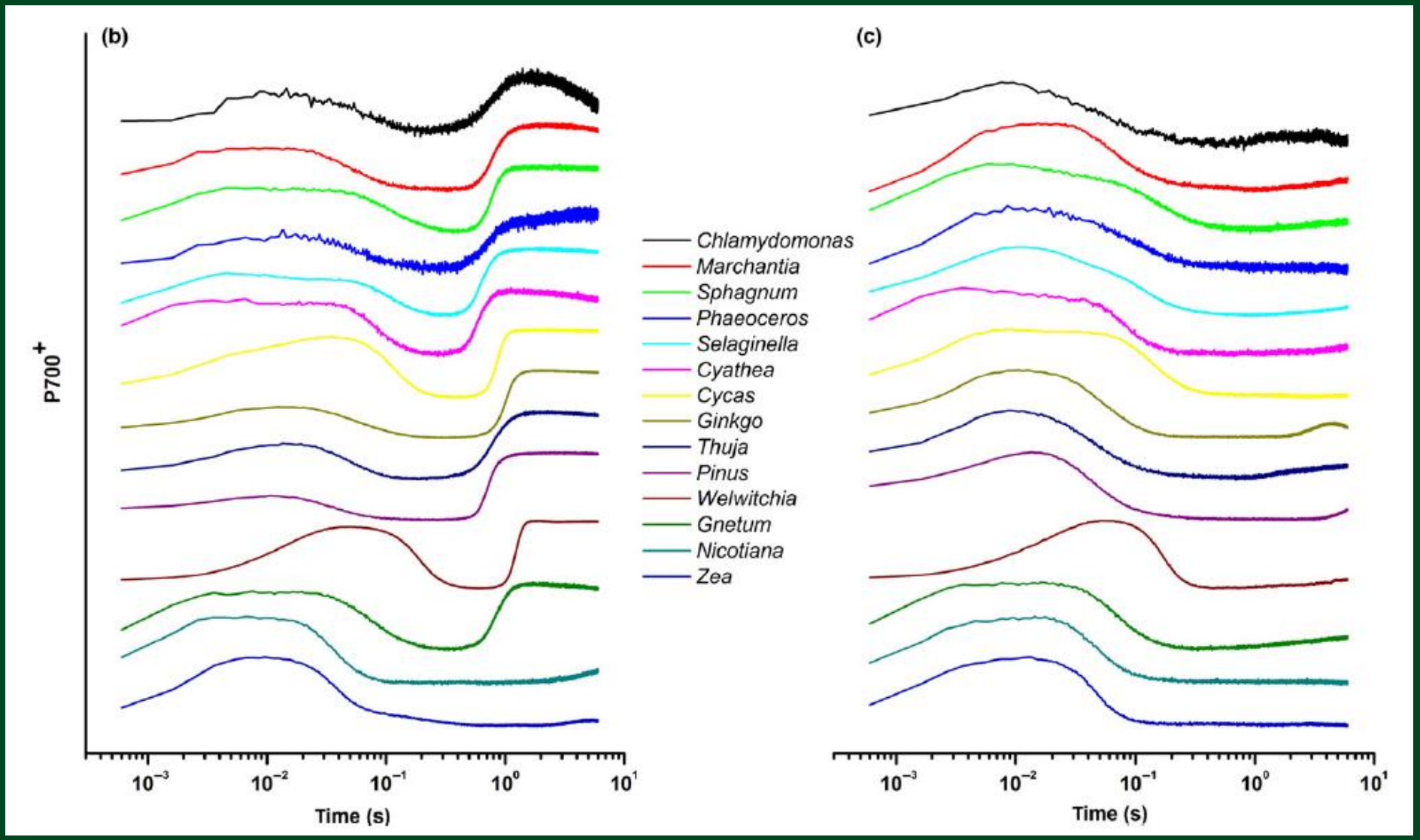
Green plants: electron transport pathways

- **Green plants (řasy, nižší a vyšší rostliny)**



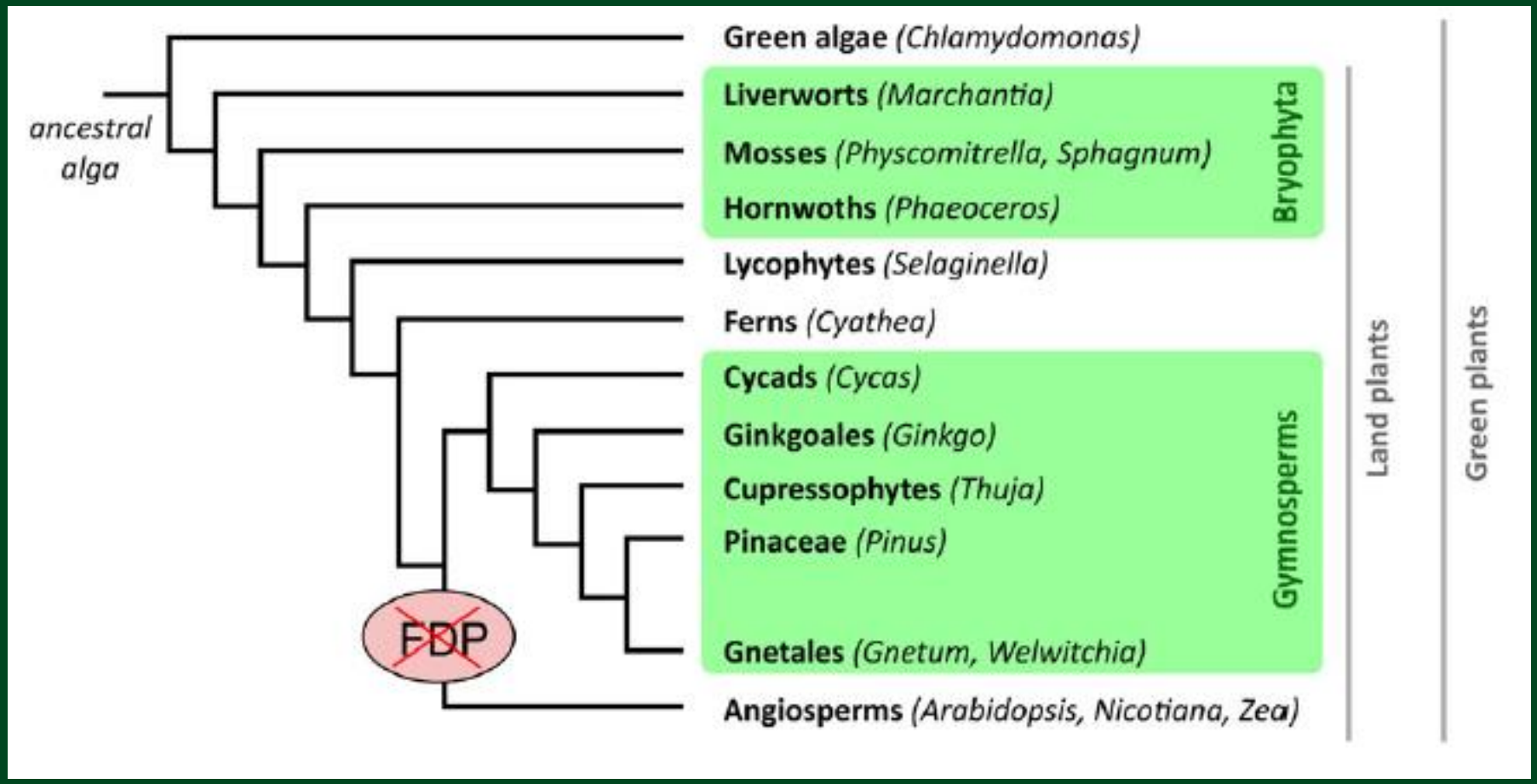
Ilík et al. 2017 New Phytol. 2017, 967-972

Flv-dependent electron transport



Ilík et al. 2018 New Phytol. 2017, 967-972

Flv-dependent electron transport



Ilík et al. 2018 New Phytol. 2017, 967-972

Biofyzika

Sylabus:

1. Vznik a vývoj života (prof. Petr Ilík)
2. Biotermodynamika a synergetika (prof. Jan Nauš)
3. Systémová biologie (prof. Dušan Lazár)
4. Luminiscence (živých systémů) (dr. Marek Rác)
5. Mikrosvět živých systémů očima mikroskopie (dr. Roman Kouřil)
6. Rostliny a světlo (doc. Martina Špundová)
7. Robot zahradníkem (dr. Marek Rác)
8. Molekulární biofyzika versus farmakologie (prof. Jana Kašpárková/prof. Viktor Brabec/dr. Jitka Prachařová)
9. Šíření elektrických signálů v živých systémech (doc. Andrej Pavlovič)
10. Mechanismus tvorby a ovládání zvuku u savců a ptáků (doc. Jan Švec)
11. Fraktály v biologii (prof. Jan Nauš)
12. Biopole (doc. Pavel Pospíšil)
13. Kvantová biologie (prof. Petr Ilík)

Požadavky: zápočet za účast na výuce (omluva 2 absence), zkouška - test

Co je život?

Definice života

Erwin Schrödinger – fyzik (nestudoval biologii) - nejznámější kniha o podstatě života: "What is life" (1944, nestudoval biologii, pohled fyzika):

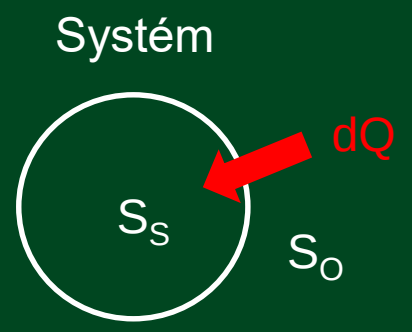
- „živá hmota se vyhýbá rozkladu do rovnováhy“ a dělá to prostřednictvím metabolismu (výměna energie a materiálu), život se „živí negativní entropií“, tedy extrakcí „pořádku“ z prostředí,
- „negativní entropie“ – živá hmota snižuje svou entropii (neuspořádanost) na úkor entropie okolí
- „Každý proces, událost, dění, které se děje v přírodě, znamená zvýšení entropie části světa, kde se to děje. Tedy živý organismus neustále zvyšuje jeho entropii."

Tento pohled byl po desetiletí nejvlivnější ze všech, pokud jde o definici života.

Nakladatelství Vitium 2019

Ward, Kirschvink: A New History of Life: The Radical New Discoveries about the Origins and Evolution of Life on Earth. Bloomsbury Press 2015

Gibbsova energie – veličina k popisu růstu entropie systému (i živého) s okolím

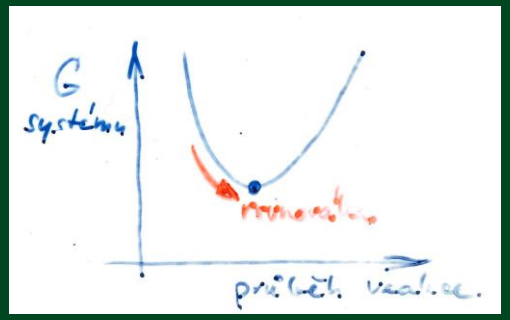


Při příjmu tepla dQ (p, T = konst.) z okolí se zvýší entropie systému s okolím (S_S+S_O) (u všech procesů entropie roste a v rovnováze je maximální, v rovnováze je d(S_S+S_O)=0), $dQ_S = - dQ_O$

podle 2. věty termodynamiky dS≥dQ/T
podle 1. věty termodynamiky dQ=dU+pdV

V rovnováze:
d(S_S+S_O)= dS_S+dS_O=dS_S - (dU_S+pdV)/T = 0 (rovnici vynásobíme -T)

<u>dU_S+pdV-TdS_S</u>=0 (výraz vlevo představuje funkci systému (derivaci této funkce), která odpovídá změně entropie systému s okolím v rovnováze, derivace = 0)



Gibbsova energie G = U+pV-TS (J.W. Gibbs, 1875) a tedy
dG = dU+pdV+Vdp-TdS-SdT
<u>dG = dU+pdV-TdS</u> pro izobaricko-izotermický děj (p,T = konst.)
dG =0 v rovnováze
dQ < 0 mimo rovnováhu (protože dS ≥ dQ/T, tj. TdS ≥ dU+pdV tj. 0 ≥ dU+pdV-TdS)

Co je život?

Později pochyby (i mezi fyziky)
Motor auta v chodu – živý?

Bělousova - Žabotinského reakce (oscilace entropie, systém daleko od rovnováhy blízko stacionárním stavu)
https://www.youtube.com/watch?v=PpyKSRo8Iec

Paul Davies (fyzik) – nelze se na život dívat jako na stroj na výrobu entropie, procesy („actions“) definují život - metabolismus, organizace, reprodukce, evoluce …

Údaj z Wikipedie – existuje přes 100 definic života

Jednoduchá definice života podle NASA z roku 1994 (Carl Segan):

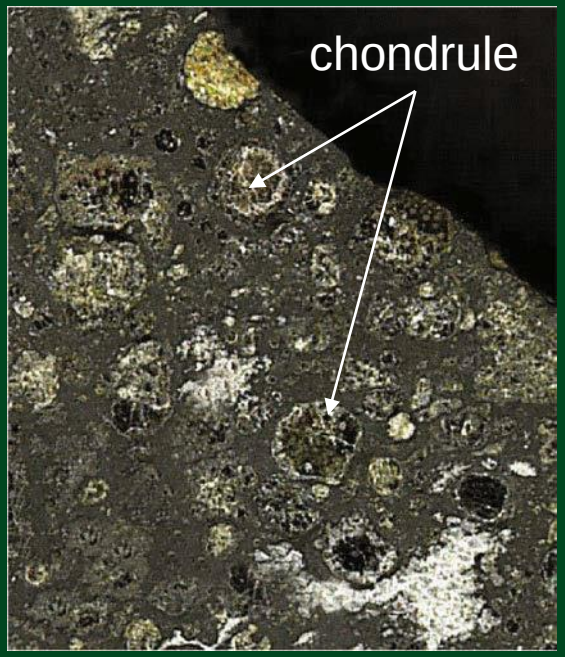
- život je chemický systém, který je schopen Darwinovy evoluce

(tj. počítačové systémy nejsou povazovány za živé, diskuse např. *Benner 2010 Astrobiology 10, 1021-30* - rozdíl mezi „life“ a „be alive“, termín Darwinova evoluce)

Ward, Kirschvink: A New History of Life: The Radical New Discoveries about the Origins and Evolution of Life on Earth. Bloomsbury Press 2015

Vznik Slunce a planet

Stáří: hvězda (spíš sluneční soustava – viz níže) - 4,57 miliardy let
Místo narození: v mlhovině podobné mlhovině v souhvězdí Orion
Otec: v současnosti už „ztracený“ oblak
Matka: univerzální gravitace
Doba těhotenství: deset tisíc let
Dětství: velmi bouřlivé, s vyvrhováním materiálu a četnými po sobě jdoucími erupcemi
Potomci: planety ve Sluneční soustavě (obří planety za několik milionů let; terestrické planety, včetně Země, za několik desítek milionů let).



Stáří Slunce (Sluneční soustavy) určeno podle metody datování (detekce produktu radioaktivního rozpadu rubidia) nejprimitivnějších meteoritů (tzv. uhlíkatých chondritů). Stáří chondrul z meteoritů, které spadly v roce 1968 nedaleko vesnice Allende v Mexiku (úhrnná hmotnost 250 tun) - 4,5685 miliardy let (Ga) ± 0,5 milionu let (Ma) (analýza chondrul, které vznikly při zrodu Slunce). Podle konvence se toto stáří považuje i za stáří Sluneční soustavy (tedy i Země).

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Datování stáří Slunce (Sl. soustavy, Země)

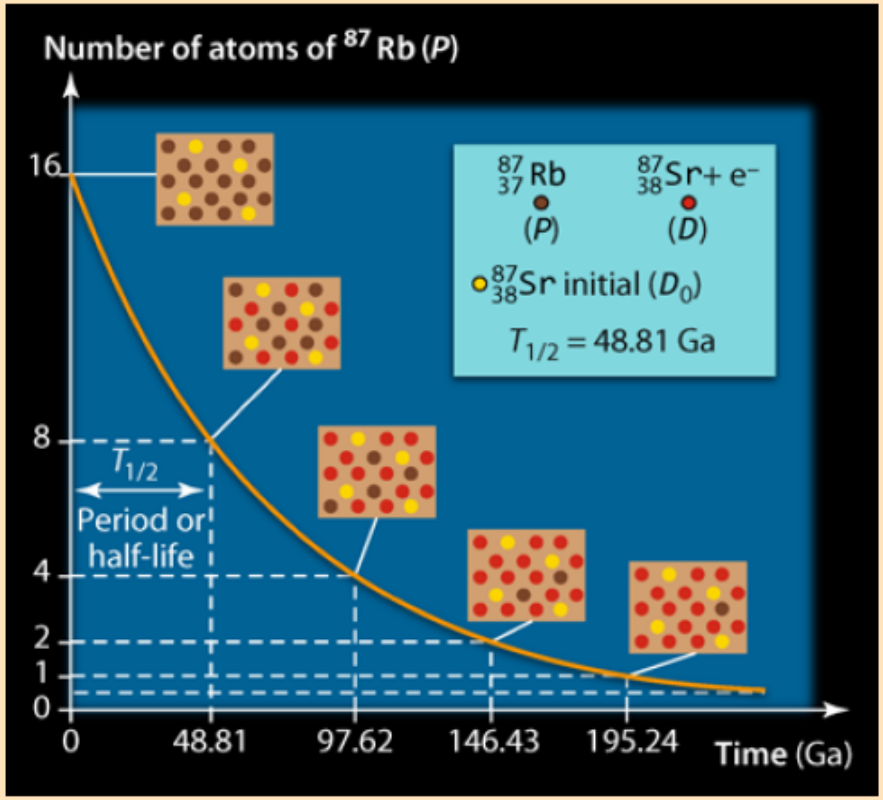


Fig. 2.4 Diagram showing the evolution of the number of parent atoms ($^{87}_{37}$Rb; maroon circles) and daughter atoms ($^{87}_{38}$Sr; red circles) *versus* time. The daughter atoms derived from the decay of $^{87}_{37}$Rb. The yellow circles represent atoms of $^{87}_{38}$Sr initially present in the system (at time t_0). As these atoms were stable, their number remains constant over the course of time. The number of parent atoms decreases in accordance with an exponential law: $P = P_0 e^{-\lambda t}$.

Rubidium-stronciové datování:

- založeno na radioaktivní rozpadu izotopu rubidia s poločasem **48,81 mld let**: $^{87}_{37}\mathrm{Rb} \longrightarrow {}^{87}_{38}\mathrm{Sr} + e^-$
- 1 neutron se rozpadne na proton a e^-
- Komplikací však je, že minerály mohou obsahovat i určitá množství přírodního ^{87}Sr neradiogenního původu.
- Je proto třeba korekce. K tomu se využívá stanovení dalšího isotopu stroncia ^{86}Sr (pomocí hmotnostní spektrometrie). Na základě známého poměru ^{87}Sr /^{86}Sr neradiogenních isotopů v přírodním stronciu (v minerálech, které neobsahují rubidium) lze pak od zjištěného obsahu ^{87}Sr odečíst obsah neradiogenního ^{87}Sr.

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Mlhovina v Orionu osvětlená zářící hvězdokupou "Trapezium", která se skládá z masivních hvězd (viditelná uprostřed obrázku).
Právě v mlhovině tohoto typu, uvnitř hvězdné asociace, se pravděpodobně zrodilo Slunce.

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

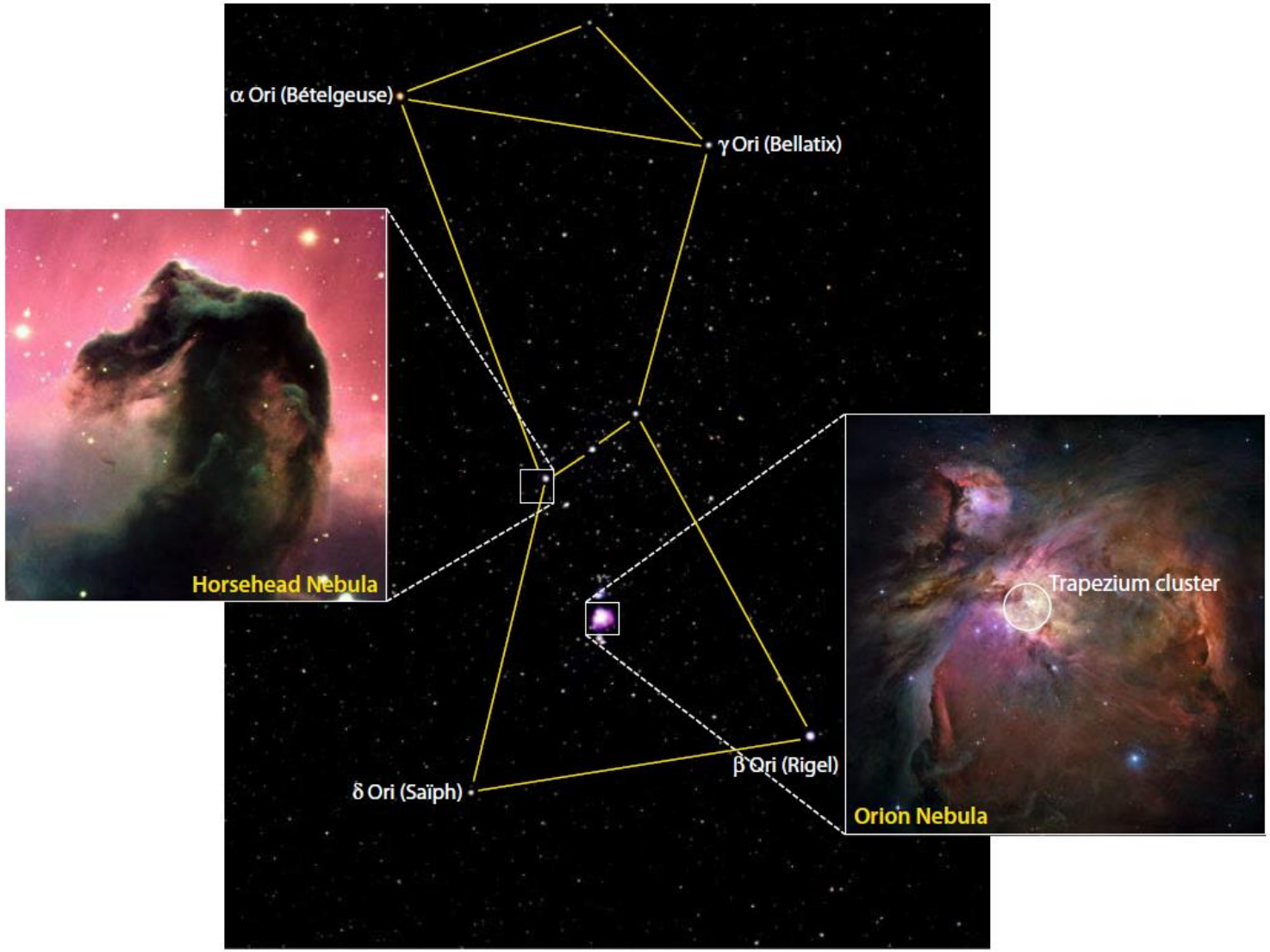
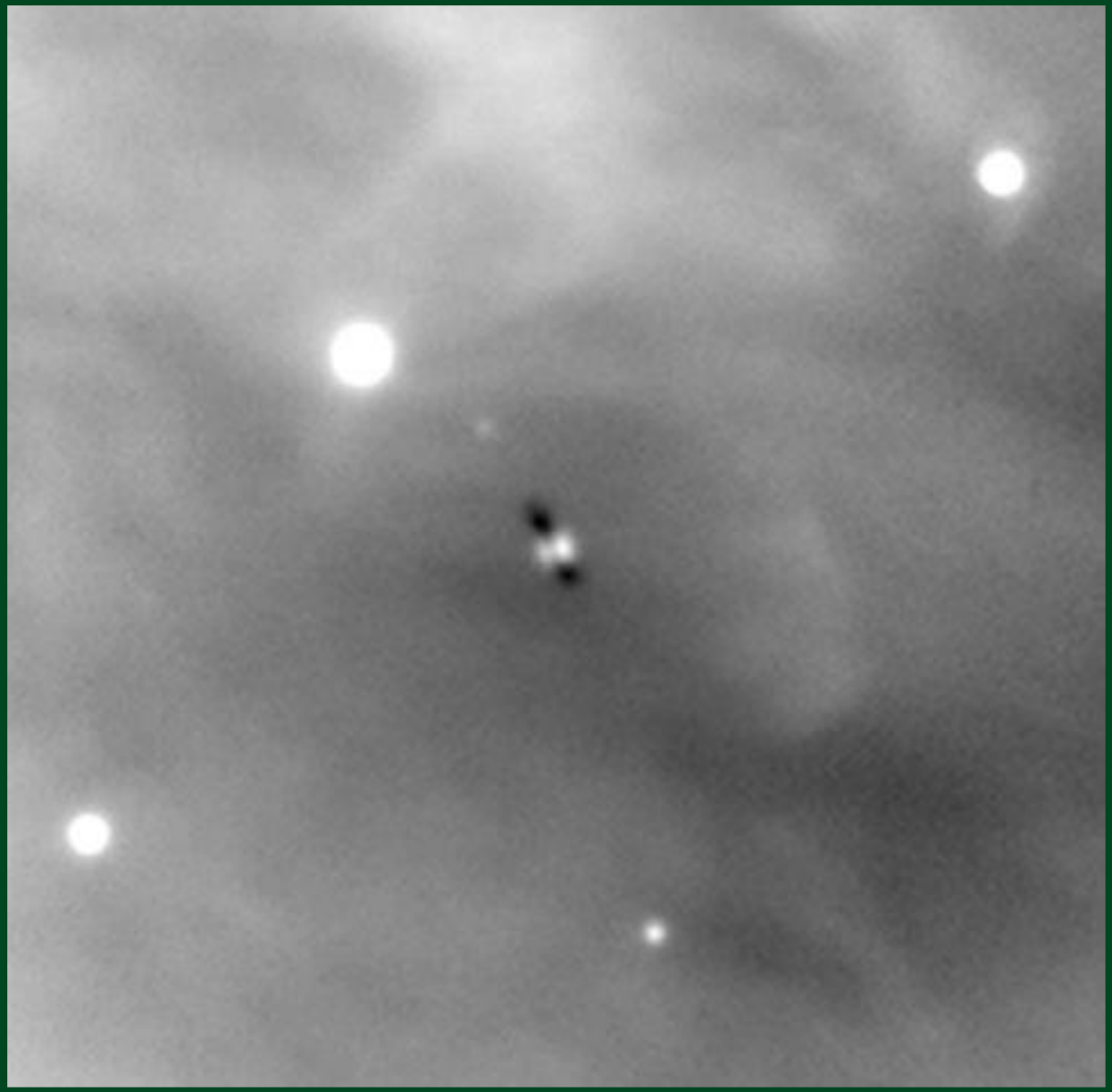


Fig. 1.1 The constellation of Orion and the Orion Nebula as observed with a small telescope. Inset: the Horsehead Nebula and the Orion Nebula as observed by the *Very Large Telescope* (ESO, Chile) and by the *Hubble Space Telescope* (NASA/ESA). Like all bright nebulae, the Orion Nebula is genuine nursery for stars, where numerous bodies are forming from surrounding clouds of gas and dust (molecular clouds). Close to bright nebulae, these clouds are illuminated by the intense light from stars. In the Horsehead Nebula, the silhouette of a horse corresponds to a molecular cloud seen like a shadow puppet: it masks the light from a bright nebula lying in the background.

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012



Cirkumstelární disk v mlhovině v Orionu.

Většina hvězd v této mlhovině jsou hvězdy o nízkých hmotnostech obklopené tmavými disky, které se podobně jako „oblaky“ skládají z plynu a prachových zrn. Jedná se o "cirkumstelární disky", jejichž poloměry jsou několikanásobně větší než poloměry Sluneční soustavy. Astrofyzici jsou dnes přesvědčeni, že takové struktury dávají vzniknout planetám.

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Vznik Slunce a planet

- Mezihvězdná oblaka: molekulární vodík (H_2) a nepatrné množství složitějších molekul, většinou na bázi uhlíku + hvězdný prach (prachová zrna – porézní protáhlá, ~0,01 μm a 10 μm jako v cigaretovém kouři, jádra z uhlíku, obklopeného křemičitany, led, CO, organické látky až 50 atomů uhlíku a další).

- Působením gravitace v oblacích dochází ke kolapsu plynu a prachu, čímž vznikají "sdružení" statisíců hvězd v časovém rozpětí pouhých několika set tisíc až několika milionů let. Nejhmotnější z nich mohou dosahovat až stonásobku hmotnosti Slunce, zatímco ty nejméně hmotné klesají až na desetinu hmotnosti Slunce, nebo dokonce ještě méně (jako je tomu u hnědých trpaslíků, hvězd, u nichž termonukleární reakce nikdy neproběhne).

- Trvalo jen asi deset tisíc let, než se „protoslunce“ začalo vyvíjet z mračna. Později, za několik milionů let (ne více než deset!), se postupnou aglomerací prachových zrn a současně koncentrací plynu na několika místech disku zrodily obří planety (Jupiter, Saturn, Uran a Neptun) a meteority (což jsou úlomky vzniklé při neustálých srážkách malých protoplanetárních těles ve vznikající Sluneční soustavě). Nakonec, mnohem pomaleji, přišly na řadu kamenné planety (Merkur, Venuše, Mars, Země), které se zformovali ze zbývajícího materiálu.

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

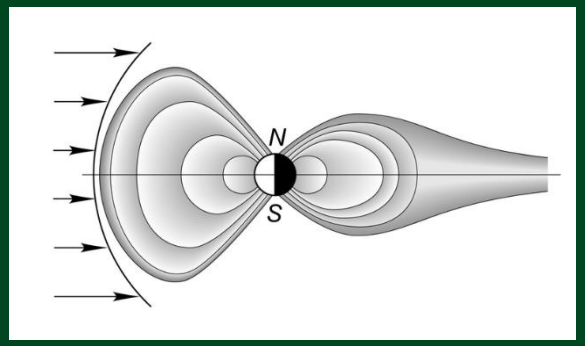
Formování planety Země

- Vznik Měsíce - pravděpodobně výsledkem gigantického nárazu mezi Zemí a tělesem o velikosti Marsu

- Vlivem gravitace došlo k rozžhavení materiálu planety Země - oddělení pláště a jádra – tekutá kovová fáze je mnohem hustší než křemičitá, a proto ji gravitační síla přitahuje ke středu planety (žhavé kovové jádro – železo a nikl), odkud kovy jako železo v planetách? (v prachu díky výbuchům supernov, část železa i v plazmatu Slunce), roztavené křemičitany – magma.

- Vznik magnetického pole – podmínka tekuté kovové jádro. Rotace Země – proudění v jádře - vyvolávají elektrické proudy, které vytvářejí magnetické pole (soběstačné geodynamo - magnetické pole samo o sobě vytváří indukované elektrické proudy, které produkují magnetické pole atd.)

- ochrana před slunečním větrem (odraz elektronů, protonů a jader helia), jinak „vymetání“ lehkých částic z atmosféry, pro živé organismy smrtelné



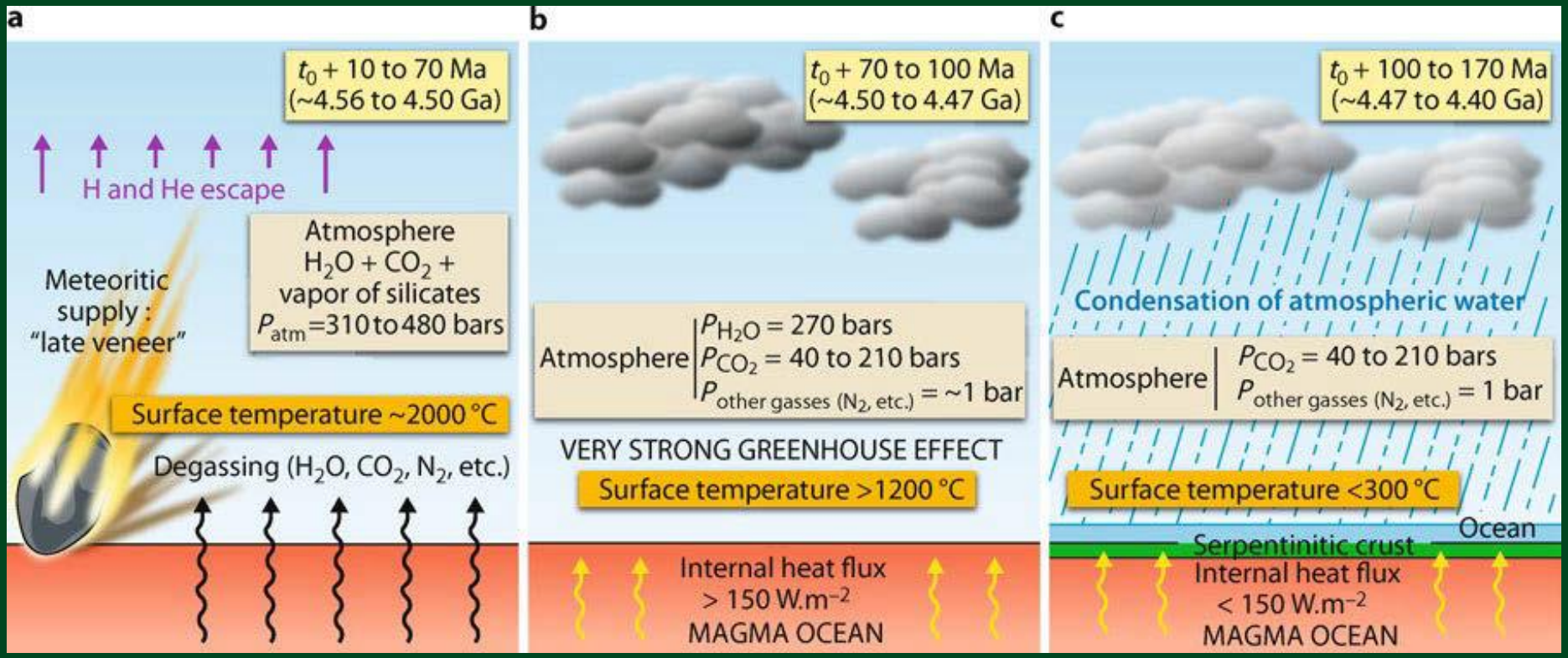
cs.wikipedia.org

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Země před 4.57 – 4.4 mld. let

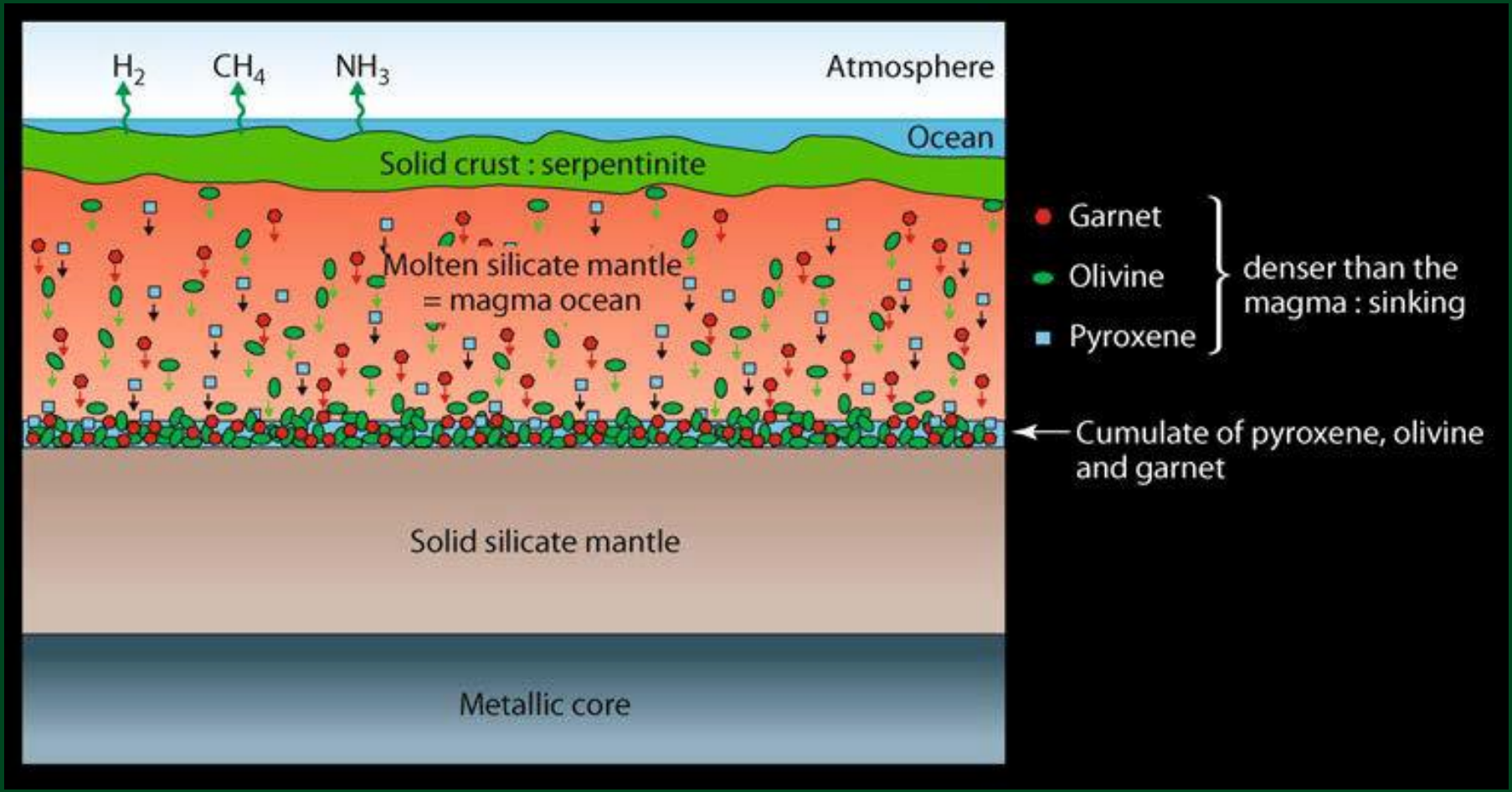
M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Země před 4.57 – 4.4 mld. let



Schematické znázornění různých epizod vývoje atmosféry a hydrosféry. A) Mezi 10 a 70 mil. let (po začátku akrece) došlo k diferenciaci kovového jádra a silikátového pláště. Ten byl z velké části roztavený a povrch Země byl pokryt oceánem roztavených křemičitanů (magmatický oceán). O prvotní atmosféru zděděnou z protosolární mlhoviny (H + He) Země přišla, ale degazace planety a příspěvek meteoritů („late veneer") přinesly na Zemi prvky nové atmosféry. b. Mezi 70 a 100 mil. let přetrvával velmi vysoký vnitřní tepelný tok (> 150 W.m^{-2}), takže ani nejvzdálenější část magmatického oceánu nemohla krystalizovat. Mohutná atmosféra vodní páry a oxidu uhličitého vytvářela intenzivní skleníkový efekt a teplota "u země" přesahovala 1200 °C. c. Mezi 100 a 170 mil. lety se tepelný tok snížil natolik, že bylo možné vytvořit pevnou kůru na povrchu magmatického oceánu. Vnější obaly Země se pak ochlazovaly mnohem rychleji a atmosférická voda mohla kondenzovat: zemský povrch pokrýval jeden nebo několik oceánů. Koncentrace atmosférického CO_2 zůstala velmi vysoká a teplota u země se snížila pod 300 °C (prakticky veškerý uhlík byl v podobě CO_2 v atmosféře).

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012



Schematický řez pozemským magmatickým oceánem. Uvolnění gravitační energie během akrece a rozpadu radioaktivních prvků stačilo k úplnému roztavení vnější oblasti zemského pláště, čímž vznikl magmatický oceán, který pokrýval celý povrch planety. Při jeho ochlazování krystalizoval olivín, pyroxeny a granát. Vzhledem k vysoké hustotě klesaly tyto krystaly na dno magmatického oceánu, kde se hromadily. Povrch magmatického oceánu se ochladil a ztuhl jako první. Při kontaktu s hydrosférou (s vodou v kapalném nebo parním stavu) se bezvodé minerály, jako je olivín a pyroxeny, změnily na hydratované minerály (mastek, serpentin). Vytvořily tak povrchovou kůru (méně hustou než podkladové magma). Serpentinizačními reakcemi se uvolnil molekulární vodík (H_2), který se mohl spojit s oxidem uhličitým (CO_2) a molekulárním dusíkem (N_2) v primitivní atmosféře za vzniku metanu (CH_4) a amoniaku (NH_3).

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Země před 4.57 – 4.4 mld. let

$$3\,Mg_2SiO_4 + SiO_2 + 4\,(H_2O) \leftrightarrow Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$$

forsterite, silica, water, serpentine (hadec)

serpentinizace

$$3\,Fe_2SiO_4 + 2\,H_2O \leftrightarrow 3\,SiO_2 + 2\,Fe_3O_4 + 2\,H_2$$

fayalite, water, silica, magnetite, molecular hydrogen

uvolnění vodíku do atmosféry

olivíny

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

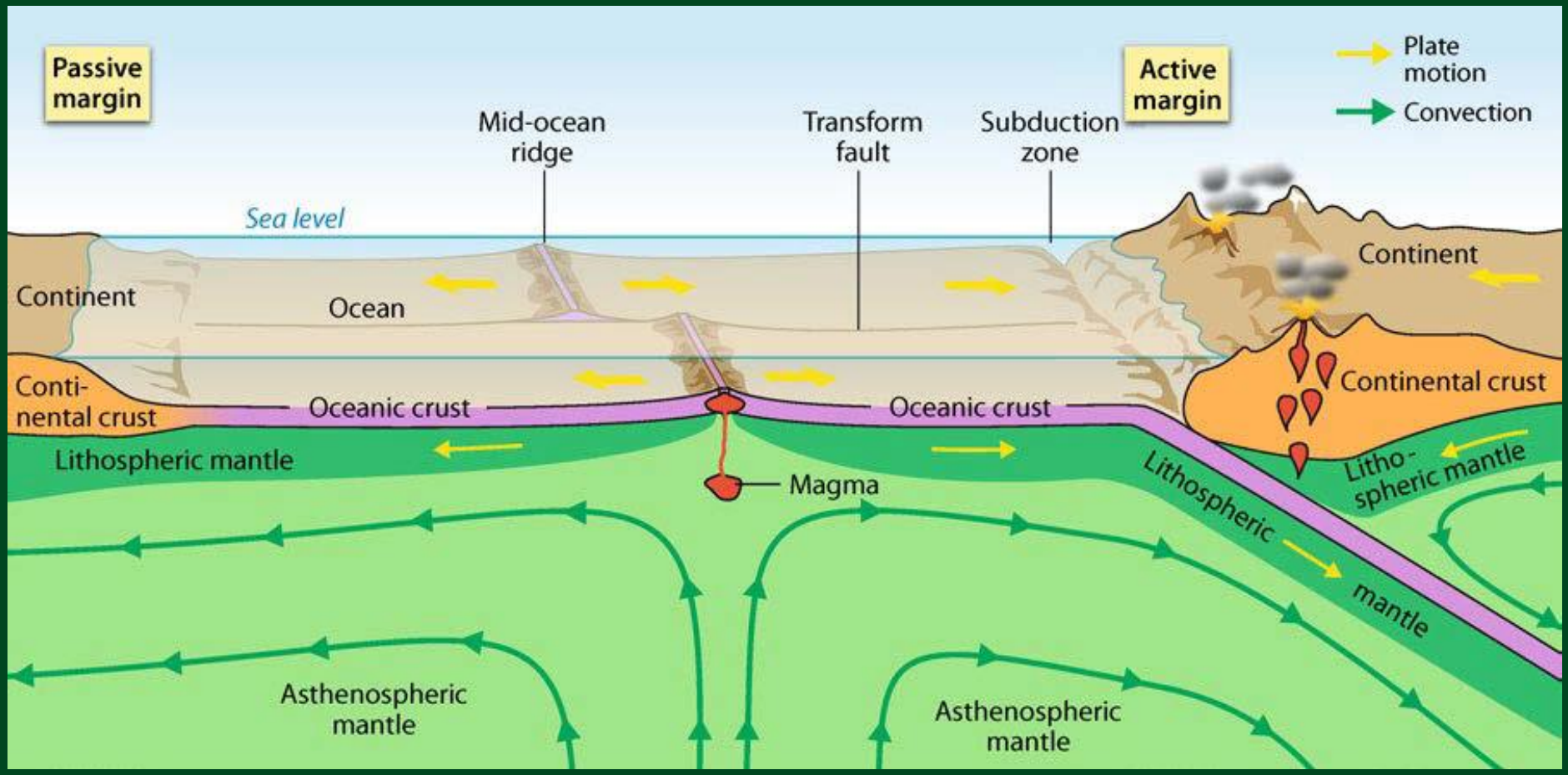
Země před 4.4 – 4.0 mld. let (Hadean)

- Před 4,4 mld let získala Země známější podobu - povrch pokrývaly oceány od z nichž se vynořilo několik kontinentů. Atmosféra pravděpodobně obsahovala dostatek skleníkových plynů, takže navzdory "chladnému" Slunci (75 % současné svítivosti) se teplota jejího povrchu udržovala nad 0 °C. Země tedy byla připravena pro život, byla potenciálně obyvatelná
- kontinentální kůra prošla procesy zrání a recyklace, oceány byly stabilní po celé toto období
- po kondenzaci oceánů se CO_2 stal hlavní složkou atmosféry s parciálním tlakem, který se v závislosti na odhadech pohybuje mezi 40 a 210 bary. To vyvolalo výrazný skleníkový efekt, jehož důsledkem byla teplota na povrchu 200 až 250 °C. Za těchto podmínek docházelo k vyluhování křemičitých hornin což vedlo k uvolňování oxidu křemičitého a hydrogenuhličitanů reakcí:

$$\underset{\text{magnesium silicate}}{MgSiO_3} + 2(CO_2) + \underset{\text{liquid water}}{H_2O} \rightarrow Mg^{2+} + \underset{\text{bicarbonate}}{2(HCO_3^-)} + \underset{\text{silica}}{SiO_2}$$

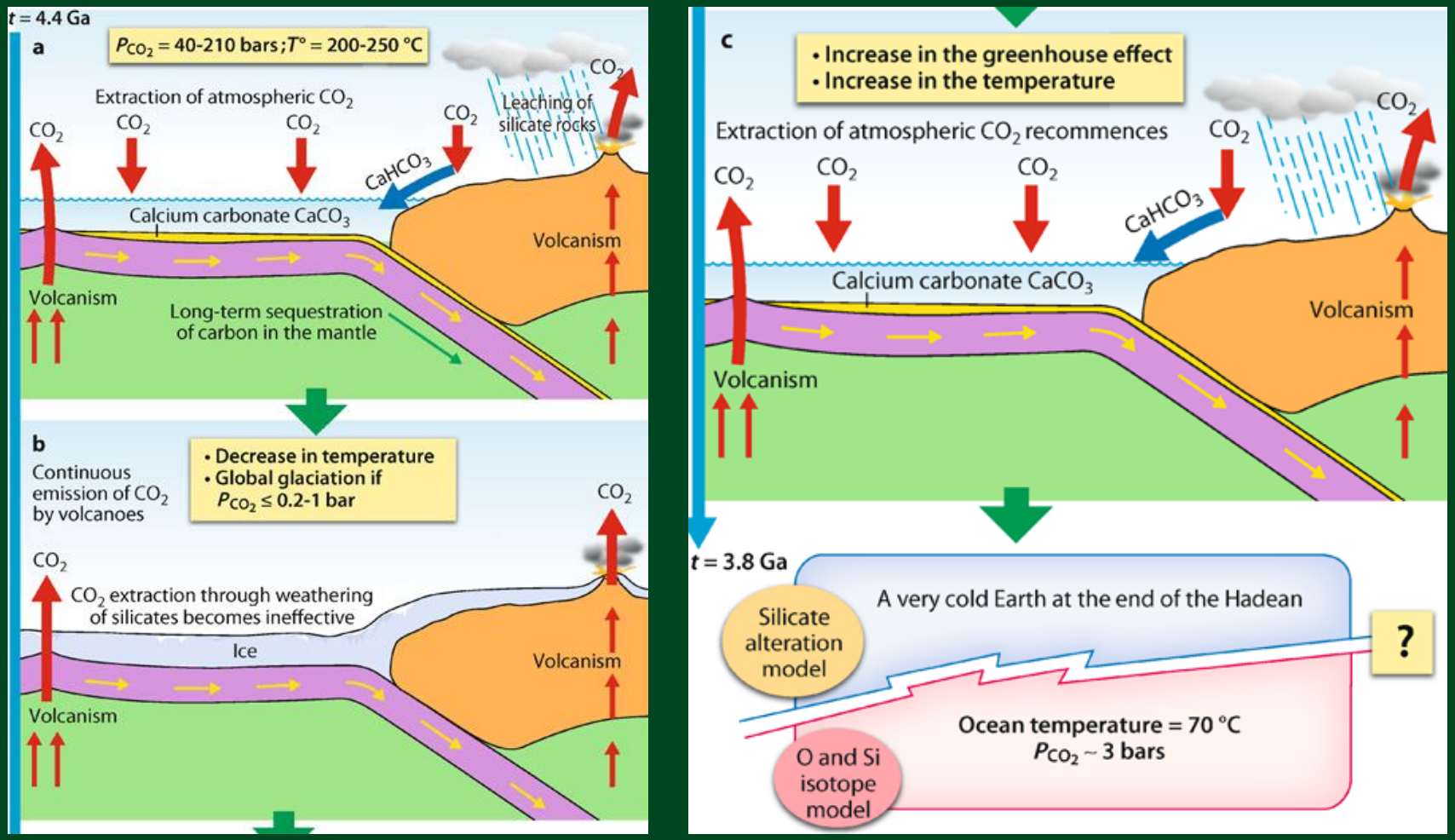
$$\underset{\text{bicarbonate}}{2(HCO_3^-)} + Ca^{2+} \rightarrow \underset{\text{calcium carbonate}}{CaCO_3} + CO_2 + H_2O$$

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012



- **Blokové schéma znázorňující různé typy relativního pohybu mezi litosférickými deskami.** Probíhá subdukce desky pod kontinentální kůru, většina pozemské vulkanické činnosti je lokalizována podél hranic desek. Oceán je tvořen vrstvou vody, jejíž hloubka je v průměru 5 km a která se nachází nad oceánskou kůrou. Typická tloušťka oceánské kůry je 7 km, Hustá oceánská kůra se propadá a vrací se ("subdukuje") do pláště, čímž vzniká to, co geologové nazývají subdukční zóna.
- V současnosti tento cyklus trvá v průměru 60 mil. let a není známa žádná oceánská kůra starší než 180 mil. let. Zjednodušeně řečeno, v současné době cyklus oceánské kůry nijak významně nemění chemické složení pláště. Většina chemických prvků, které jsou z pláště extrahovány za účelem vytvoření oceánské kůry v systémech středooceánských hřbetů, je totiž do tohoto pláště znovu začleněna v průměru o 60 mil. let později v subdukčních zónách.

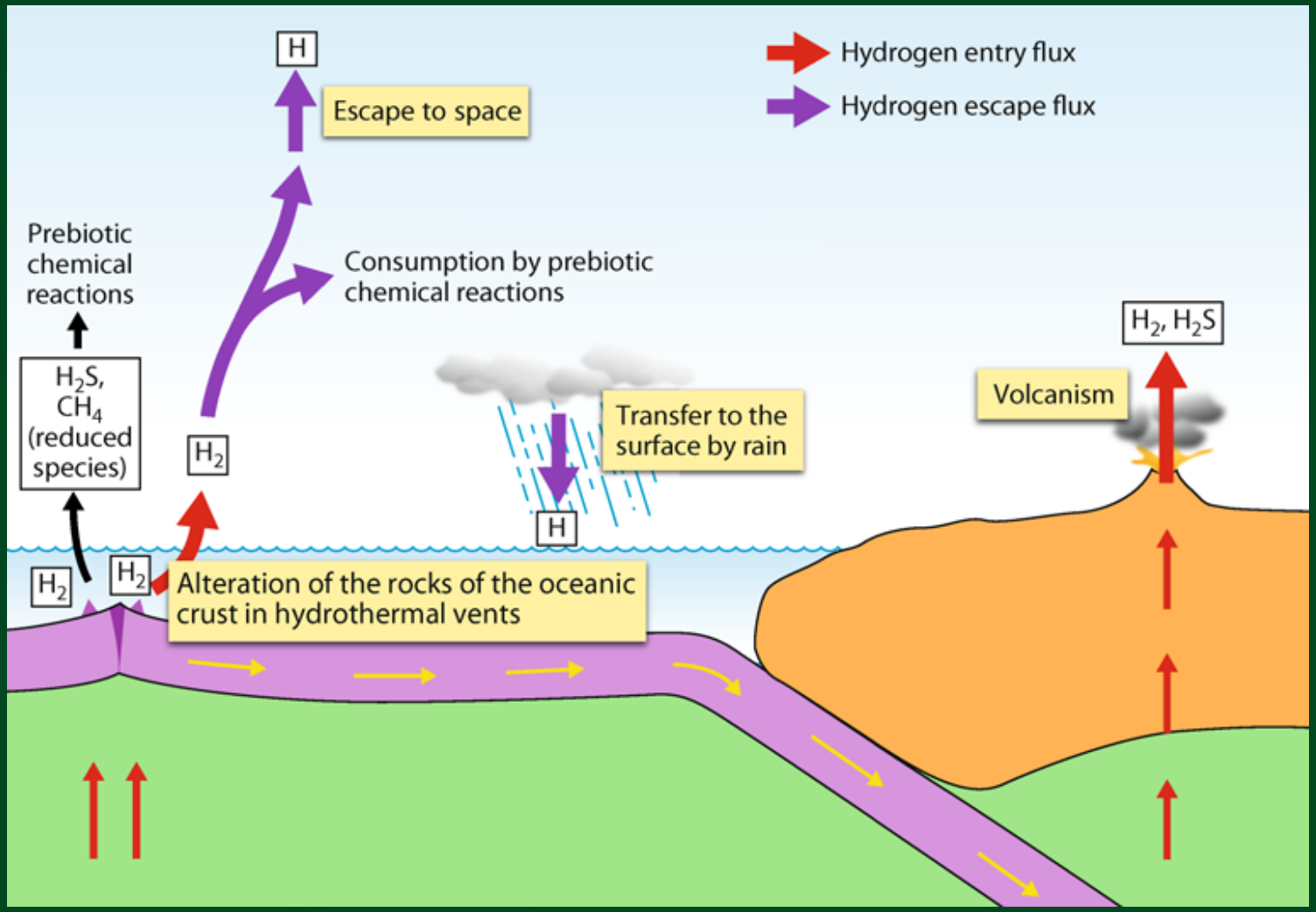
M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012



- **Regulace povrchové teploty Země zvětráváním silikátových hornin.** Před 4,4 mld. let jakmile byla na povrchu naší planety k dispozici kapalná voda, docházelo k vyluhování silikátových hornin, které absorbovaly atmosférický CO_2 (a). Pokles parciálního tlaku atmosférického CO_2 způsobil snížení skleníkového efektu a následně snížení povrchové teploty, což mohlo vést až ke globálnímu zalednění. Na zcela zmrzlé Zemi by však zachycování CO_2 bylo neúčinné, zatímco plyn byl průběžně uvolňován vulkány (b). Pak by parciální tlak CO_2 vzrostl, spolu se skleníkovým efektem a povrchovou teplotou (c). Modely založené na tomto systému předpovídají, že na konci hadeanu, tedy asi před 3,8 Ga, byla Země celosvětově extrémně chladná což je v rozporu s analýzou izotopů kyslíku a křemíku v horninách z tohoto období, která ukazuje na teplotu oceánu kolem 70 °C.

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

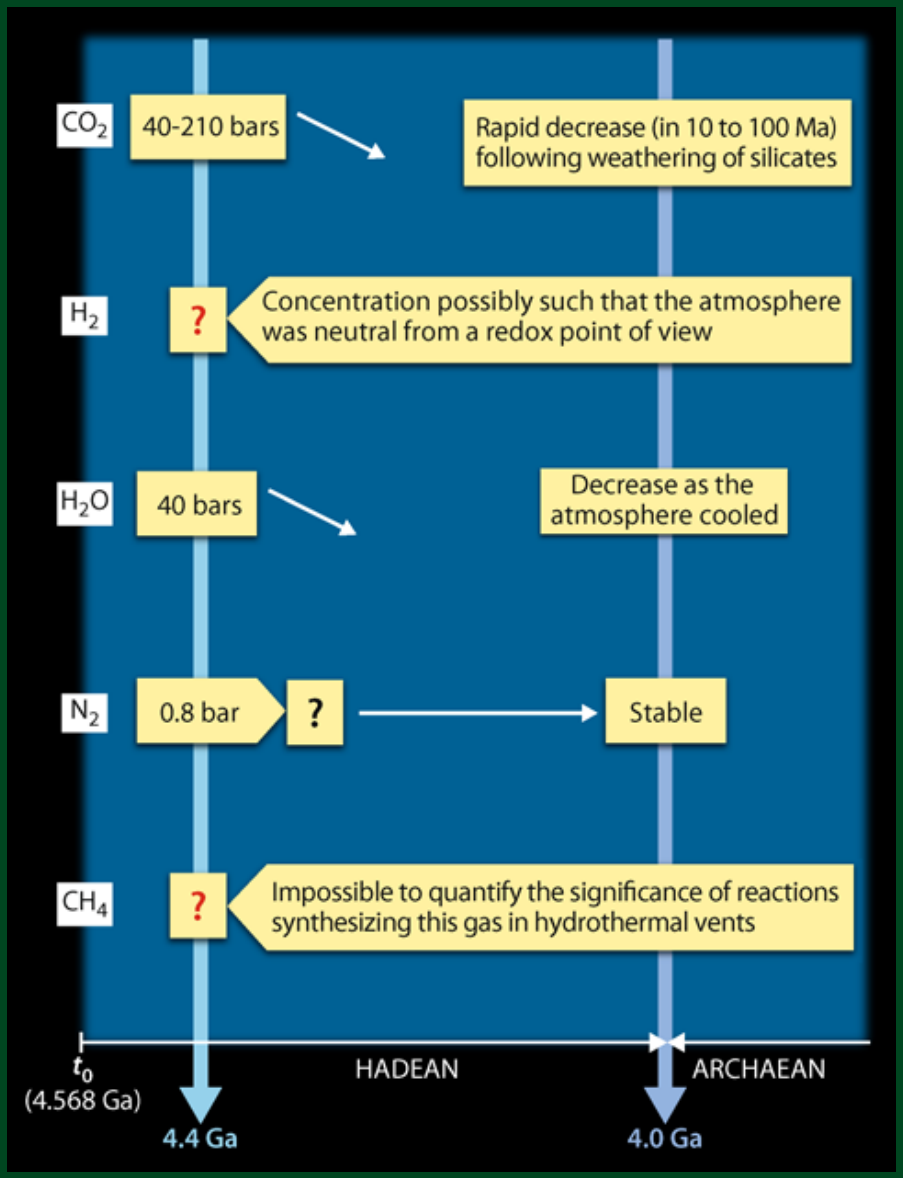
Země: 4.4 – 4.0 mld. let (Hadean)



- **Tok vodíku v atmosféře hadeovské Země.** Složení atmosféry se vyvíjelo až do stabilního stavu, kdy byl tok vodíku (a dalších redukujících plynů) vstupující a vystupující z atmosféry v rovnováze.

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Země: 4.4 – 4.0 mld. let (Hadean)

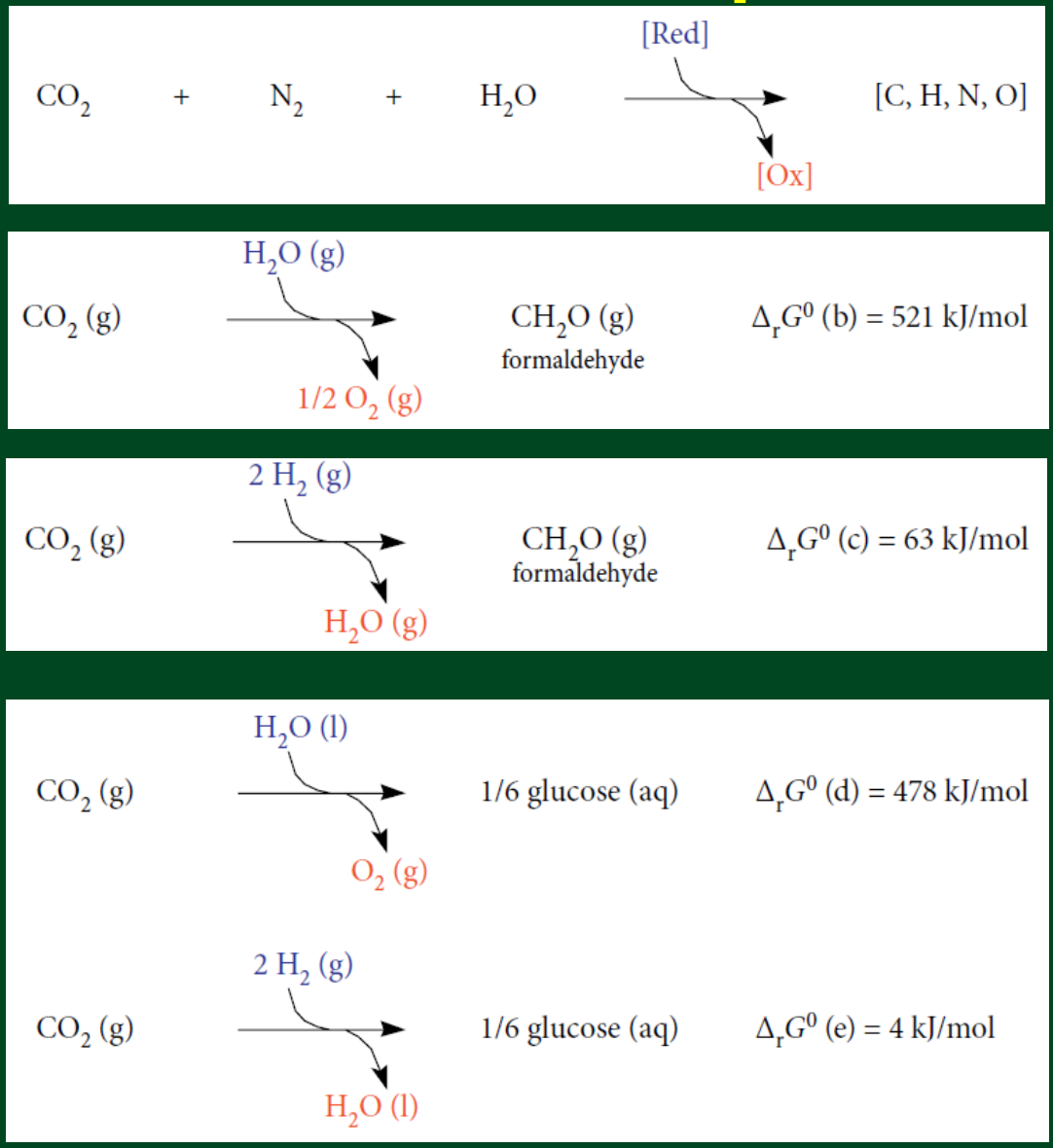


- Mohla probíhat chemie života, tedy reakce umožňující syntézu organických molekul, které tvoří základ živých bytostí? A pokud ano, kde a jakých molekul?
- Vznik organických molekul však nemusí být nutně synonymem pro přítomnost života. Organická hmota je trvale syntetizována v mezihvězdném prostředí, které si lze jen těžko představit jako příznivé pro vznik života.

- **Vývoj zemské atmosféry mezi 4,4 a 4,0 Ga.** Veškeré naše poznatky o složení hadeovské atmosféry se opírají pouze o modely, které jsou náchylné k podstatným změnám, jak se zlepšují naše znalosti o primitivní Zemi.

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

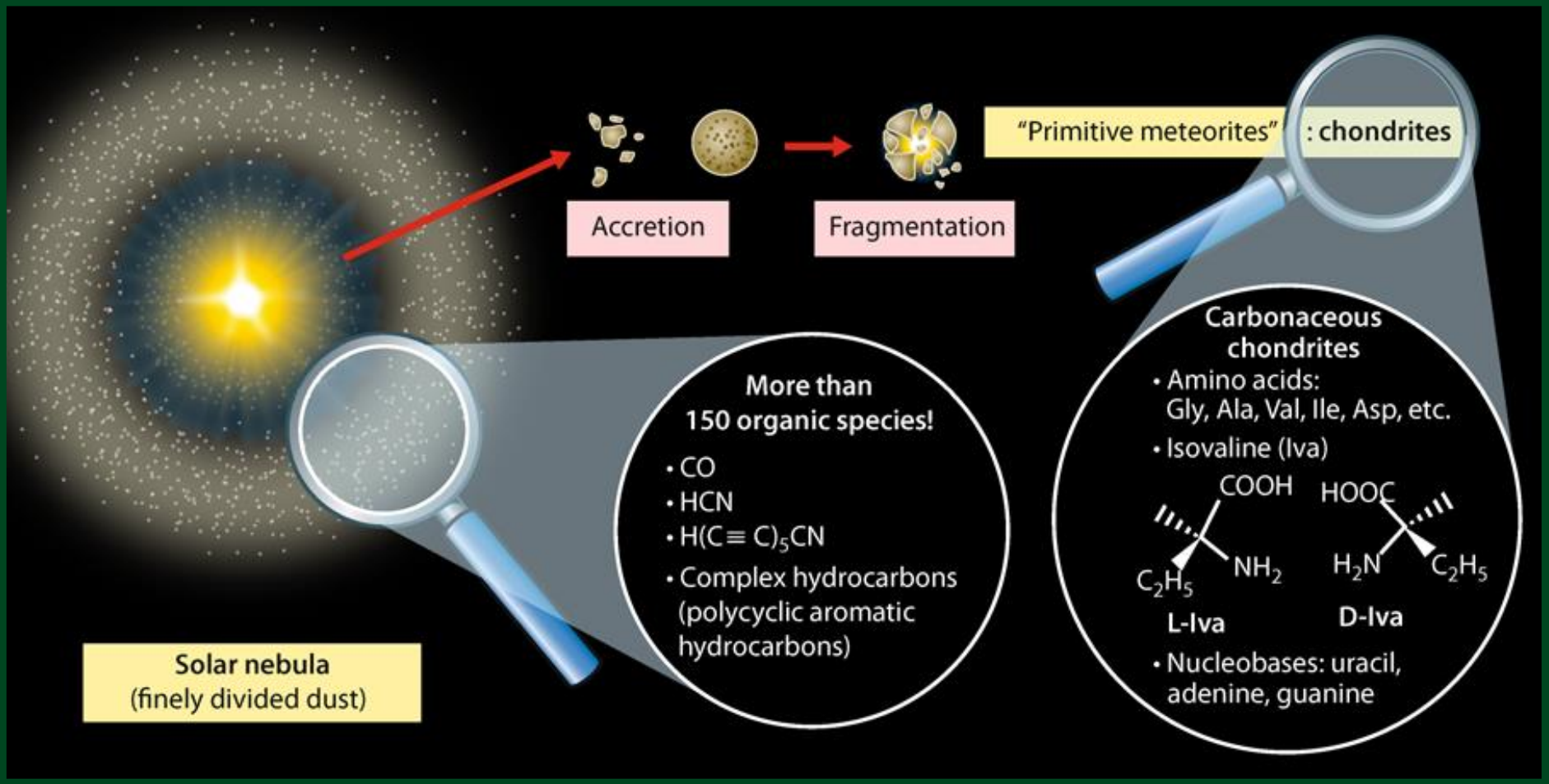
Organické látky mají „rády“ redukční prostředí



- Organické molekuly (kombinace atomů C,H,N,O). Použití plynů CO_2, N_2 a H_2O jako zdrojů C,H,N,O pro tvorbu organických molekul vyžaduje nejen velké množství energie, ale také redukční činidlo v souladu s obecnou redukční reakcí
- Tato redukce je nejčastěji energeticky nevýhodná – kladná standardní změna Gibbsovy (volné) energie reakce
- H_2 jako reduktant výhodnější než voda
- V dnešní době je samozřejmě syntéza glukózy z CO_2 a H_2O jednou z nejběžnějších. Je však výsadou živých organismů pomocí fotosyntézy. Tento optimální systém je výsledkem dlouhé biologické evoluce.
- <u>Prebiotická chemie byla naprosto neschopná dosáhnout takového výkonu v prostředí hadeanské Země. Na druhou stranu náš současný pohled na hadeovské prostředí hovoří o redukčním prostředí, které mohlo být při syntéze organických molekul mnohem účinnější.</u>

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

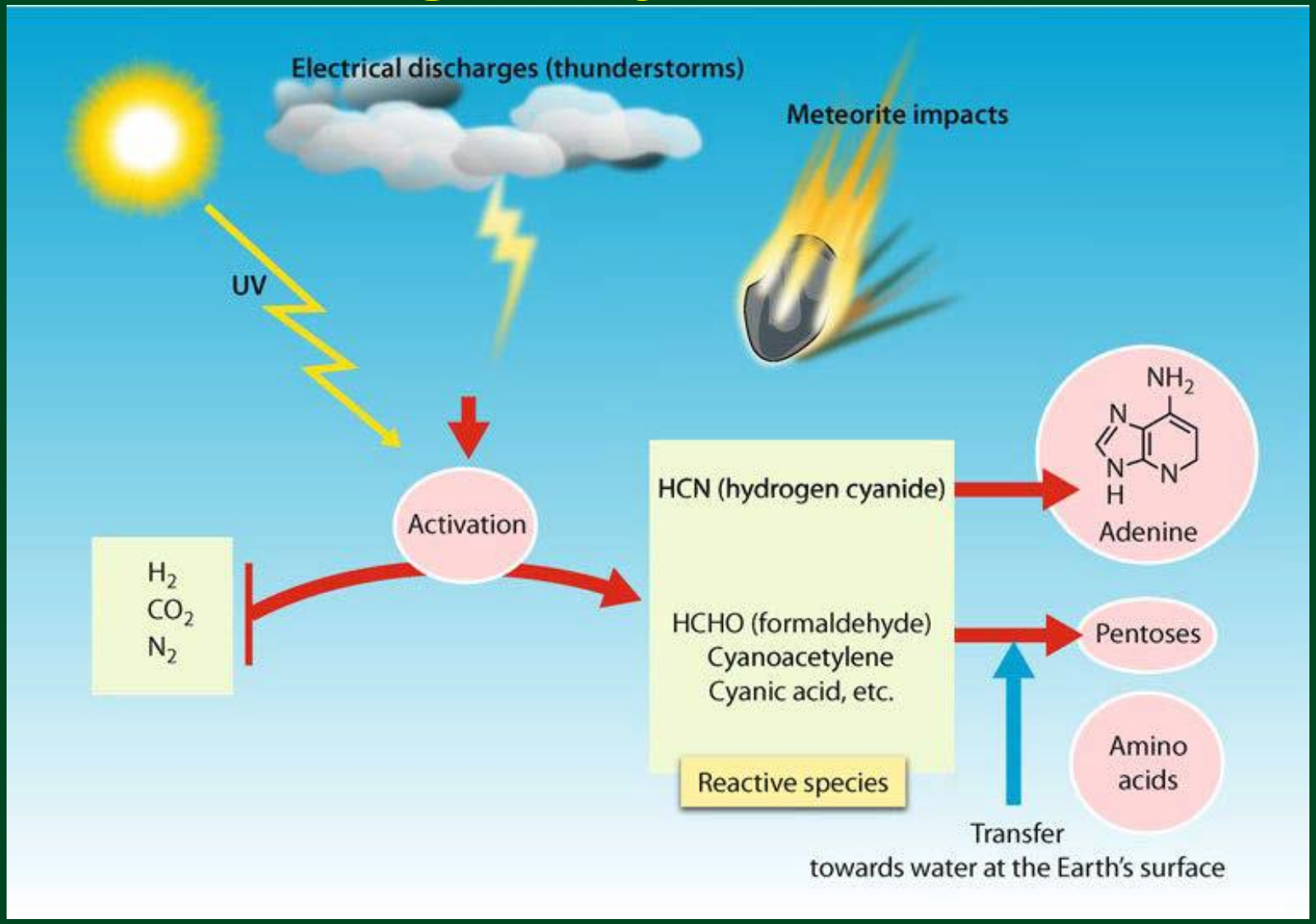
Organické látky ve vesmíru



- **Mezihvězdná mračna a meteority: mimozemské zdroje organické hmoty pro primitivní Zemi.** Nejen živé bytosti mohou syntetizovat organické látky. Plynová a prachová mračna v mezihvězdném prostoru jsou místem intenzivní organické syntézy (iniciace kosmickým zážením, za nízké teploty). Stejně tomu bylo i v případě protosolární mlhoviny. Pozn.: Izovalin (není mezi základními AMK) – v chondritu z Austrálie (Murchensonův meteorit, spadl 1969) – nerovnoměrné zastoupení L a D formy
- Možnost detekce organických látek na dálku pouze v plynném stavu pomocí teleskopů s spektrální detekcí

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

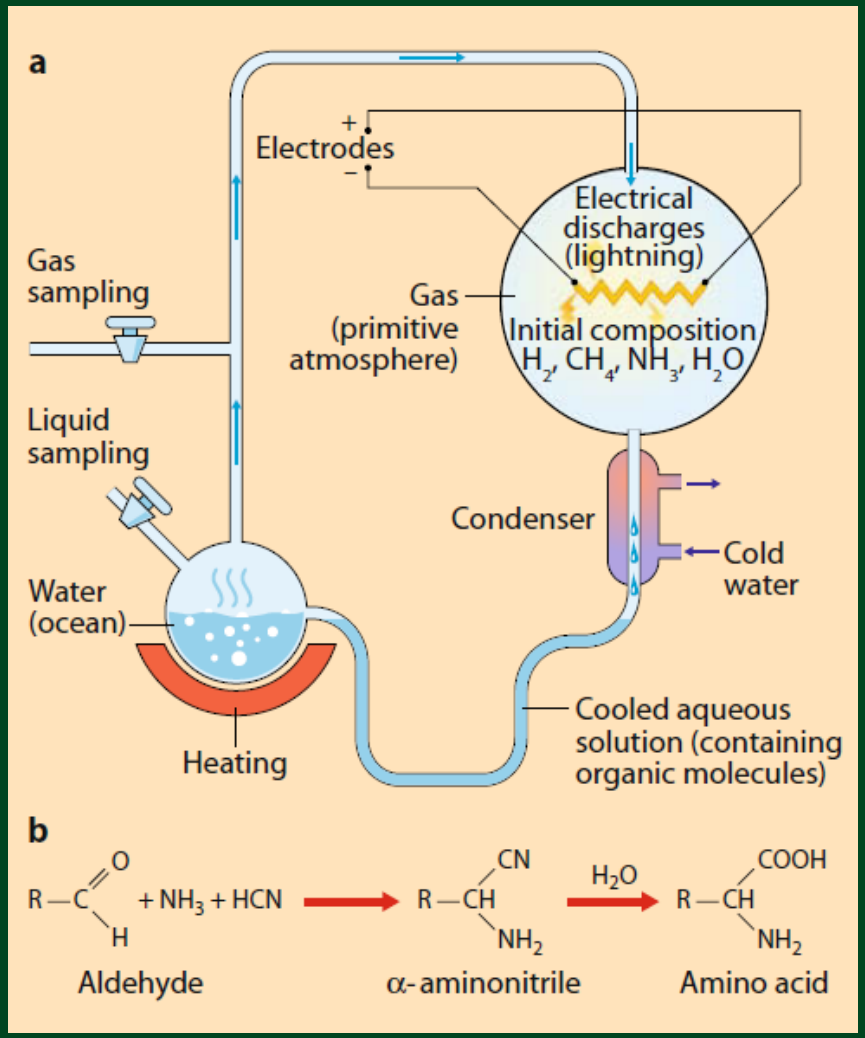
Vznik organických látek na Zemi



Prebiotická chemie v redukční atmosféře. Tepelnou nebo fotochemickou aktivací směsí plynů vznikají vysoce reaktivní druhy schopné následně tvořit aminokyseliny, dusíkaté báze nebo cukry a iniciovat vznik mnohem složitějších systémů.

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

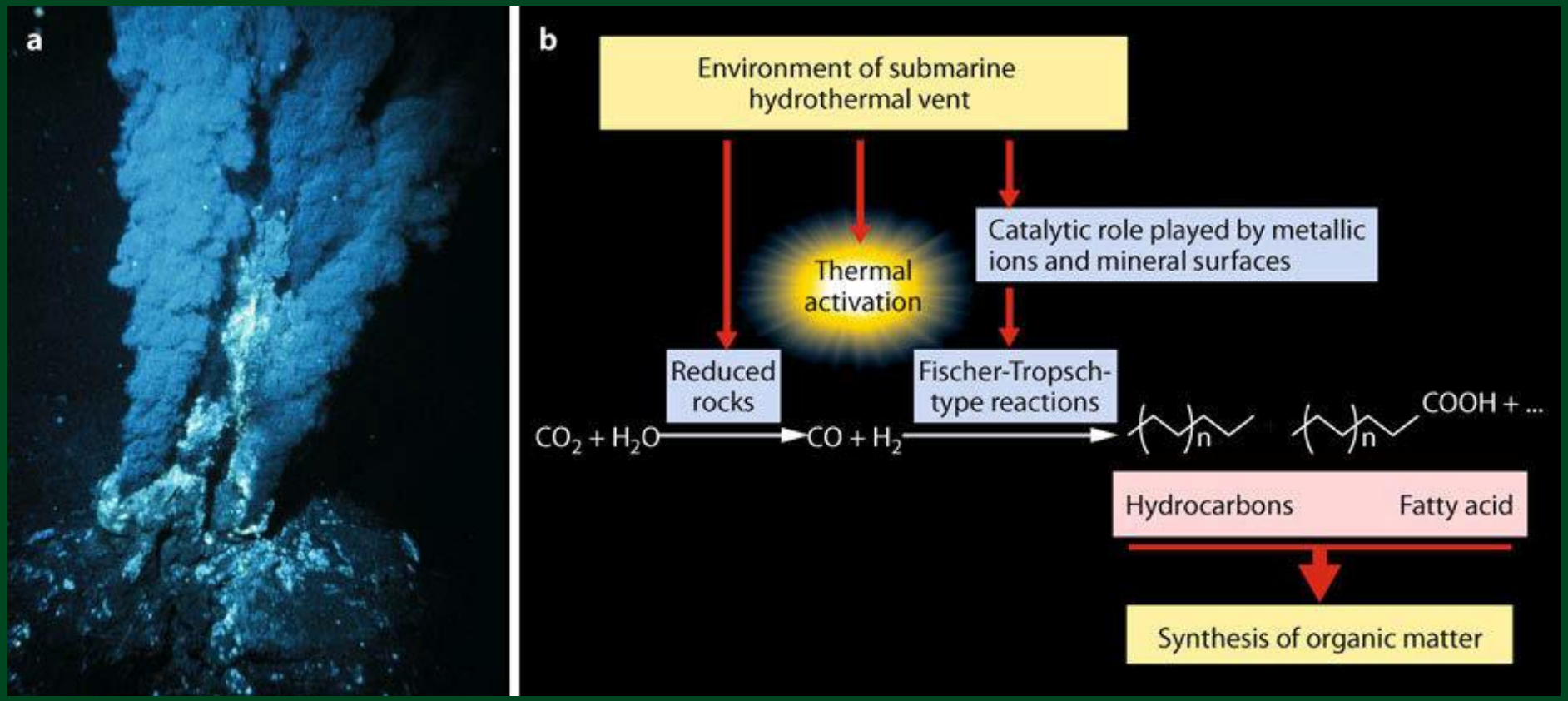
Miller-Ureyův experiment



M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

V roce 1952 chemik Harold Clayton Urey přijal myšlenku Alexandra Ivanoviče Oparina a Johna Burdona Sandersona Haldanea z počátku 30. let 20. století, že prvotní atmosféra Země byla redukující. Předpokládal, že se skládala z vodíku, metanu, dusíku a amoniaku, a vyslovil teorii, že aktivace takového systému by mohla vést k syntéze organických molekul. V roce 1953 chtěl jeho mladý student Stanley Miller tuto hypotézu ověřit. Navrhl zařízení – viz obr. Naplnil jej plynnou směsí vodíku, metanu a amoniaku, poté přivedl vodnou fázi (zpočátku obsahující destilovanou vodu) k bodu varu, čímž vytvořil proud páry. Poté byla plynná směs aktivována elektrickými výboji, které simulovaly blesk. Velmi brzy identifikoval mezi reakčními produkty aminokyseliny. Tento experiment vyvolal značný rozruch, protože prokázal, že syntéza základních složek pro život z jednoduchých prekurzorů (H2O, H2, NH3 a CH4) je možná díky simulaci podmínek na primitivní Zemi. Stalo se tak myslitelným, že biomolekuly vzniklé abiotickou metodou mohly poskytnout prvním živým organismům organickou hmotu a energii. Aminokyseliny se syntetizují ve vodném roztoku Streckerovou reakcí. Při tomto procesu se a-aminonitrily (AN) syntetizují z aldehydů (A) a kyanovodíku (HCN), které vznikají v plynné fázi elektrickými výboji a amoniakem. Tyto meziprodukty jsou následně hydrolyzovány na aminokyseliny Vzhledem k pokroku v poznání vzniku plynného obalu Země dnes již nikdo nezastává názor, že primitivní atmosféra se skládala převážně z metanu, amoniaku, oxidu uhelnatého a vody. Hlavní závěr tohoto Millerova-Ureyova experimentu však zůstává v platnosti i pro méně redukující (H2, CO2, N2) nebo zcela neutrální (H2O, CO2, N2) směsi : aminokyseliny mohou vznikat, i když s různou účinností, abiotickou cestou, jako výsledek aktivace primitivní atmosféry.

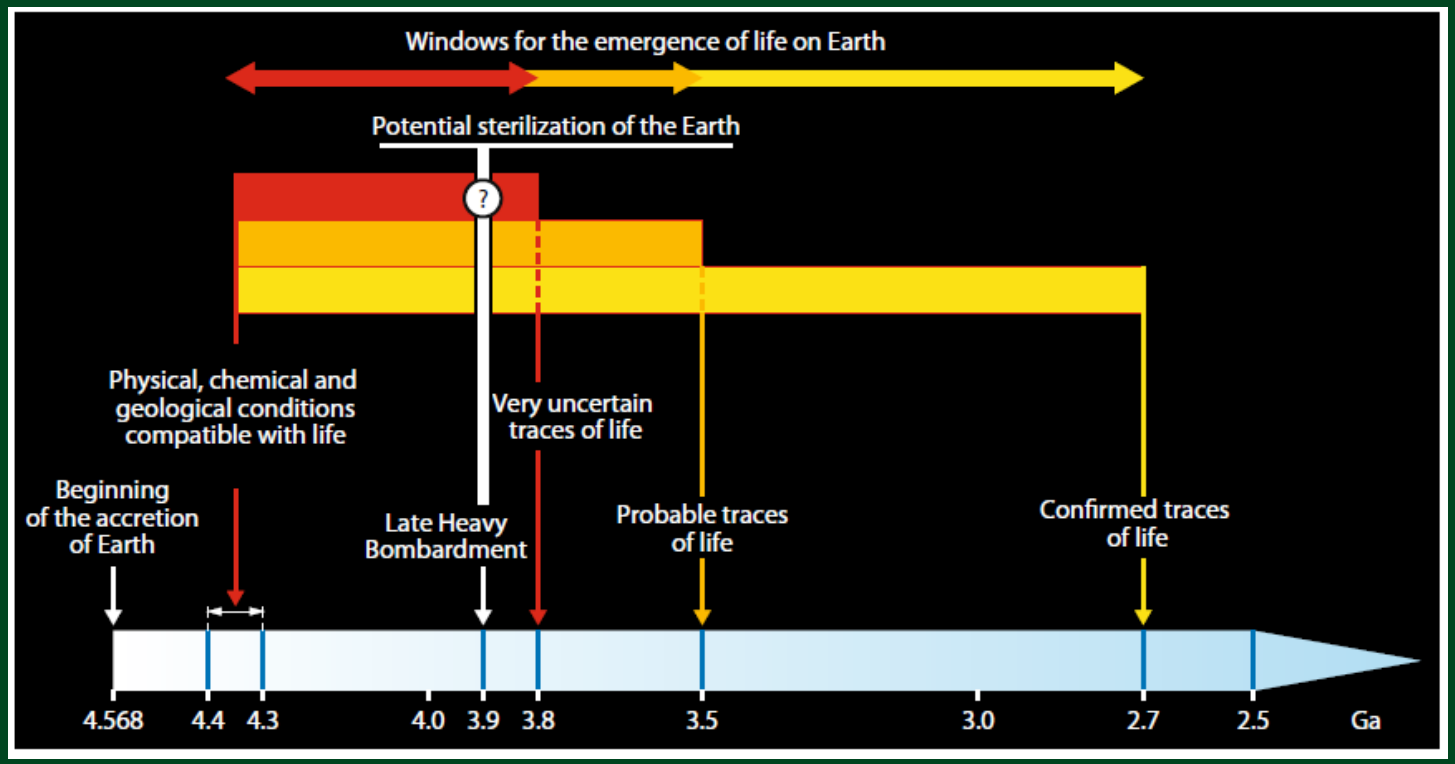
Vznik organických látek na Zemi



Současný hydrotermální průduch (a) a prebiotické reakce (Fischer-Tropschovy reakce), které mohly v takovém prostředí probíhat mezi 4,4 a 4,0 Ga (b). Takové reakce mohly například produkovat uhlovodíky nebo mastné kyseliny. Je velmi obtížné určit, do jaké míry byly tyto reakce na hadeanské Zemi skutečně aktivní.

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

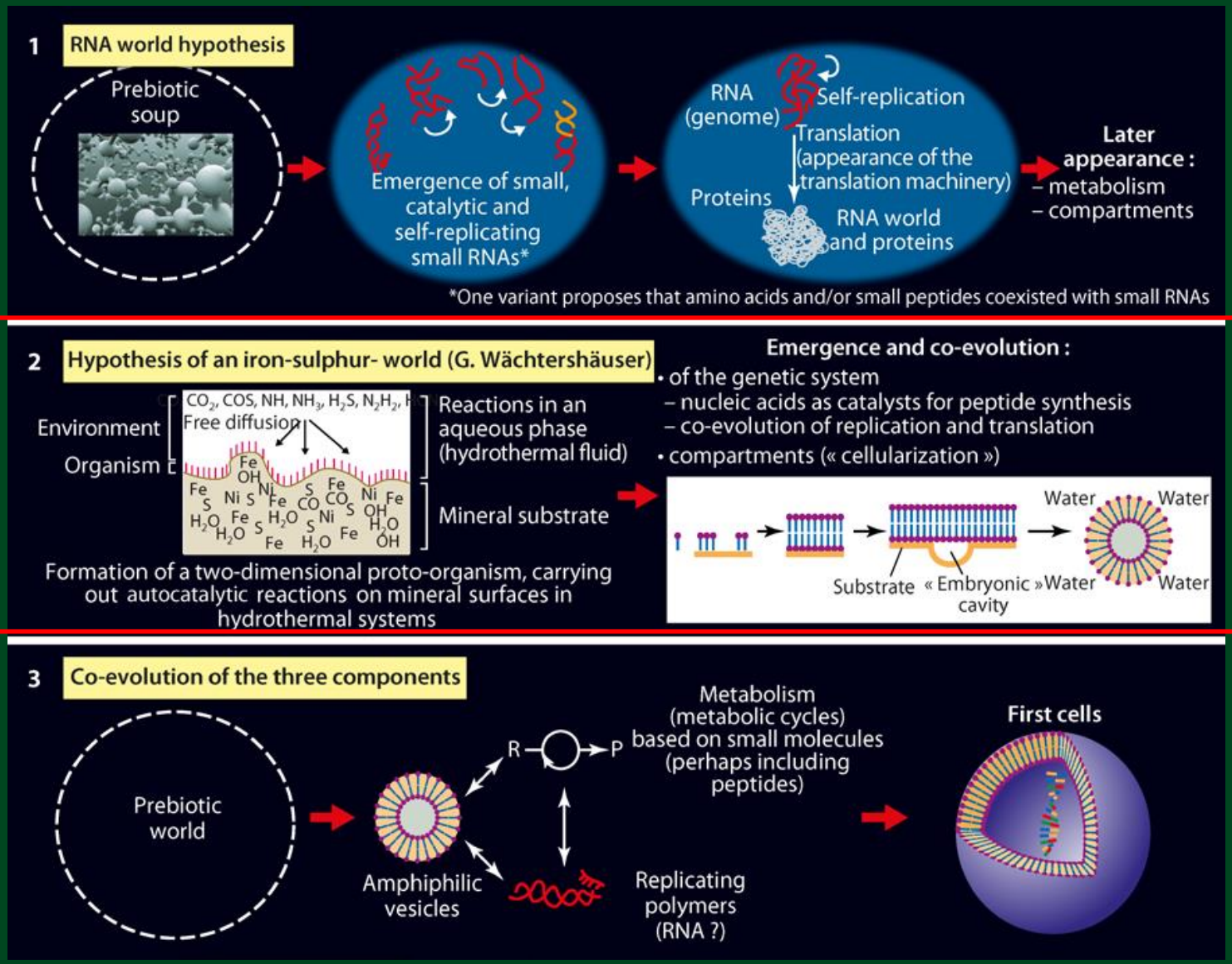
Zrození života: před 4,4 – 2,7 mld. let



- vznik života, vznik hlavních biochemických drah, vývoj posledního společného předka všech moderních živých bytostí a první divergence od tohoto společného předka, nelze datovat. Jediné, co nyní víme je, že všechny tyto události se odehrály v období mezi dvěma určitými hranicemi. První je ta, kdy se otevřelo okno příznivé pro vznik života: to odpovídá období, kdy se vytvořily příznivé fyzikálně-chemické a geologické podmínky, tj. 4,4-4,3 Ga. Druhým je zřejmě okamžik, kdy si díky nálezu nejstarších fosilních stop života můžeme být naprosto jisti, že se život etabloval, tj. 2,7 Ga (možná již 3,5 Ga). Mezi těmito dvěma hranicemi nemáme žádnou představu o době, která byla nutná k ustavení procesů, jež vedly ke vzniku života, ani o době potřebné ke vzniku hlavních přechodů rané evoluce.

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Zrození života: před 4,4 – 2,7 mld. let



Hypotézy vysvětlující vznik tří základních složek života (genetický a metabolický systém a kompartmentalizace). Jednotlivé hypotézy (svět RNA, povrchový svět železa a síry a koevoluce)

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

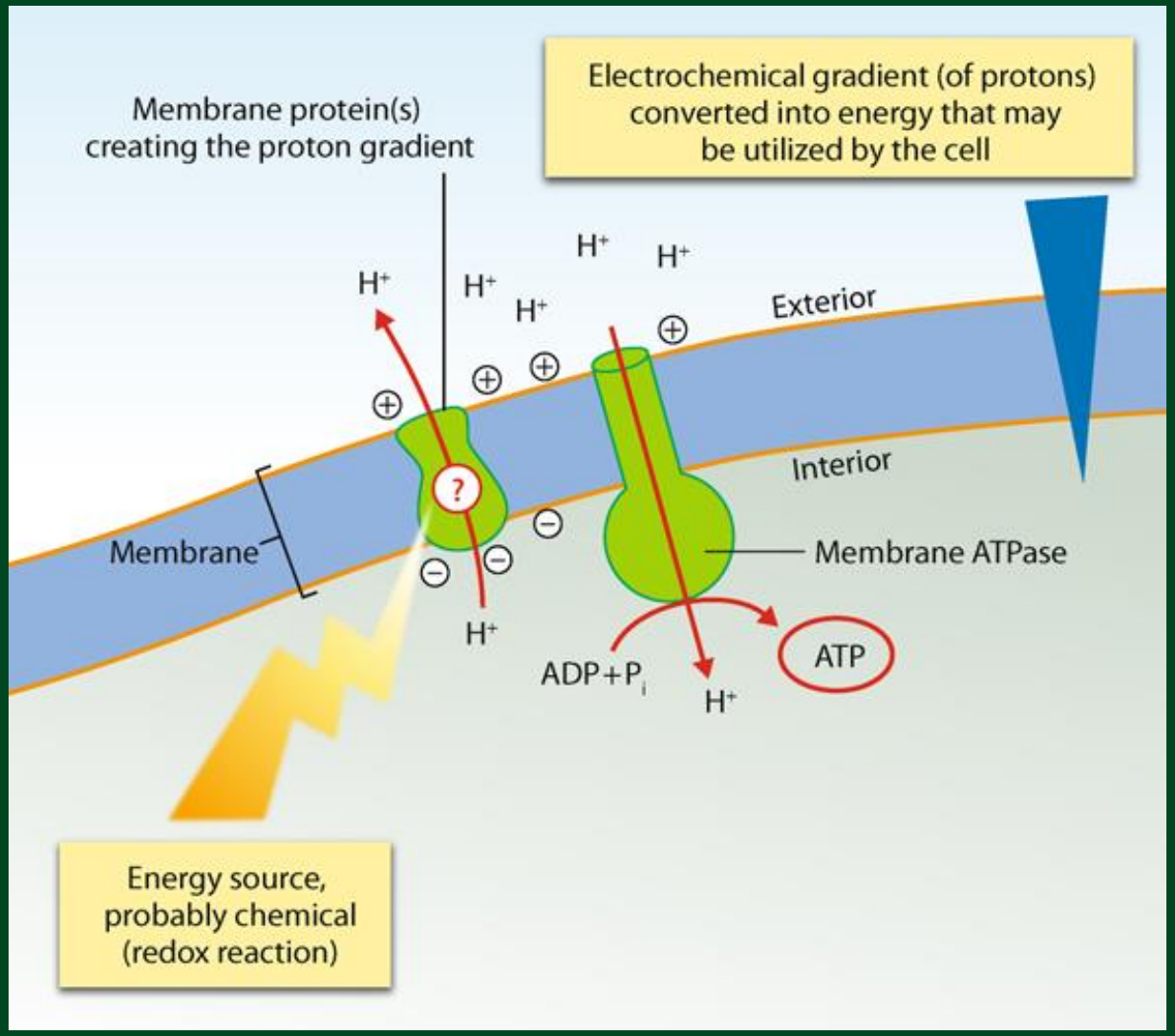
LUCA - Last Universal Common Ancestor

- Dosud výzkum možného vzniku života formou přechodu od neživota k životu („bottom-up“, "zdola nahoru" – **konstruktivní přístup** - tedy vytváření hypotéz o způsobu, jakým mohl život vzniknout, počínaje chemickými prvky a molekulami stále větší složitosti, a samozřejmě v testování jejich věrohodnosti.

- Alternativním přístup - dekonstruktivní přístup ("shora dolů„). Ten spočívá ve studiu životních forem, jak je známe dnes, s cílem odhalit základní prvky, které při vzniku a pozdějším vývoji života hrály klíčovou roli a mohou podat svědectví o minulých událostech. Tento přístup nám tedy umožňuje pracovat zpětně v historii života prostřednictvím analýzy zděděných vlastností. Pokud bychom byli schopni sledovat tuto nit až do konce, měli bychom přístup ke skutečné historii zrodu života a mohli bychom se rozhodnout mezi různými hypotézami. Bohužel, existují určité limity. Není možné jít příliš daleko do minulosti, dnešní živé organismy jsou složité a optimalizované miliardami let evoluce. Přístup shora dolů nám jistě umožňuje rekonstruovat portrét posledního předka společného všem živým bytostem.

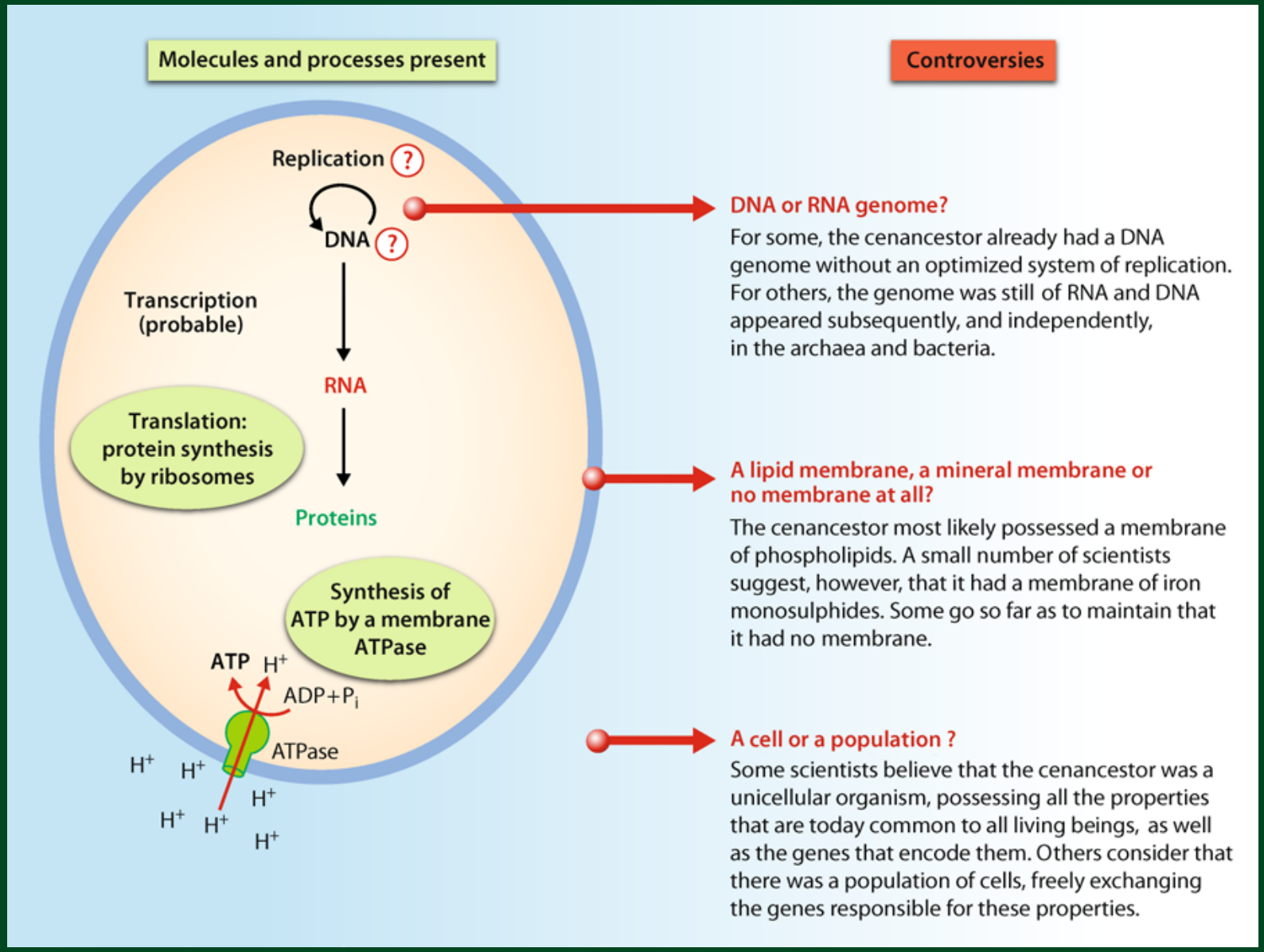
- Některé jeho charakteristiky lze odvodit ze srovnávacích studií založených na biochemii, molekulární biologii a především na molekulární genomice a fylogenetice, dvou disciplínách, které v posledních letech dosáhly velmi výrazného pokroku. Tyto různé přístupy přinesly spolehlivé důkazy o velmi staré povaze **mechanismu pro syntézu proteinů (translace),** poměrně sofistikovaného mechanismu pro **syntézu messengerové RNA (transkripce)** a procesu **produkce energie založeném na vytváření protonového gradientu přes membránu**. Tyto rysy jsou univerzální: lze je pozorovat u všech současných buněk, a proto se plně připouští, že musely být přítomny i u posledního společného předka. Další vlastnosti jeho jsou naopak spornější.

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012



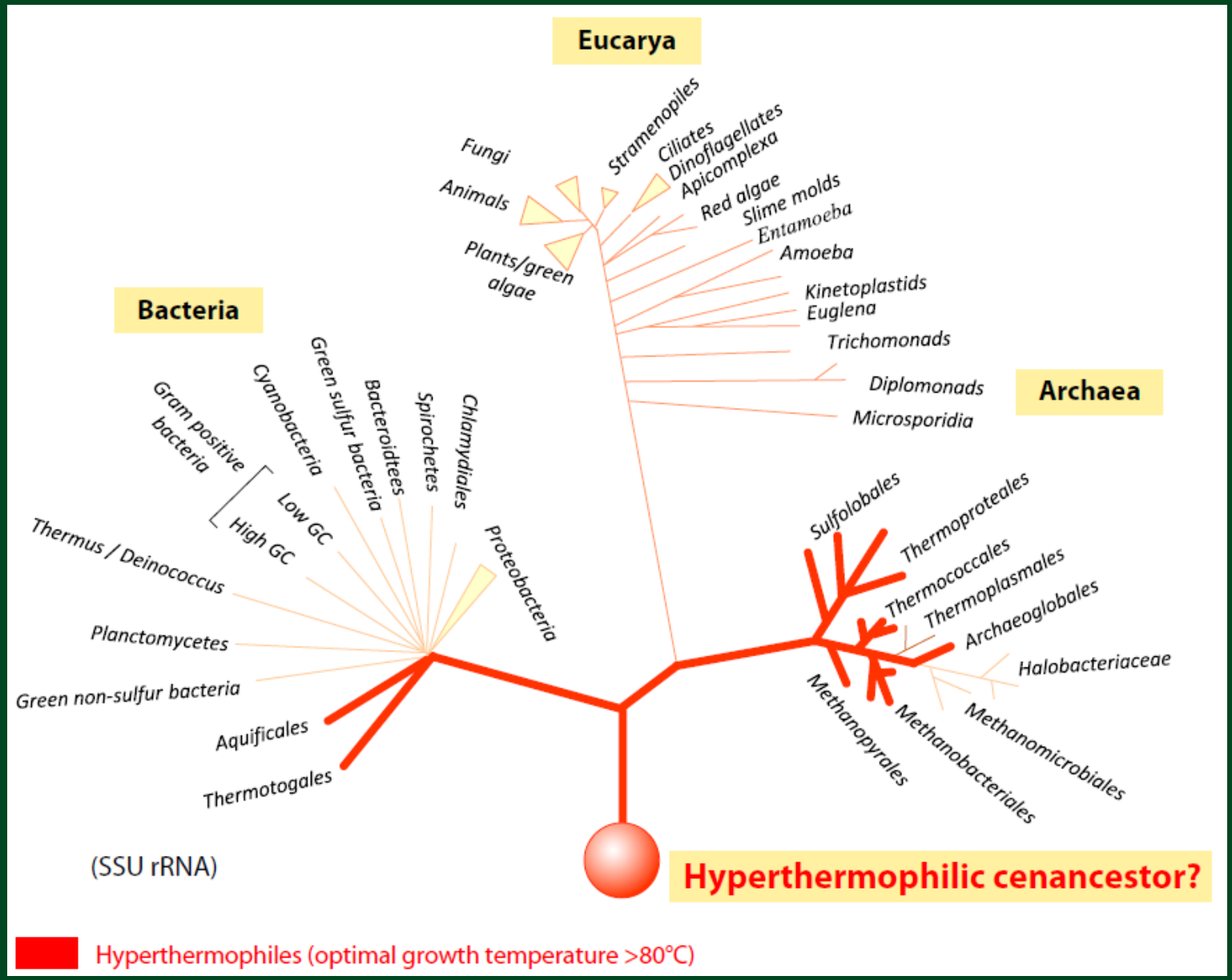
Produkce ATP v cenancestoru. Je velmi obtížné rekonstruovat metabolismus cenancestoru. Přítomnost membránové ATPázy, která je vysoce konzervovaná u všech buněčných organismů, nám však umožňuje určit jednu charakteristiku jeho energetického metabolismu. Cenancestor byl schopen přeměnit protonový gradient přes membránu na volnou energii uloženou buňkou ve formě ATP. Mechanismus, který se uplatňuje u současných organismů. Protein (nebo proteiny), který tento gradient vytvářel, není znám.

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012



Všechny organismy v živém světě sdílejí určitý počet biochemických a molekulárních charakteristik, které zdědily od posledního univerzálního společného předka (LUCA) („cenancestor“).

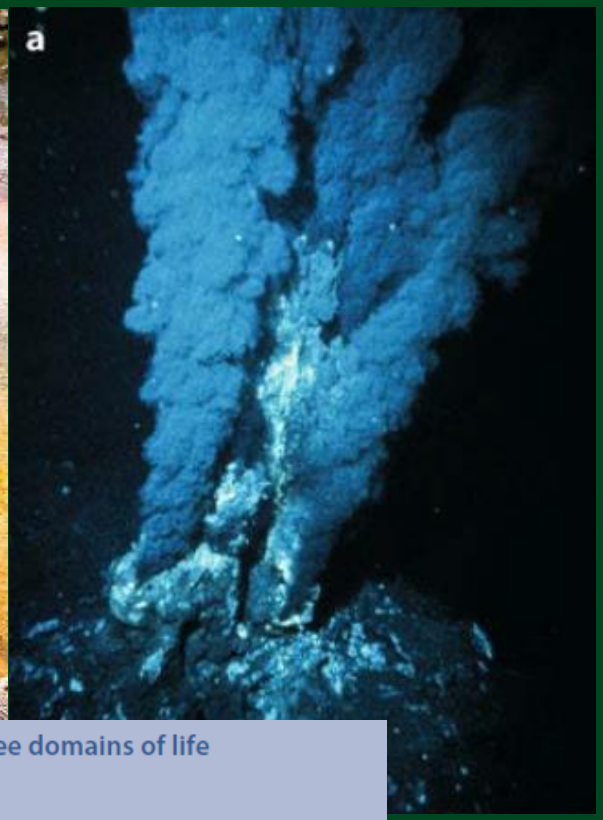
M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012



Fylogenetický strom založený na porovnávání sekvencí nukleotidů ribozomální RNA vysoce konzervativní malé podjednotky (16S) ribosomu. LUCA (cenancer) také hypertermofilní.

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Gejzír nebo hydrotermální vývěr?



Type of organism	Definition (optimal growth condi-tions)	Example habitats	Distribution in the three domains of life and examples		
			Archaea	Bacteria	Eukaryotes
Hyperther-mophile	> 80 °C	Submarine and continental hydrothermal systems Geysers	Up to 113 °C *Pyrolobus, Methanopyrus,* etc.	Only up to 95 °C *Aquifex Thermotoga*	None

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Hydrothermal vents - hydrotermální vývěry

https://education.nationalgeographic.org/resource/deep-sea-hydrothermal-vents

Vznik života na mořském dnu?

- **Černí kuřáci (black smokers)** - podmořských hydrotermálních vývěry (objev 1977) v oblastech zlomu tektonických desek, jsou vulkanického původu, vznikly interakcí mořské vody s magmatem (1200°C), vyvěrá horká voda (350°C), bohatá na sirovodík a rozpuštěné kovy, s nízkým obsahem plynného vodíku, pH 1-2, Nevhodné podmínky pro vzniku života – vysoká teplota (spíš rozklad než syntéza org. látek), velmi nízké pH, krátká doba života – desítky let

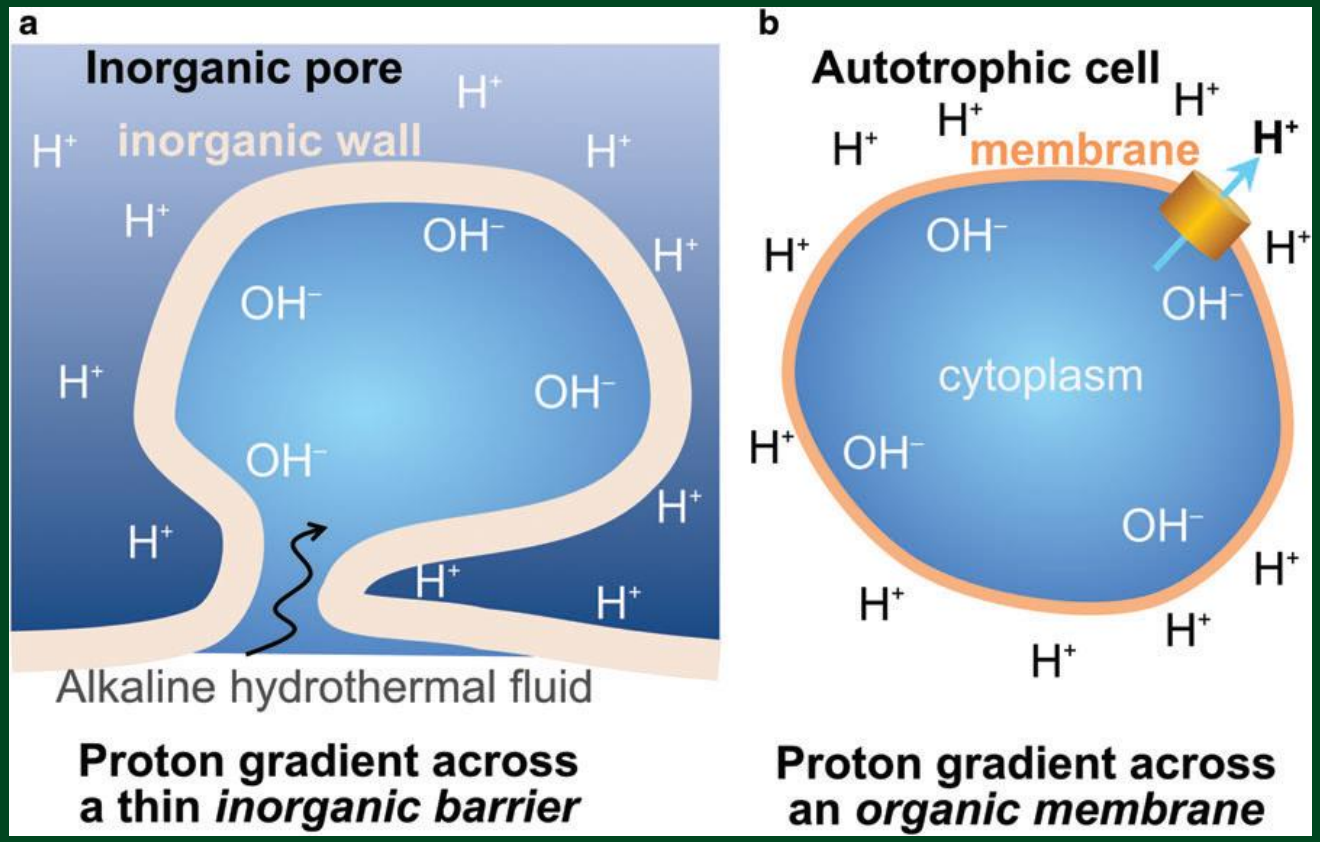
- **Bílí kuřáci (white smokers)** (objev 2000) - vzniká reakcí mořské vody s minerály (olivín), které tvoří velkou část oceánské kůry. Tyto hydrotermální systémy nejsou vulkanické, ale jsou výsledkem geochemického procesu známého jako serpentinizace – hydroxylace olivínu na serpentin - hydroxylované horniny se rozpínají a puknou, což umožňuje vnikání další vody (reakce se udržuje v chodu) reakce. Vznikají porézní struktury (velitost póru – mikrometry) až 60 m vysoké. Je zajímavé, že do zemské kůry váže více vody v podobě hydroxylovaných hornin, než je přítomno v oceánech.

  Serpentinizace vytváří středně vysoké teploty (150-200°C). Vznikají při ní také hydrotermální tekutiny, které jsou silně alkalické (pH 9-11) a bohaté na vodík se vracejí zpět do moře (70°C) . Russell a kol. (1993) (tedy před jejich objevem v „Lost City“, těsně u středoatlantického hřbetu) předpověděl jejich existenci a možnou důležitost pro vznik života - inkubátory proto-metabolismu. Komíny tvořeny uhličitanem vápenatým s propojenými póry (mikrometry), kterými cirkuluje hydrotermální kapalina bohatá na vodík a lehké uhlovodíky (metan, mravenčanu a octanu) pravděpodobně abiotického původu. Organické látky vznikly pravděpodobně redukcí CO_2 (1000x vyšší koncentrace než dnes) vodíkem za přítomnosti katalyzátorů (látky s kovy, které se účastní serpentinizace)

  Je zajímavé, že dnes žijící autotrofní organismy také fixují (redukují) CO_2 pomocí vodíku (H_2, H_2O nebo H_2S)

Lane et al. (2010) How did LUCA make a living? Chemiosmosis in the origin of life. BioEssays 32:271–280.

„White smokers“ - energie pro život ?



Ventilační póry a autotrofní buňky mají analogickou topologii. (a) Póry v alkalických hydrotermálních průduších mají relativně silné anorganické stěny, které obsahují minerály Fe(Ni)S, jako jsou např. greigit (Fe_3S_4 – kofaktory enzymů pro fixaci CO_2 a dalších dalších reakcí). Tyto tenké bariéry oddělují alkalické (pH 9-11) hydrotermální tekutiny od mírně kyselých (pH 5-7) oceánské vody. Netěsné stěny nebrání míchání, ale nepřetržité hydrotermální proudění a oceánská konvekce udržují gradienty pH. (b) Topologie je přesně analogická v podstatě u všech autotrofních buněk včetně bakterií a archeí. Organická buněčná membrána (složená z lipidů) je mnohem tenčí (5 nm oproti 1μm), ale rozdíl v pH je cca stejný jak co do velikosti (asi 3 jednotky pH), tak co do polarity (kyselý vně). V případě autotrofních buněk je protonový gradient průběžně vytvářen membránovými pumpami, které aktivně vytlačují protony (šipka), aby udržely rozdíl pH .

Sojo et al. (2016) The Origin of Life in Alkaline Hydrothermal Vents. Astrobiology 16, 81-97.

Hydrotermální vývěr vs. původ života

TED-Ed: Lessons Worth Sharing (animated lessons) (https://www.youtube.com/watch?v=de1hiS_XjWg)

NASA – model hydrotermálního vývěru

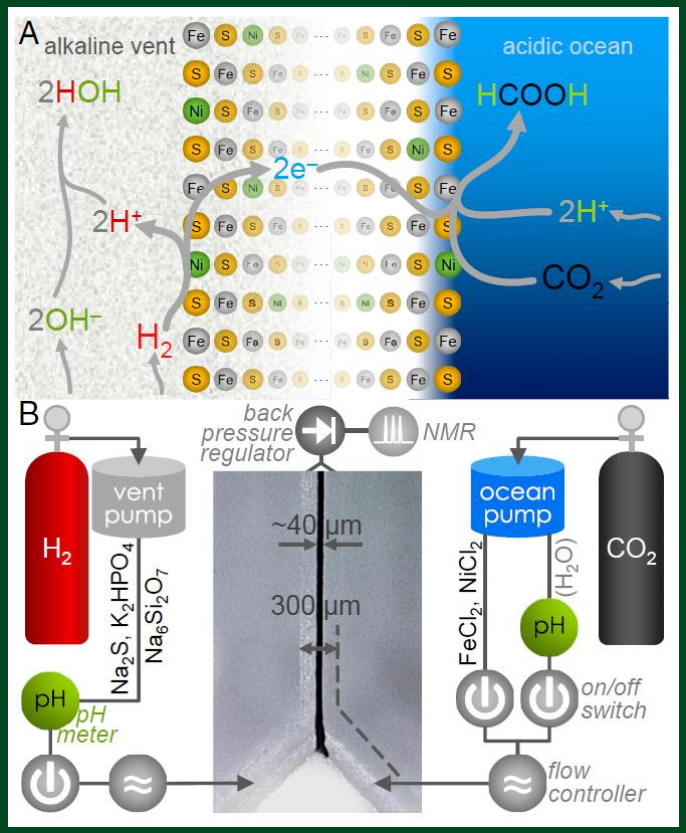
NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology - Studies Underwater 'White Smoker' Vents: Is This Where Life Began? (https://www.youtube.com/watch?v=cX4zzFWx9mA)

„White smokers“ - energie pro život ?

CO_2 reduction driven by a pH gradient

Reuben Hudson[a,b,c,1], Ruvan de Graaf[a], Mari Strandoo Rodin[a], Aya Ohno[c], Nick Lane[d], Shawn E. McGlynn[c,e,f], Yoichi M. A. Yamada[c], Ryuhei Nakamura[c,e], Laura M. Barge[g], Dieter Braun[h], and Victor Sojo[c,h,i,1]

[a]Department of Chemistry, College of the Atlantic, Bar Harbor, ME 04609; [b]Department of Chemistry, Colby College, Waterville, ME 04901; [c]RIKEN Center for Sustainable Resource Science, 351-0198 Saitama, Japan; [d]Department of Genetics, Evolution and Environment, University College London, WC1E 6BT London, United Kingdom; [e]Earth-Life Science Institute, Tokyo Institute of Technology, 152-8550 Tokyo, Japan; [f]Blue Marble Space Institute of Science, Seattle, WA 98154; [g]NASA Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91109; [h]Department of Physics, Center for Nanoscience, Ludwig-Maximilians-Universität München, 80799 Munich, Germany; and [i]Institute for Comparative Genomics and Richard Gilder Graduate School, American Museum of Natural History, New York, NY 10024

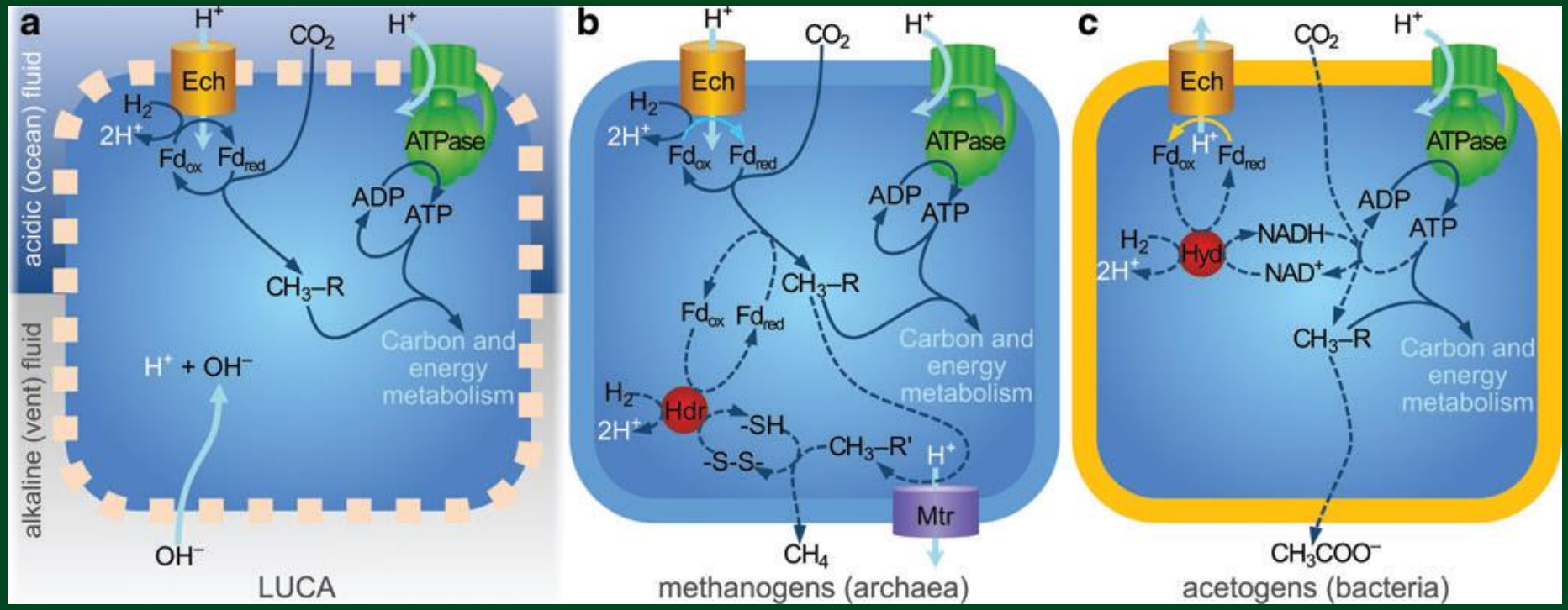


Navrhovaný mechanismus redukce CO2 pomocí H2 přes Fe(Ni)S a schéma reaktoru.

(A) Při alkalické straně je oxidace H_2 (vlevo) zvýhodněna alkalickým pH (díky přítomnosti iontů OH^-), které reagují exergonicky v alkalickém prostředí za vzniku vody. Uvolněné elektrony se pohybují po až centimetr tlustou sítí Fe(Ni)S (uprostřed) k více oxidujícímu kyselému roztoku na straně oceánu. Tam se setkávají s rozpuštěným CO_2 a relativně s vysokou koncentrací protonů, což podporuje tvorbu mravenčí kyseliny mravenčí (HCOOH) nebo mravenčanu (HCOO-). Tento elektrochemický systém umožňuje celkovou reakci mezi H_2 a CO2, která není pozorována za standardních podmínek. reakčních podmínek.
(B) Schéma reaktoru s vloženým mikrofotografickým snímkem rozhraní a sraženinou na rozhraní.

Hudson et al. (2020) PNAS 117, 22873-8.

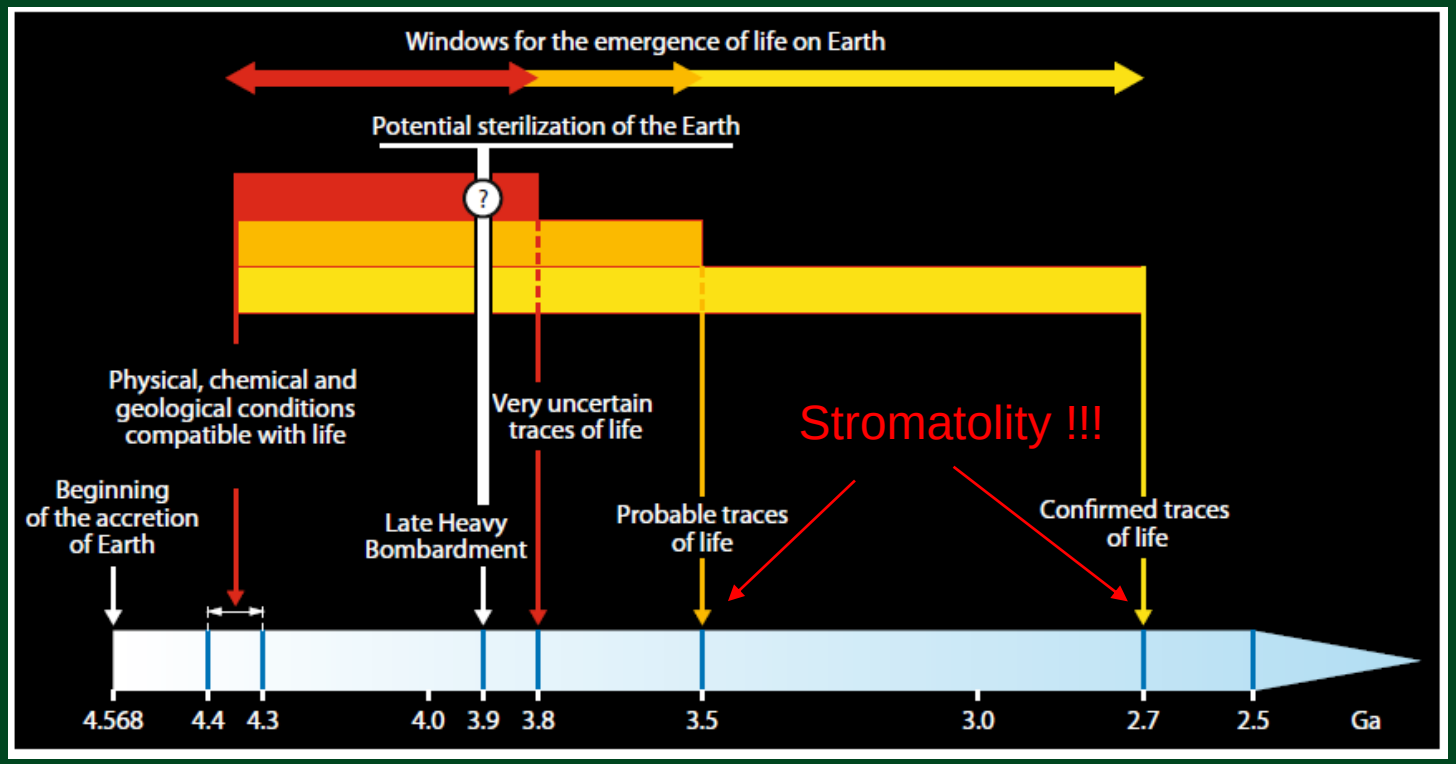
„White smokers“ - energie pro život ?



Navrhovaná evoluce metabolismu u archeí a bakterií. (a) Navrhovaný uhlíkový a energetický metabolismus poháněný přirozenými protonovými gradienty v ancestrální protobuňce s netěsnou membránou. Ech, hydrogenáza, Fd, ferredoxin. Pro zjednodušení je na tomto obrázku zobrazena pouze větev -CH3 postulovaného ancestrálního acetyl-CoA. R je jedním z řady kofaktorů, které se liší mezi metanogeny a acetogeny. Směr toku protonů přes Ech je rozhodující a liší se v bodě c). (b) Zjednodušený uhlíkový a energetický metabolismus metanogenů (archeí). Ech redukuje ferredoxin pomocí protonového gradientu jako v bodě (a), ale nyní je zde požadavek na čerpání iontů k regeneraci membránového potenciálu.
Toho se dosahuje elektronovou bifurkací za použití H_2 k současné redukci ferredoxinu a heterodisulfidu (-S-S-). Methanogeneze regeneruje membránový potenciál prostřednictvím nové iontové pumpy (Mtr), která se mohla vyvinout z Na+/H+ antiporteru. (c) Zjednodušený uhlíkový a energetický metabolismus acetogenů (bakterií). Ech se obrací, oxiduje ferredoxin a vytváří membránový potenciál. Nyní je třeba regenerovat redukovaný ferredoxin, čehož se dosahuje prostřednictvím odlišné formy elektronové bifurkace, která využívá H_2 k současné redukci ferredoxinu a NAD+. Acetogeny však již nemohou využívat ferredoxin k redukci CO_2, a proto musely vyvinout novou cestu metabolismu uhlíku, která místo ferredoxinu využívá ATP a NADH. Nové cesty získávání energie jsou znázorněny tečkovanými čarami.

Sojo et al. (2016) The Origin of Life in Alkaline Hydrothermal Vents. Astrobiology 16, 81-97.

Zrození života: před 4,4 – 2,7 mld. let



- vznik života, vznik hlavních biochemických drah, vývoj posledního společného předka všech moderních živých bytostí a první divergence od tohoto společného předka, nelze datovat. Jediné, co můžeme vědět, je, že všechny tyto události se odehrály v období mezi dvěma určitými hranicemi. První je ta, kdy se otevřelo okno příznivé pro vznik života: to odpovídá období, kdy se vytvořily příznivé fyzikálně-chemické a geologické podmínky, tj. 4,4-4,3 Ga. Druhým je zřejmě okamžik, kdy si díky nálezu nejstarších fosilních stop života můžeme být naprosto jisti, že se život etabloval, tj. 2,7 Ga (možná již 3,5 Ga). Mezi těmito dvěma hranicemi nemáme žádnou představu o době, která byla nutná k ustavení procesů, jež vedly ke vzniku života, ani o době potřebné ke vzniku hlavních přechodů rané evoluce.

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

„Dnešní“ kyslíkaté stromatolity – asociace sinic

Stromatolity Hamelin Pool, Western Australia 2007 (Allen 2016, Frontiers in Microcrobiology 7, 1784)

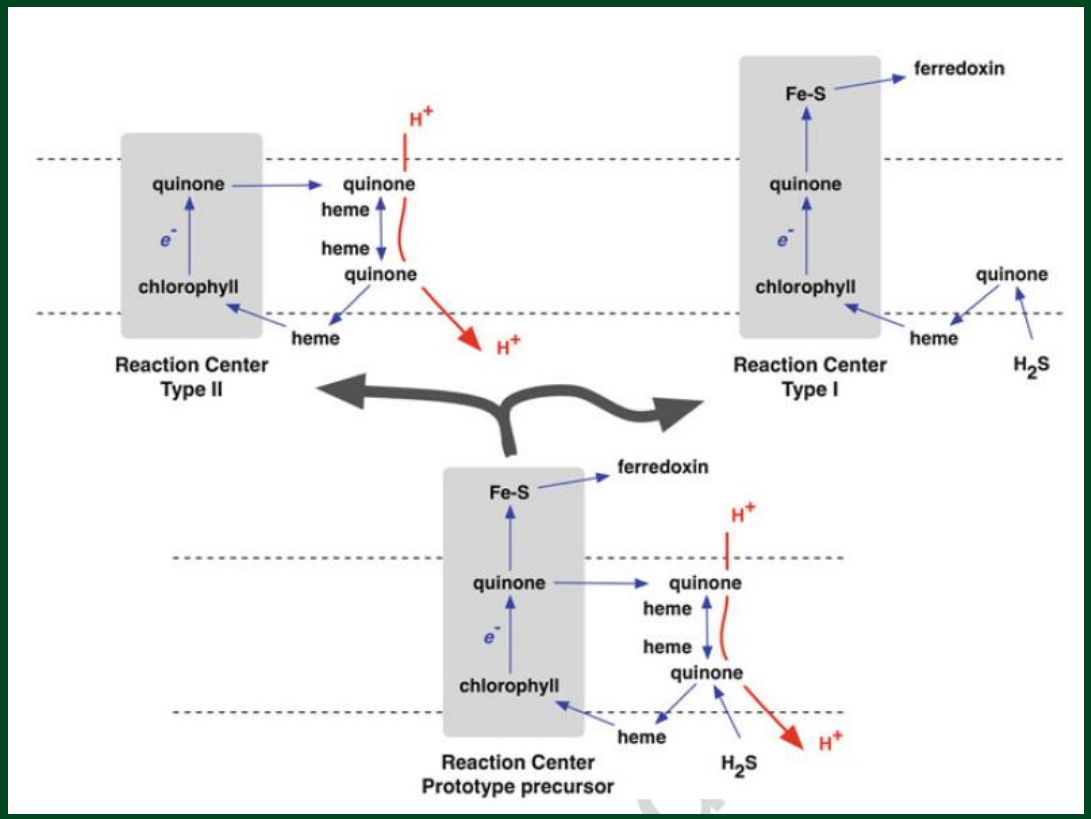
„Nekyslíkaté“ stromatolity – asociace bakterií

- Stromatolity byly hojně rozšířeny v období před 3,5 a 2,7 mld let, tedy před příchodem sinic a kyslíkaté fotosyntézy (podle analýzy - vrstvy pyritu (FeS_2) – bezkyslíkaté prostředí)
- Hypotéza - stromatolity - bakterie s oběmy typy reakčních center (typ I a II FeS a Q – duplikace protocentra) (Allen 2016, Front Microbiol 7, 1784) v okolí sirných hydrotermálních pramenů (výtok H_2S) do mělké vody střídáním režimů anoxygenního fotosyntetického metabolismu. Tyto změny v v koncentraci H_2S (deště, přiliv – odliv) způsobily změny v genové expresi
- nejpozději před 2,7 mld lety, mutace vyřadila redoxní genetický přepínač což vedlo ke konstitutivnímu propojení reakčních center typu I i II a následně ke schopnosti získávat elektrony z manganu a následně z vody. Tímto krokem první sinice získala dramatickou výhodu emancipace od limitujících zásob anorganických donorů elektronů, produkovala volný molekulární kyslík jako odpadní produkt a iniciovala tak Velkou oxidační událost v historii Země na přechodu z Archean do období Proterozoikum.

Stromatolite-type formations aged 3.45 Ga at North Pole (Pilbara craton, Western Australia). (Photos: M. van Zuilen and P. López-García.)

M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Fotosyntetické bakterie



Divergence struktury a funkce reakčního centra. Prototyp fotosyntetického reakční centra se rozděluje na samostatná reakční centra typu I a typu II, z nichž každé si zachovává část své původní funkce. Primárním donorem elektronů je molekula chlorofylu. Reakční centrum typu I je adaptováno na využití H_2S s železo-sirným proteinem ferredoxinem jako dominantním sekundárním akceptorem elektronů. Reakční centrum typu II se zase z velké části věnuje cyklickému transportu elektronů, re-redukci chinonu. V centru typu II je chinon dominantním akceptorem elektronů a slouží také v Q-cyklu s přenosem protonů, na němž se podílejí cytochromové hemy jako přenašeče elektronů, a nakonec vrací elektrony chlorofylu.

Allen 2014: Origin of Oxygenic Photosynthesis from Anoxygenic Type I and Type II Reaction Centers. In Golbeck and van der Est (eds.), The Biophysics of Photosynthesis , Springer 2014

„Nekyslíkaté“ stromatolity – asociace bakterií

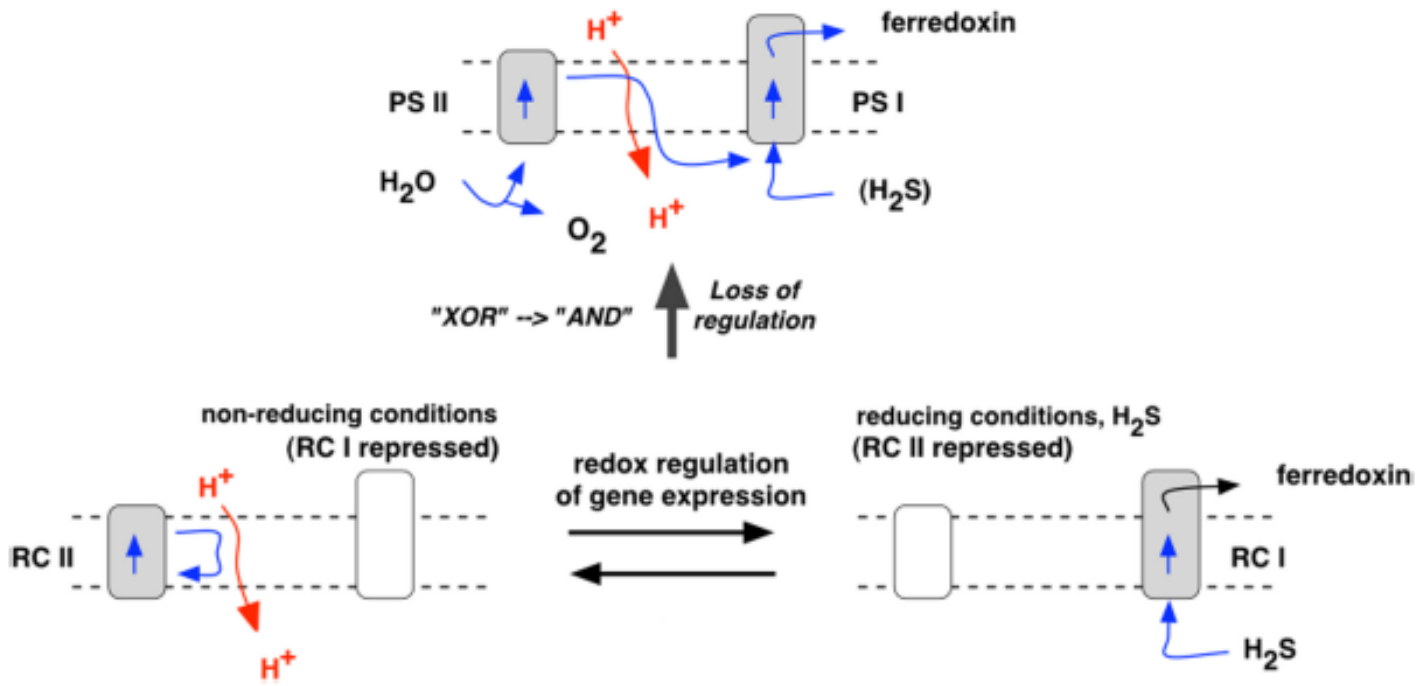
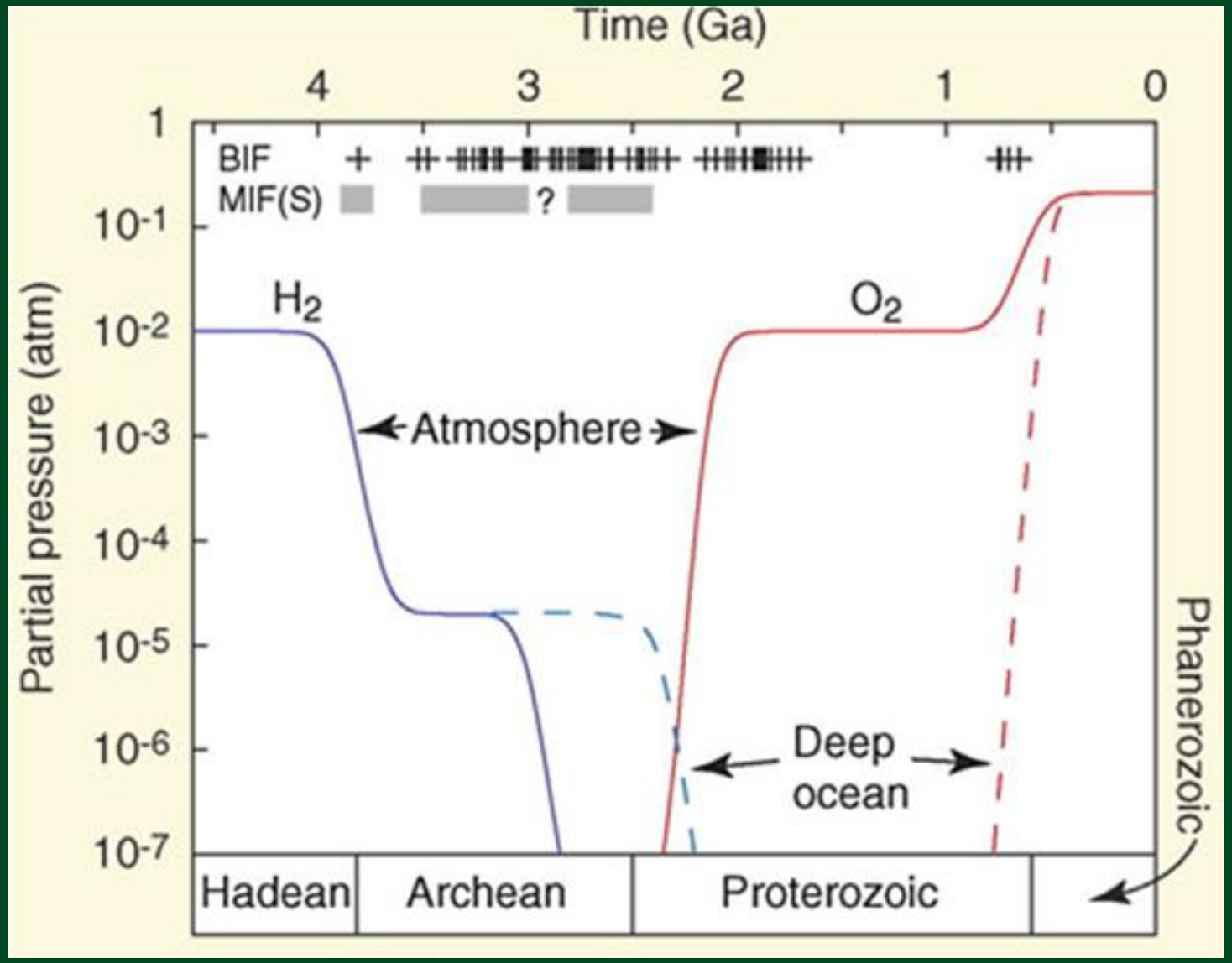


FIGURE 4 | The hypothetical protocyanobacterium. Expression of Type I center genes in the presence of H_2S gives a Type I reaction center (RC I) and is accompanied by repression of Type II genes. In the absence of H_2S, Type II genes are induced, giving a Type II reaction center (RC II), and Type I genes become repressed. Subsequent impairment of redox regulatory control allows expression and co-existence of both Type I and Type II reaction centers, with complementary functions. In place of H_2S, the Type II center, as PS II, oxidizes water, liberating oxygen, and donates electrons to the Type I center, as PS I. The proposed loss of the redox regulatory switch replaces the logical (Boolean) relation "Type I ***XOR*** Type II" (each type excluding the other) with "Type I ***OR*** Type II" (either is, and both are, allowed). This in turn leads to "Type I ***AND*** Type II" when interdependency of PSs I and II is established in the non-cyclic electron transport chain of oxygenic photosynthesis.

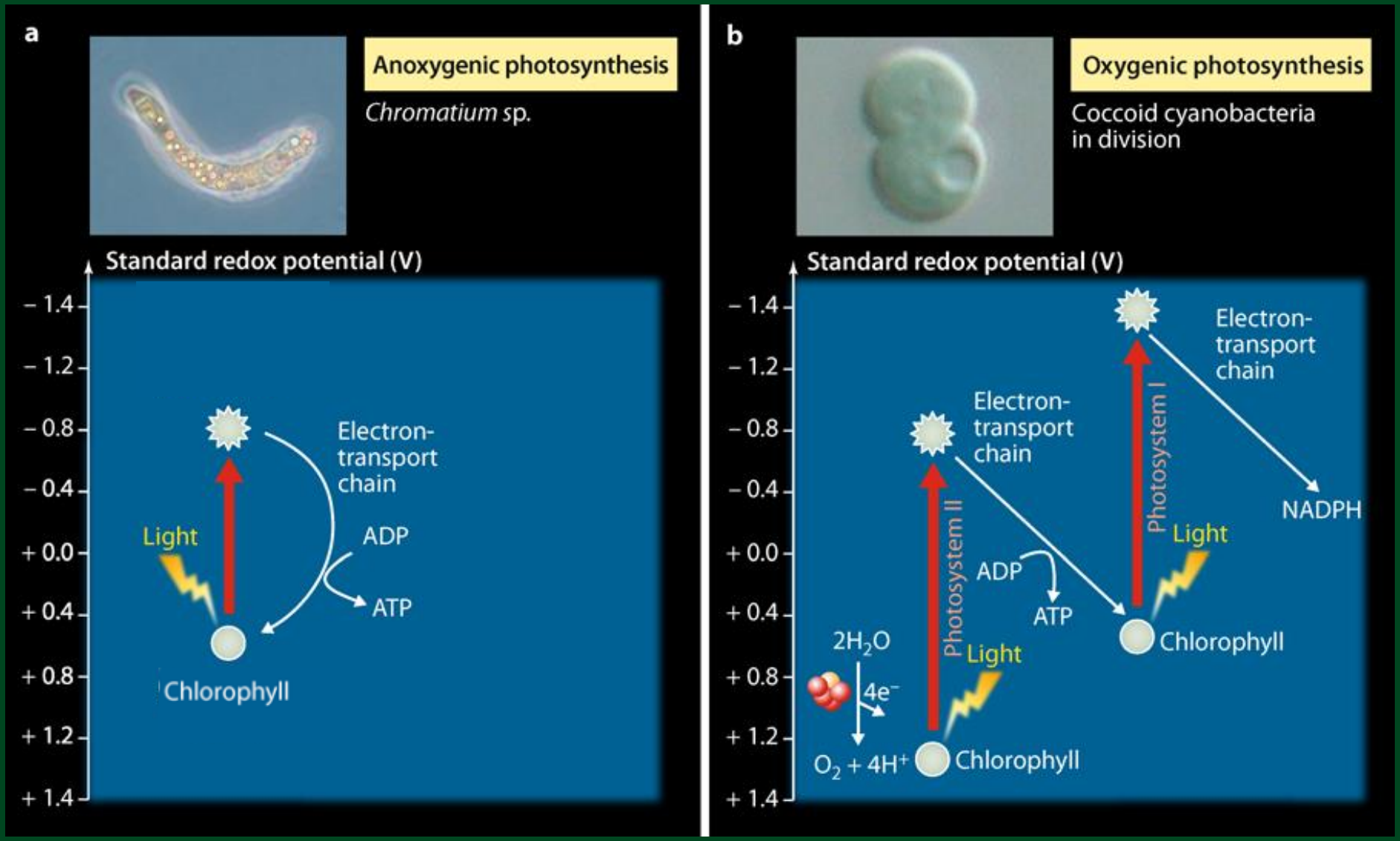
Allen 2014: Origin of Oxygenic Photosynthesis from Anoxygenic Type I and Type II Reaction Centers. In Golbeck and van der Est (eds.), The Biophysics of Photosynthesis , Springer 2014

Změna atmosféry Země



M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

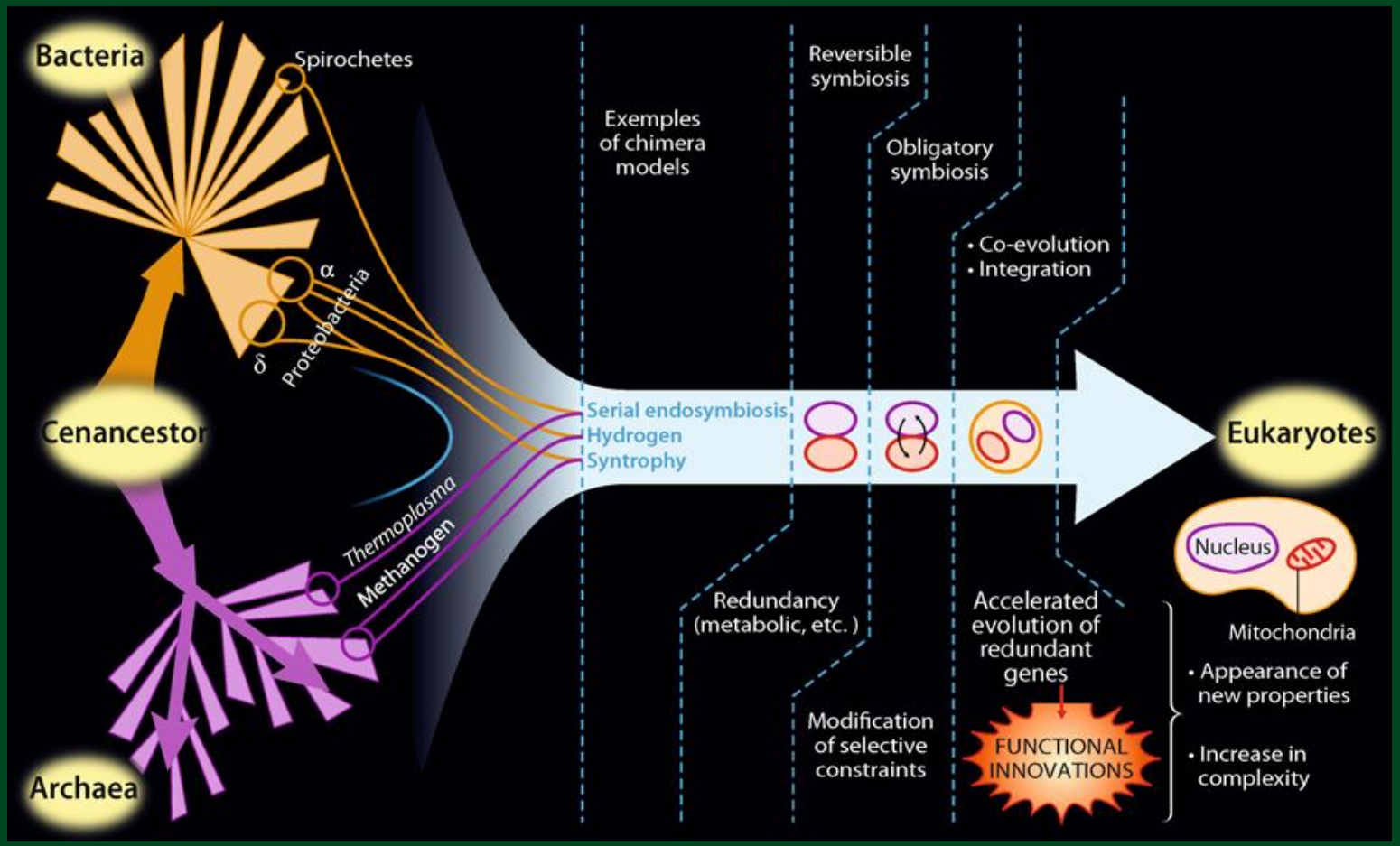
„Dnešní“ stromatolity – asociace sinic



M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Vznik eukariotických organismů

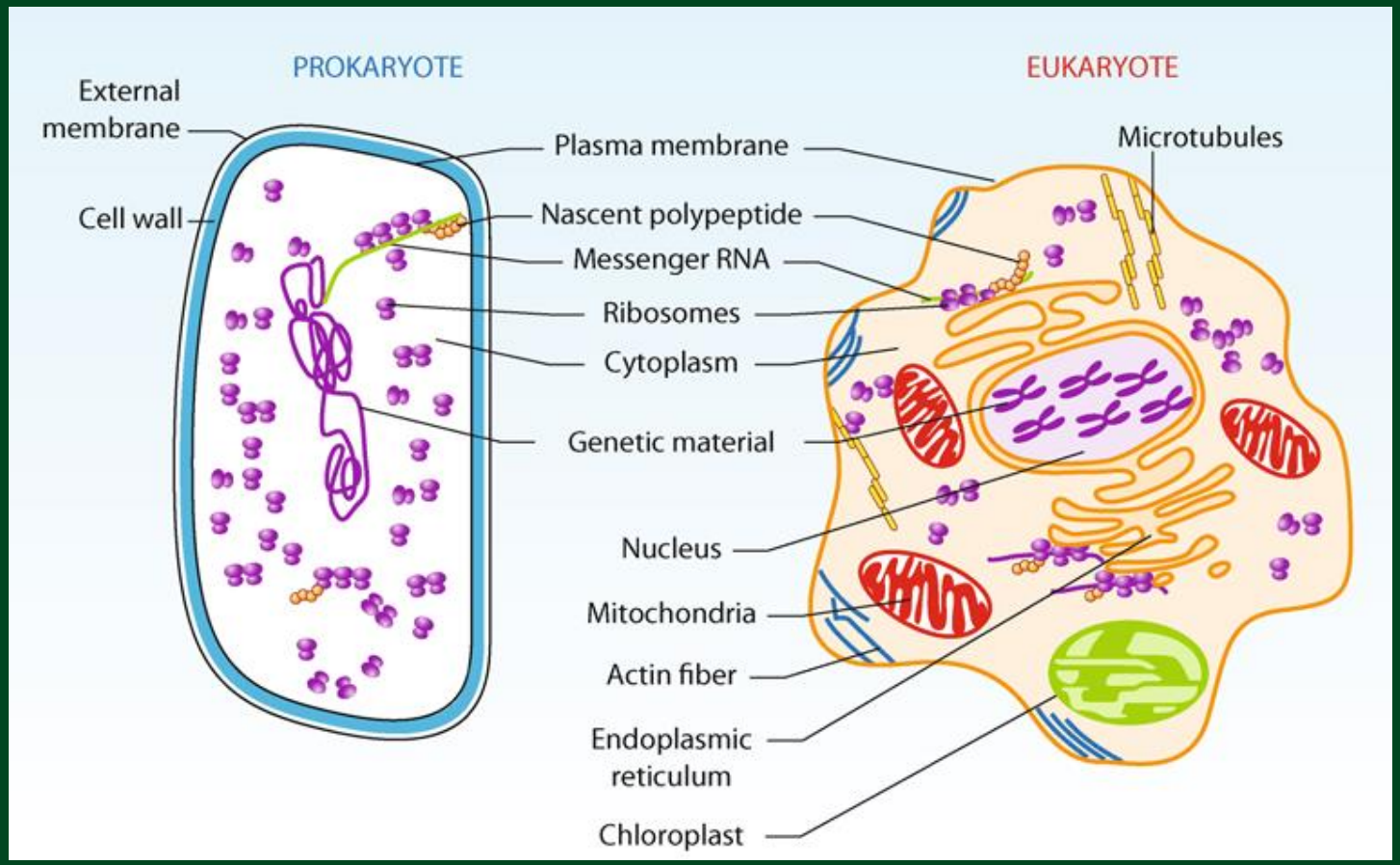
Před 2 mld. let - schéma znázorňuje základní koncepty modelů (chimérické), kde jsou eukaryota výsledkem jedné (nebo dvou) symbiotických událostí mezi zástupci bakterií a archeae. Genetická redundance umožňuje zvýšení evoluční rychlosti "duplikovaných" genů, a vytváří tak podmínky, které jsou obzvláště příznivé pro vznik nových vlastností. Snad právě v takovéto školce evolučních inovací se zrodila eukaryota.



M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

Vznik eukariotických organismů

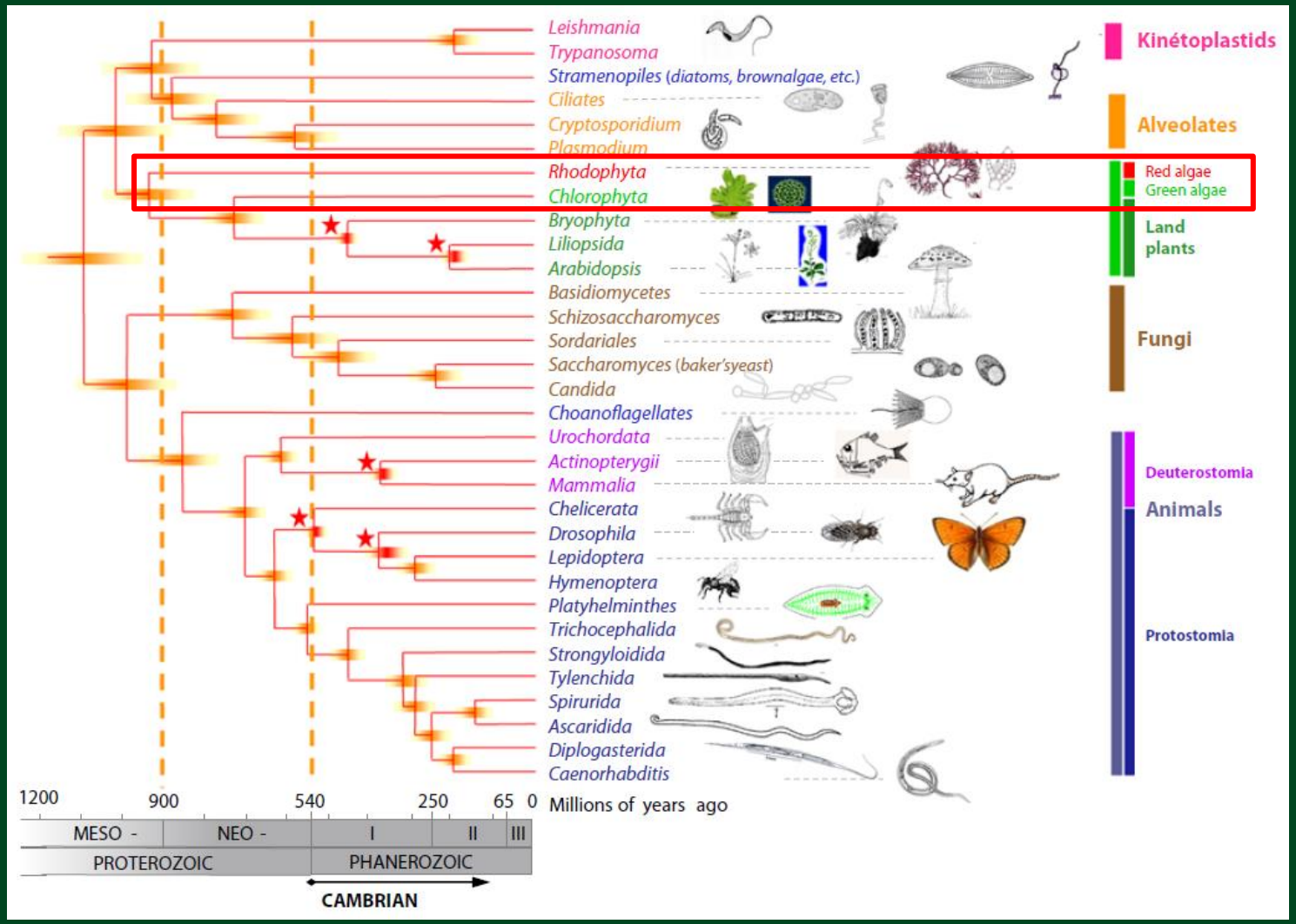
Schematická struktura buňky prokaryot a eukaryot. Eukaryotní buňky se vyznačují třemi základními znaky: jádro, v němž je uložen genetický materiál; organelami ohraničenými membránami: mitochondriemi, v nichž probíhá dýchání, a v případě fotosyntetických eukaryot chloroplasty; a vysoce vyvinutým cytoskeletem tvořeným aktinovými vlákny a tubulinovými mikrotubuly, které jim mimo jiné dávají schopnost provádět fagocytózu. Prokaryotní buňky (bakterie a archea) spojuje základní vlastnost: chybí jim jaderná membrána, transkripce a translace jsou spojeny dohromady.



M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

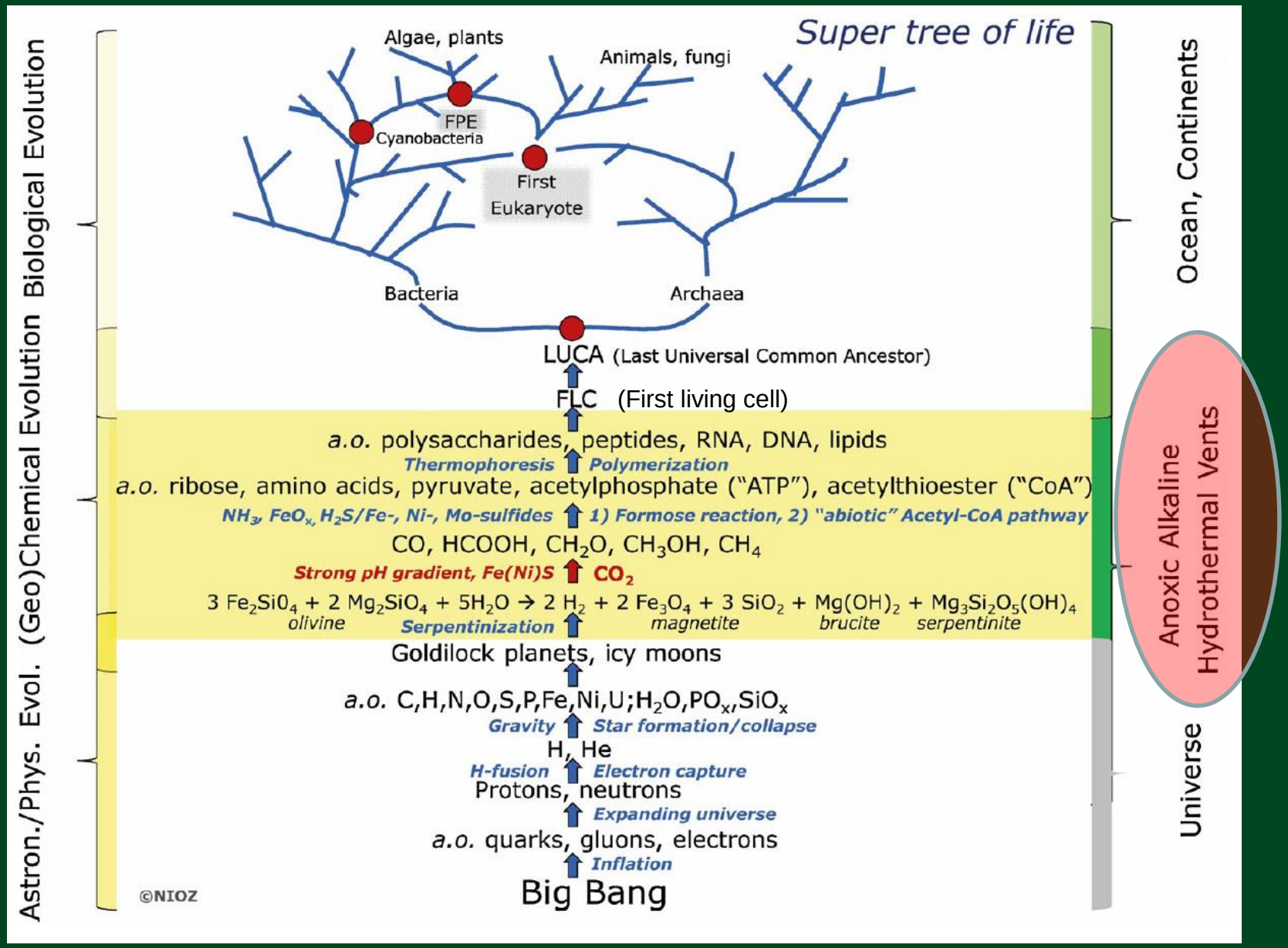
Kambrická exploze

Zvýšení koncentrace kyslíku - vznik mnohobuněčné eukariotních organismů



M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

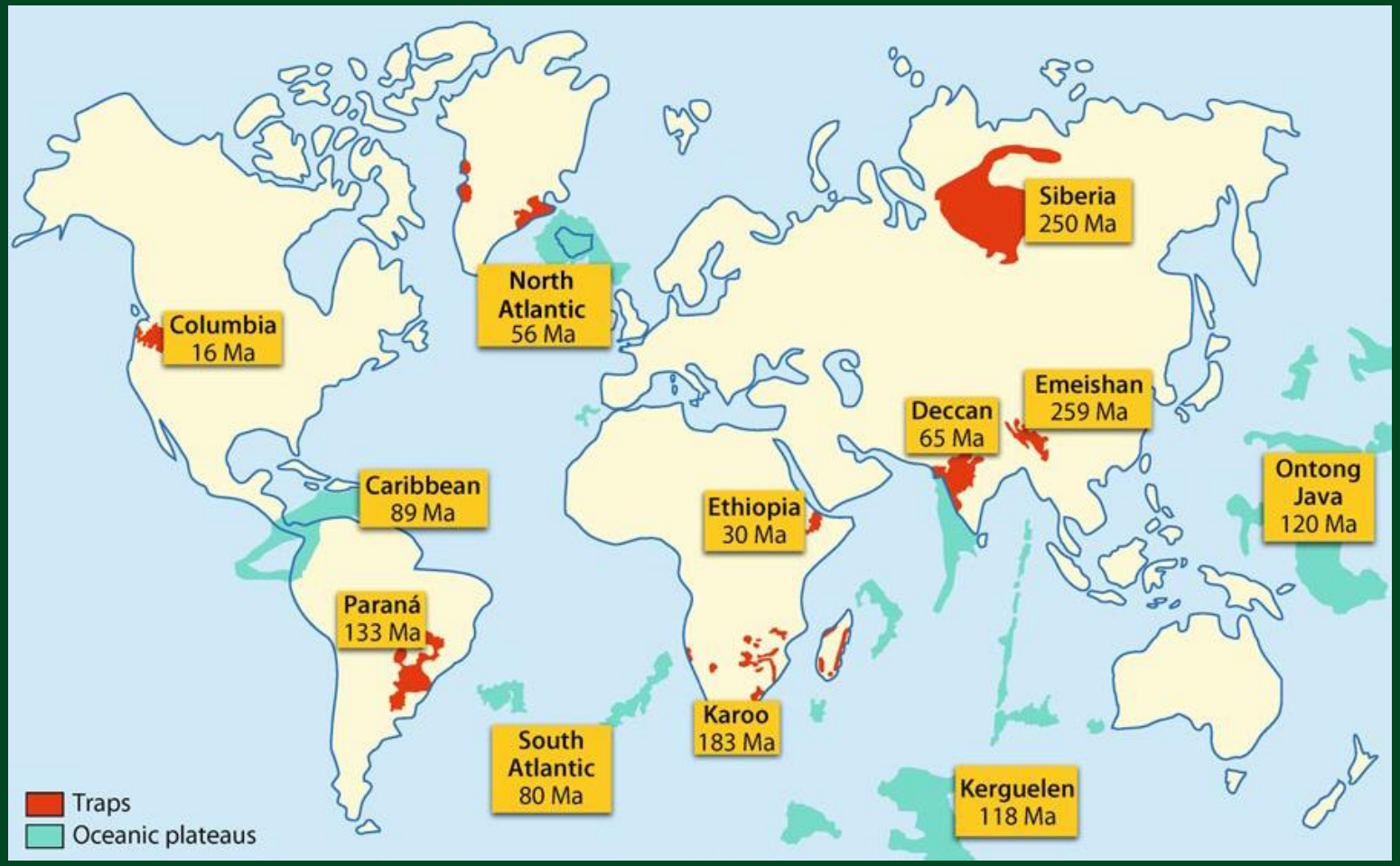
Super tree of life on the Earth



E. Camprubí (2019) The emergence of life. Space Sci Rev 215:56

Vulkanické katastrofy

Vulkanická činnost za posletních 250 mil let. - důsledky pro životní prostředí mohly být katastrofální a mohly dokonce přispět k masovému vymírání (vymíracím krizím). Před 250 mil let – „mass extinction event“ (přelom Permu a Triasu) – největší vymírání druhů na planetě – díky erupci supervulkánu na Sibiři



M. Gargaud et al., Young Sun, Early Earth and the Origins of Life, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012