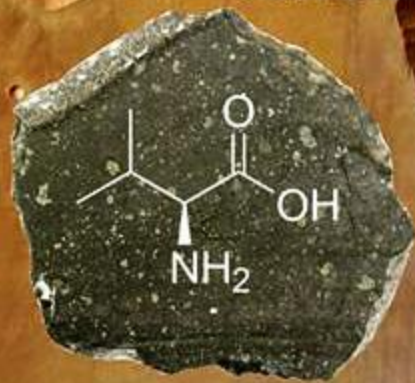


EXISTE VIDA EXTRATERRESTRE ?

J.A. DE FREITAS PACHECO

UNIVERSITÉ DE LA CÔTE D'AZUR



Como definir a “Astrobiologia”?

Astrobiologia é um campo multidisciplinar do conhecimento, cujo objetivo maior é fornecer elementos para a elaboração de uma resposta a questão:

“Existe vida extraterrestre?”

Procura de vida extraterrestre - exige uma compreensão prévia do que chamamos ou definimos como --- “vida”

Erwin Schrödinger (1946) – “What is life”?



Caracterização da “vida” via dois processos:

Replicação – consequência da estabilidade quântica molecular (“from order to order”)

Metabolismo – capacidade da célula extrair entropia negativa do ambiente (“from disorder to order”)

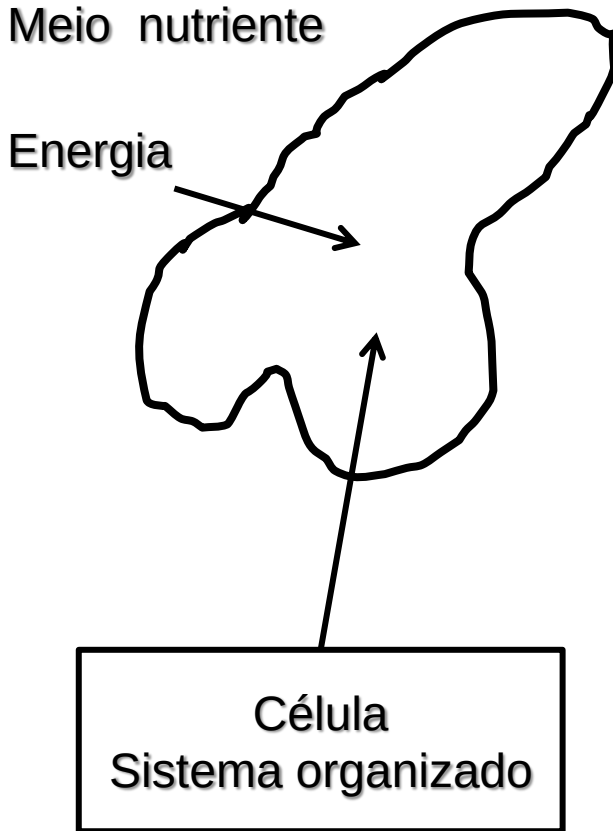
Se a célula extrai energia do meio

$$(\Delta E)_{\text{int}} > 0 \longrightarrow (\Delta S)_{\text{int}} > 0$$

Em contradição com o fato que a célula é um sistema organizado, implicando

$$(\Delta S)_{\text{int}} < 0 \text{ e } (\Delta S)_{\text{ext}} > 0$$

Tal que $(\Delta S)_{\text{int}} + (\Delta S)_{\text{ext}} > 0$

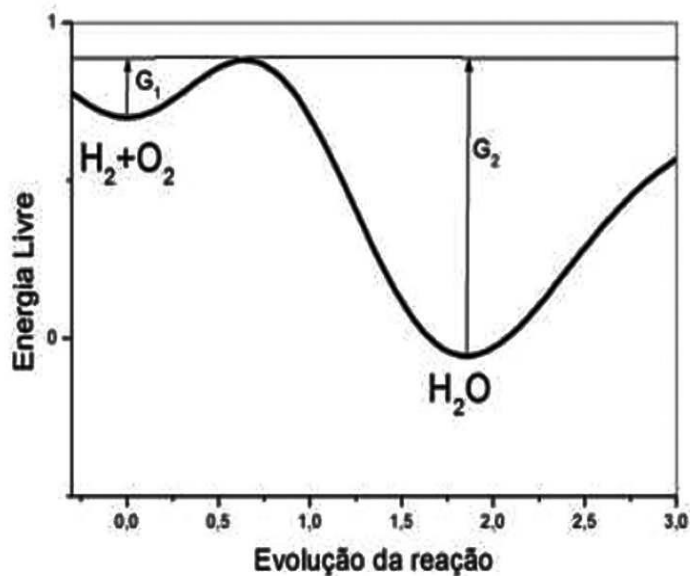


Necessariamente o sistema célula+meio não se encontra em equilíbrio termodinâmico.



Replicação de moléculas complexas em laboratório via reações autocatalíticas (von Kiedrowski, 1986)

“Estabilidade dinâmica” das reações autocatalíticas desenvolvido por Addy Pross em 2004 – *um sistema de reações químicas passa de um estado menos a um estado mais estável.*



Produção de água via uma mistura de hidrogênio e oxigênio necessita de uma certa energia G_1 para engatilhar a reação – Reação inversa não ocorre espontaneamente pois necessita de energia G_2 para que ocorra a dissociação da molécula.

Custo energético – reações autocatalíticas



Os processos químicos que levam à emergência da vida estão relacionados com uma cadeia de reações autocatalíticas, que envolvem ciclos de autoalimentação que caracterizam o sistema (Robert Pascal 2012)

A taxa de transformação dos reagentes Γ em função da barreira de potencial G_1 é dada pela equação de Eyring

$$\Gamma = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{G_1}{RT}\right)$$

Considerando-se temperaturas nas quais a água permanece no estado líquido e meias vidas entre 1s e 10^9 s (com $\Gamma \sim 1/\tau_{1/2}$) obtemos que

$$G_1 \sim 70 - 150 \text{ kJ/mol}$$

O Conceito de Vida

Addy Pross - “cadeia de reações estáveis dinamicamente e autossustentáveis que resultam de uma reação química de replicação”

Gerald Joyce - “sistema de reações químicas autossustentáveis submetido aos princípios da evolução darwiniana” (definição adotada no programa “Origins” da NASA)

Pross + Joyce - “cadeia de reações estáveis dinamicamente e autossustentáveis, que resultam de uma reação química de replicação submetida aos princípios da evolução darwiniana ”

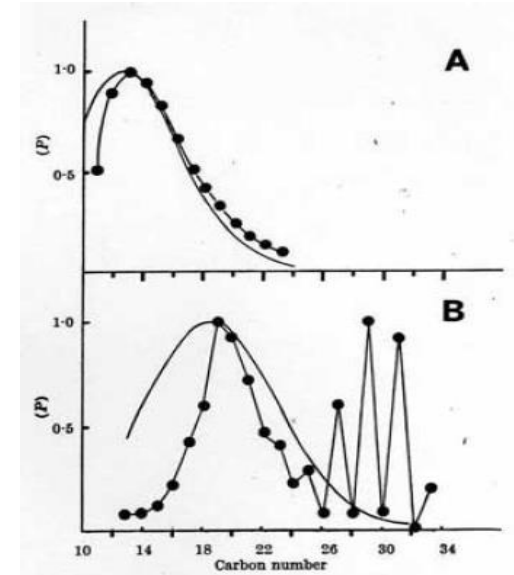
Vida = consequência de uma cadeia de reações resultantes de ciclos contínuos de replicação, mutação, complexificação e seleção. O processo deve ser capaz de diminuir sua entropia às expensas da energia retirada do ambiente.

Experiências visando detectar a presença de vida em um dado planeta contendo uma atmosfera

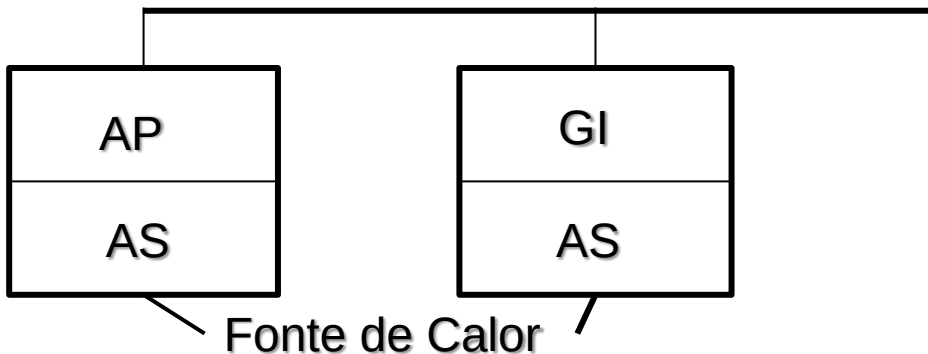


James Lovelock

Polímeros de origem orgânica (B) apresentam picos na distribuição de peso molecular. Isso não ocorre para polímeros inorgânicos (A)



AS = amostra superfície; AP = amostra da atmosfera;
GI = gás inerte (Ar ou Ne)



Mesmo sinal térmico
ausência de vida

Sinais térmicos distintos
presença de vida

Emergência da Vida - Premissas



Norman Pace

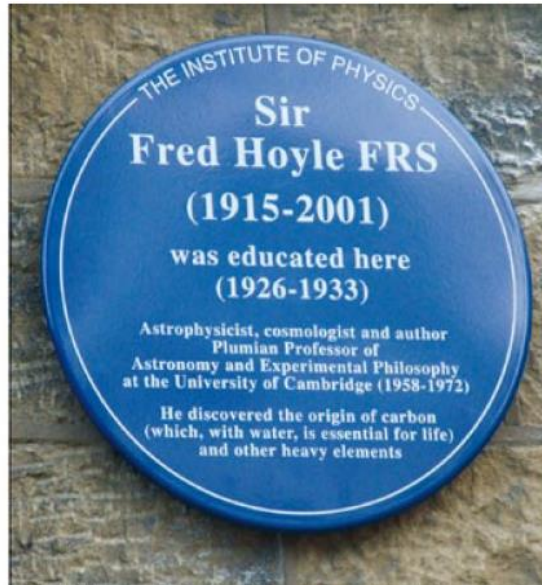
As bases químicas da vida devem ser universais (porque são otimizadas) e baseada na capacidade de formação de cadeias moleculares pelo átomo de carbono (outras possibilidades, como o Si, excluídas pelas observações astronômicas) → Podemos extrapolar o que aprendemos sobre a emergência da vida na Terra.

A vida pode existir na ausência de fontes de luz através do uso de fontes inorgânicas de energia (exemplo, micro-organismos quimiolitótrofos que se desenvolvem em uma biosfera subterrânea – Cunningham e outros, 1995)

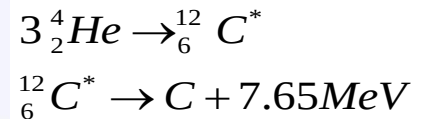
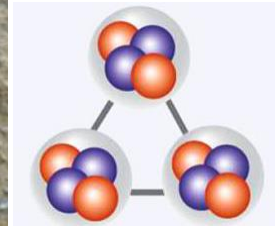
Definir a condição de habitabilidade apenas pelo critério da presença de água líquida é por demais “irreal” (estado da água depende não somente da temperatura mas também da pressão externa e da quantidade de sais dissolvidos)

Quando um astrofísico se intromete...

Reações nucleares iniciais: ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^8_4\text{Be} \xrightarrow{6,7 \times 10^{-17} \text{ s}} 2 {}^4_2\text{He}$



Fred Hoyle em 1953 prediz a existência de um estado excitado do carbono que permitiria a reação triple- α



Estado excitado predito observado por Whaling no Kellog Radiation Laboratory

Se o estado de Hoyle não existisse ou se houvesse uma diferença de frações de MeV na configuração dos níveis do carbono, este elemento não existiria no Universo, assim como a vida!

Se aceitarmos o princípio de Pace, o estudo da emergência da vida na Terra pode nos guiar na procura de vida extraterrestre

Sequência de eventos aceita para emergência de vida na Terra - **primeira etapa:**

Contribuição endógena – reações químicas envolvendo CH_4 , NH_3 , H_2S , CO , CO_2 , PO_4 e $\text{H}_2\text{O} \Rightarrow$ produção de monômeros (essencialmente aminoácidos)

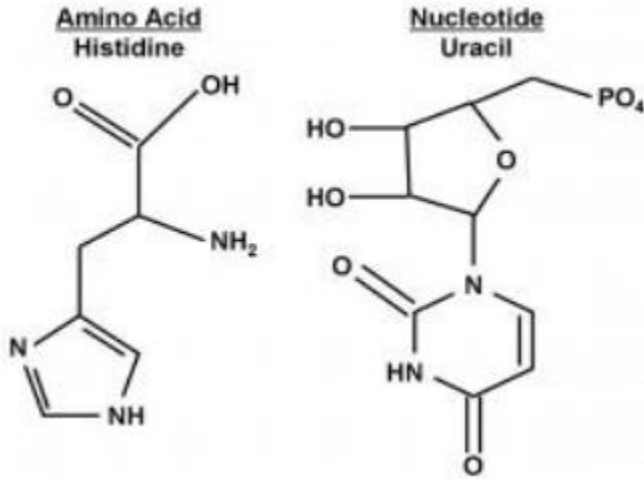
Contribuição exógena – cometas e condritos carbonados (talvez dominante)

Meteorite fall in Murchison (Australia) – detection of about 70 different amino acids, purines (adenine, guanine) and pyrimidines (uracil) , bases of RNA and DNA

amino acid	Murchison	Urey-Miller
glycine	1.00	1.00
alanine	1.00	1.00
α -amino-butyric acid	0.75	1.00
α -amino isobutyric acid	1.00	0.50
pipecolic acid	0.25	0.12
sarcosine	0.50	0.75
glutamic acid	0.75	0.50
N-Ethylglycine	0.50	0.50
valine	0.75	0.50
aspartic acid	0.75	0.75
norvaline	0.75	0.75
isovaline	0.50	0.50
proline	0.75	0.25

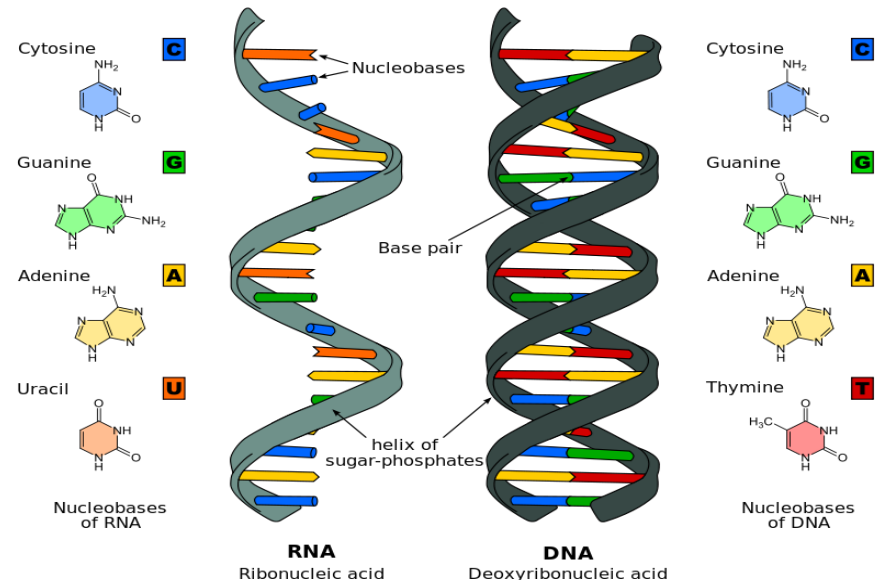
Composição do meteorito de Murchison – moléculas orgânicas datando da origem do sistema solar sobrevivem à entrada na atmosfera e ao impacto.

Segunda etapa – formação de polímeros a partir de monômeros



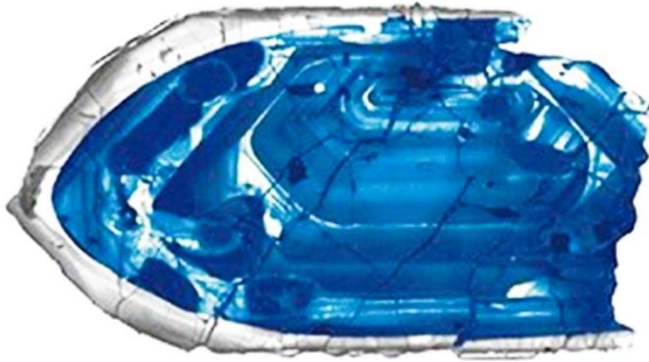
Experiência de Menor-Salvan e outros (2007) - a partir de uma solução de ureia (NH₂-CO-NH₂) submetida alternativamente a ciclos de calor e resfriamento, bem como descargas elétricas, foram produzidas s-triazinas, pirimidinas e adenina.

Terceira etapa – formação do RNA e DNA a partir de polímeros – pilares da replicação – Em presença de diamidofostato (DAP), ambas moléculas podem ter sido contemporâneas (Krishnamurthy e outros, 2020)



Registros fósseis de vida passada:

Estromatólitos – estruturas orgânicas (CaCO_3)
Formadas por cianobactérias que absorvem o CO_2 atmosférico – mais velhas → 3,5 Ba

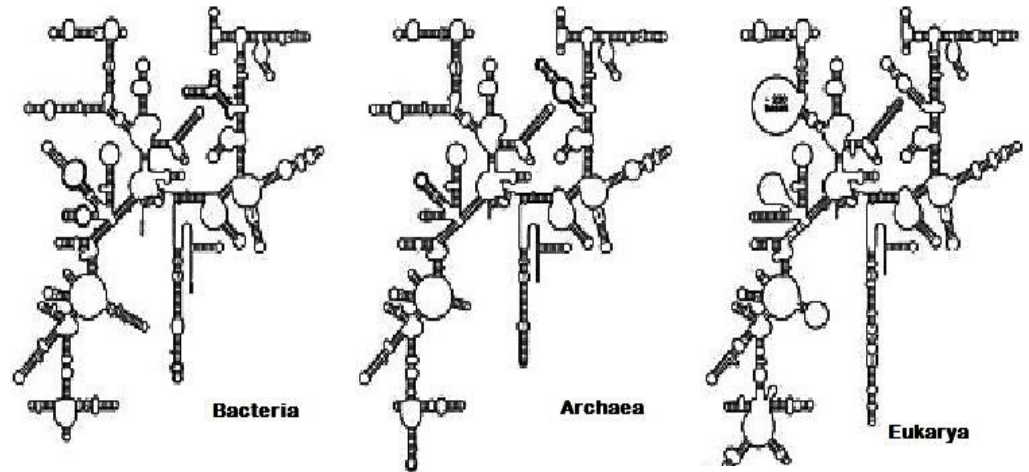
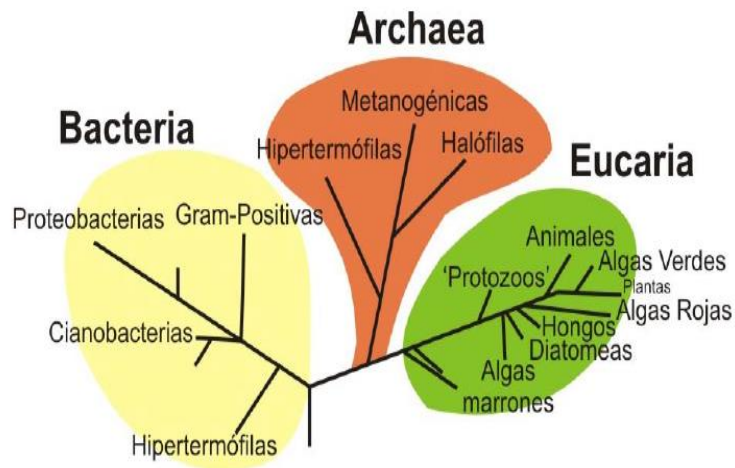


Exemplo mais marcante – descoberta por Bell e outros (2015) de incrustações de grafite em cristais de zircão (ZrSiO_4) com idade de 4,1 Ba

Razão isotópica $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ sugere origem biogênica

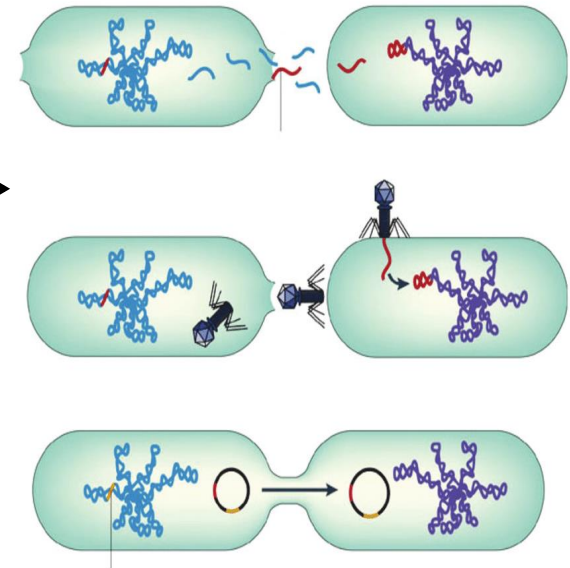
Se a interpretação de Bell e outros estiver correta, a vida pode ter se desenvolvido na Terra em uma escala de tempo muito curta ~ 400 Ma

História filogenética registrada na sequência de nucleotídeos presentes em células dos diferentes filos – **Bacteria, Archea e Eukarya**



Uso **rRNA** (Woese 1987) – estabelecimento de árvore filogenética e do ancestral comum
Problema com THG

LUCA (Ouzounis e Kyrpides 1994) → cerca de 572 genes presentes em todos seres vivos atuais - Sequência da enzima NDK (nucleosídeo difosfato quinase) – sensível a temperatura ambiente – LUCA era um “termofílico” (Mirkin e outros 2003)



O “novo” LUCA

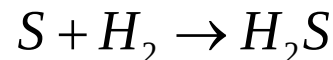
William Martin e outros (2021) – 6,1 milhões de proteínas codificadoras distribuídas em 286 000 famílias de genes

Genes comuns aos 3 filos – 30

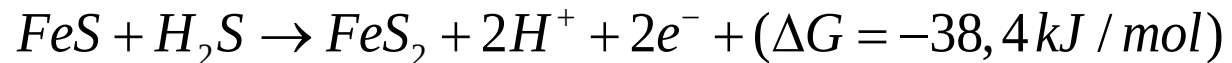
Excluindo-se o filo Eukarya – 11 000 genes – filtragem THG – 355 genes

Retrato de LUCA:

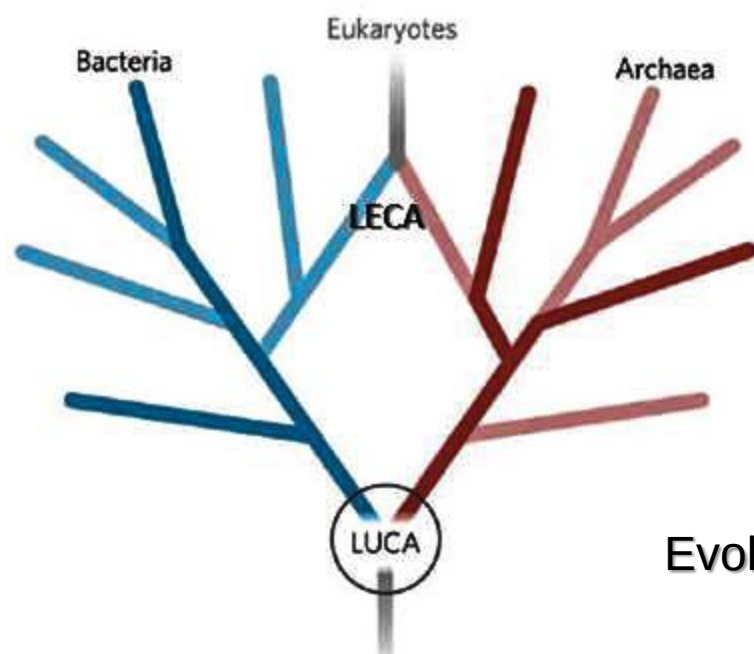
Anaeróbico, termofílico e autótrofo - capaz de produzir proteínas, replicar via DNA e estocar energia via moléculas ATP (trifosfato de adenosina) - metabolismo: hidrogênio como doador de elétrons



Exemplo →



Nova árvore filogenética ?



Filo Eukarya, consequência de um processo de “endossimbiose”

Fusão de duas células procariotas : uma archaea heterotrófica ingere uma protobactéria alfa sem digerí-la, produzindo um “simbionte”

Evolução do simbionte – núcleo e mitocôndrias

Estudo recentes sugerem que LECA surgiu ~ 1,8 Ba (Rasmussen e outros 2008)

Temperaturas ambientes: LUCA - 350 – 370 K LECA - 280-300 K

Cenário “Universal” para Emergência de Vida

Presença de moléculas orgânicas complexas em nuvens interestelares densas, “ninhos” de formação estelar

“Blocos” da vida (20 aminoácidos + 5 nucleotídeos) tem quiralidade levógira, que pode ser produzida por radiação circularmente polarizada detetada nas vizinhanças de protoestrelas



Louis Pasteur, 1848

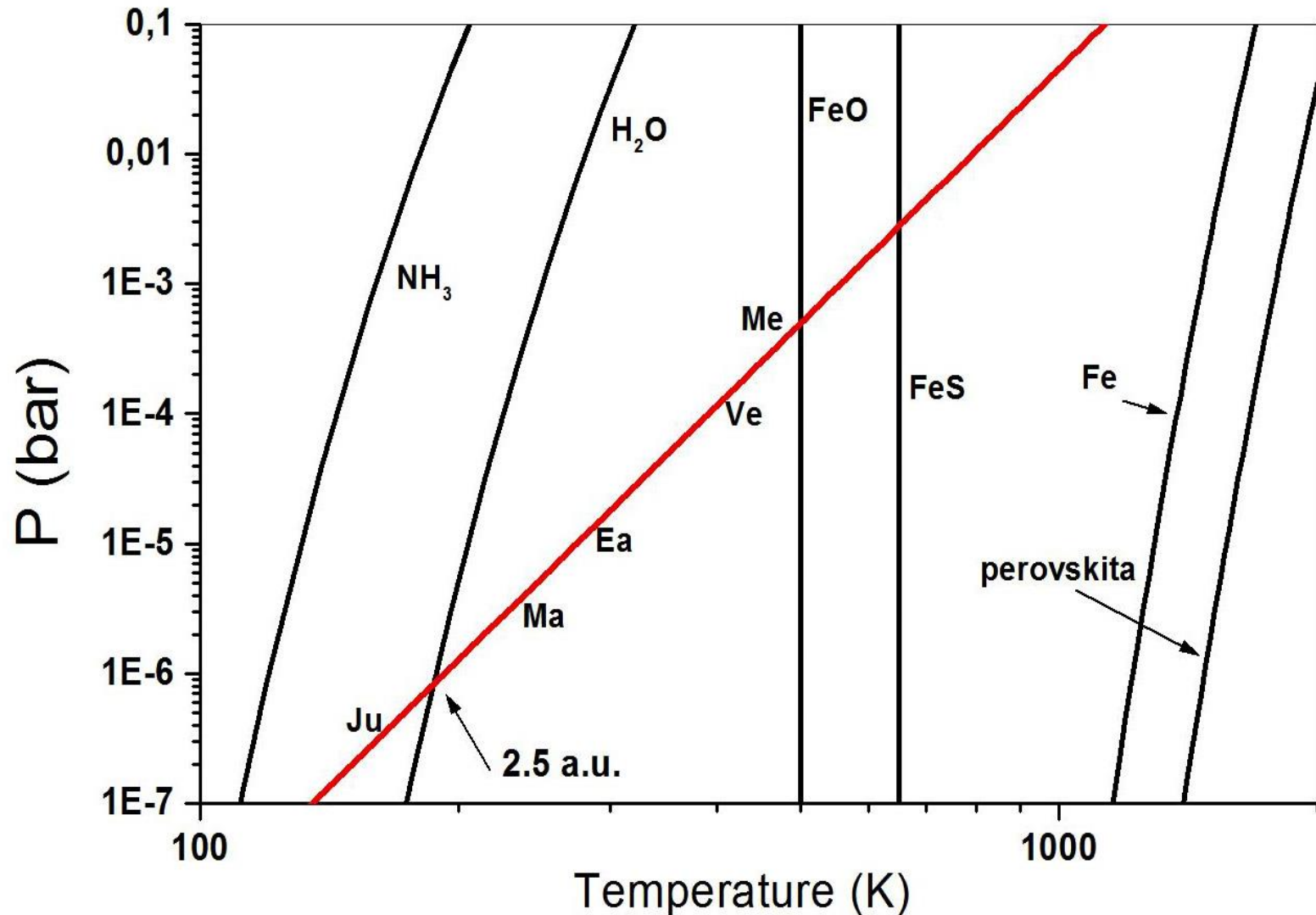


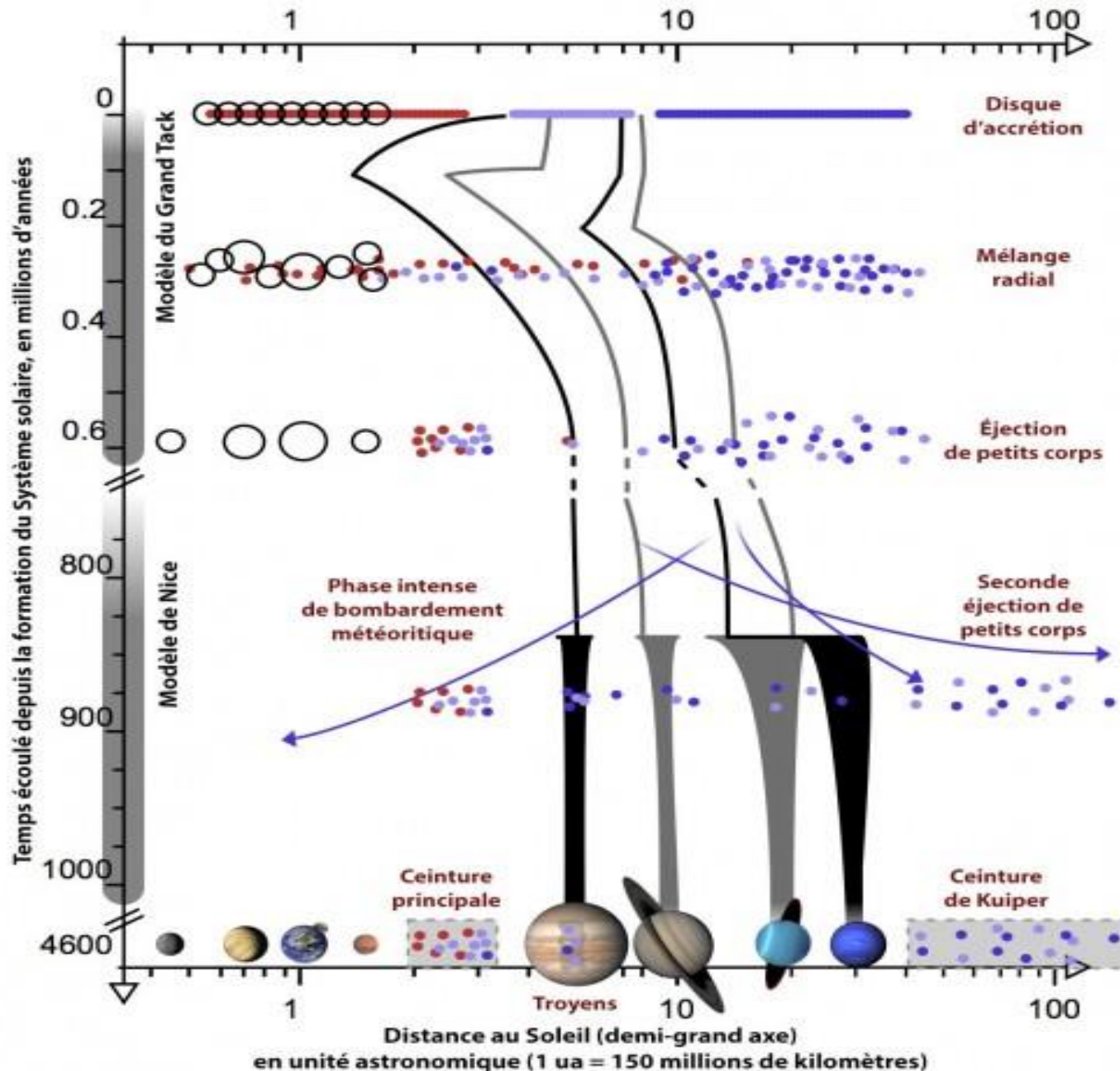
Disco de cometas em Fomalhaut
Herschel Space Telescope

Planetesimais e cometas que se formam na “zona da água” em discos protoplanetários contribuem ao aporte de água e “blocos” da vida aos planetas rochosos

Diferenciação física no disco protoplanetário

Diagrama de fase para o disco primitivo





Evolution of the Solar System

Combination of the Big Tack + Nice

Distribution of $\sim 10^5$ asteroids from Sloan (DeMeo & Carry 2014)

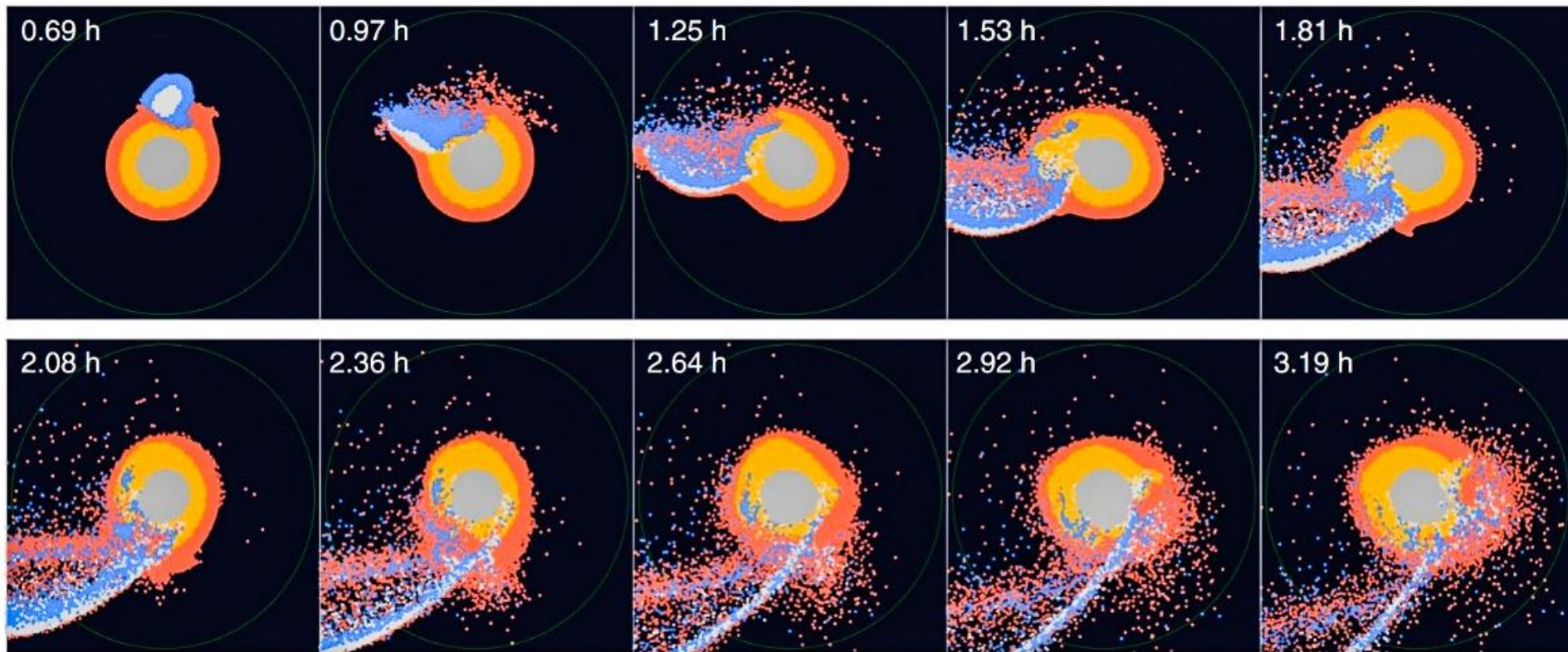
Large asteroids (> 50 km) are where they should be

Smaller are mixed due to migration of large planets

O Cenário Ambiental - I

Formação da Terra - 4,56 Ba – fase inicial do bombardeamento - 40 Ma

Formação da Lua – entre 40 – 80 Ma após formação da Terra – colisão com um planetesimal (Theia) com dimensões de Marte)



Simulações por S. Karato (2018) – Lunar & Planetary Institute

O Cenário Ambiental - II

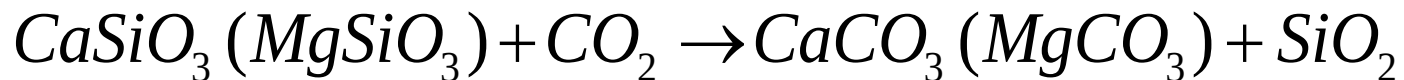
Perda da atmosfera original e formação de uma atmosfera densa (~100 vezes a pressão atual), rica em CO₂, vapor de água e quente (T ~500 K)

Presença de um “oceano de lava” durante ~ 120 Ma após colisão - formação dos primeiros cristais de zircão

Segunda fase de bombardeamento (~ 760 Ma após formação) – esterilização da Terra?

Rochas e fósseis com idades superiores a 3,8 Ba praticamente inexistem! – Forte processo de erosão?

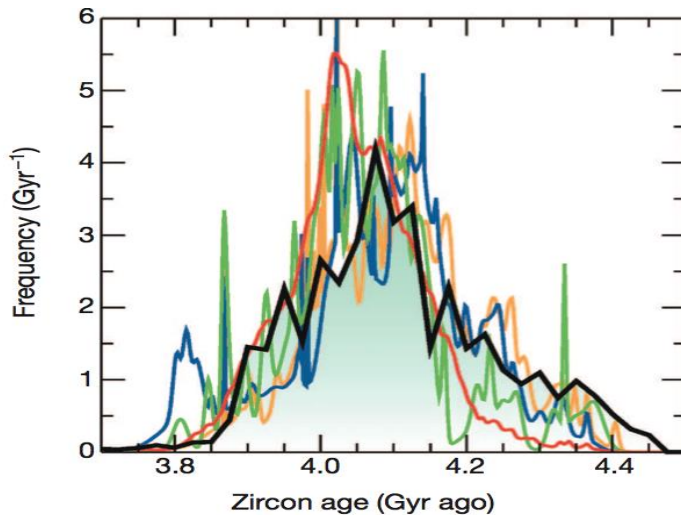
Sequestro do CO₂ por reações com silicatos (processo de Urey) e transporte dos carbonatos ao manto por subducção



Cenário esboçado é “realista”?

Descoberta de cristais de zircão com idades de 4,4 Ga – formação → resfriamento da lava na presença de água líquida

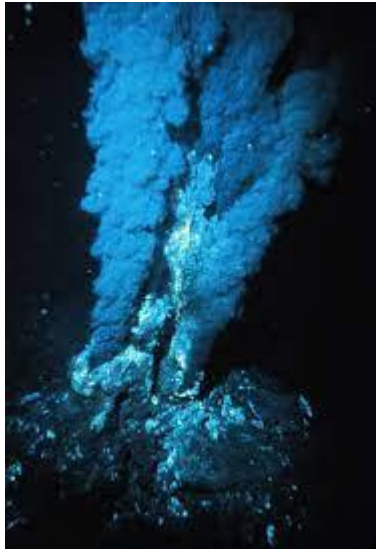
Água terrestre – resultante principalmente da primeira fase de bombardeamento por condrites carbonados (a contribuição de cometas está hoje excluída pela composição isotópica da água)



Correlação entre a distribuição de idades de cristais de zircão e dos impactos obtidas por simulações do sistema solar primitivo

Não houve esterilização da Terra (Sleep e outros 1998; Abromov & Mojzsis 2009) – Nichos em profundidades oceânicas superiores a 200 m são preservados para micro-organismos termofílicos – consistente com o que sabemos sobre LUCA

Emergência da vida na Terra – Fontes Hidrotermais



Razões:

Nichos submarinos foram protegidos dos bombardeamentos iniciais

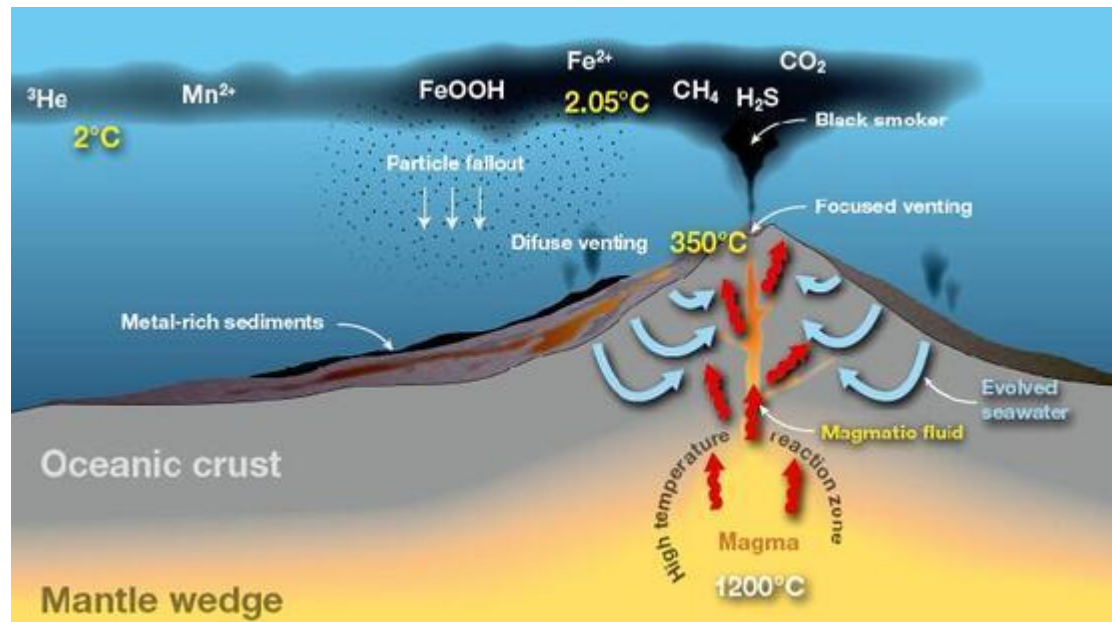
Temperaturas nas vizinhanças de FH são ideais para termofílicos

Química ambiental permite o consumo de hidrogênio por organismos anaeróbicos e autótrofos

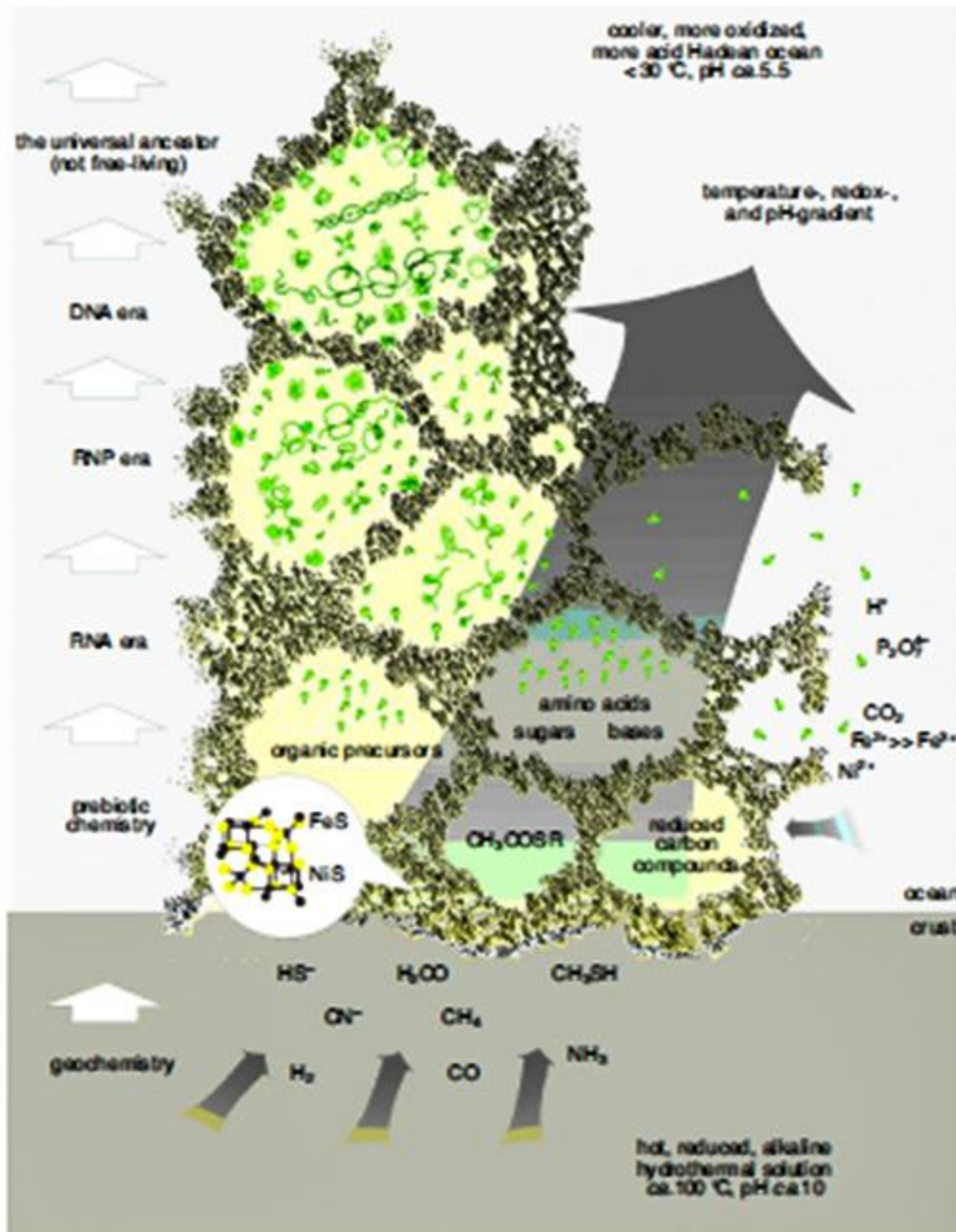
Células primitivas “naturais”?

Surgimento da vida com energia retirada unicamente de processos químicos

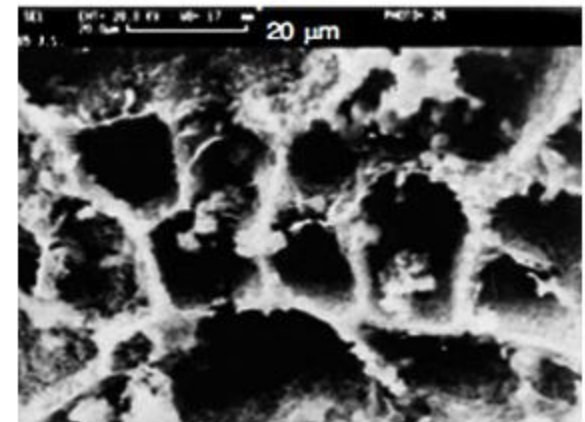
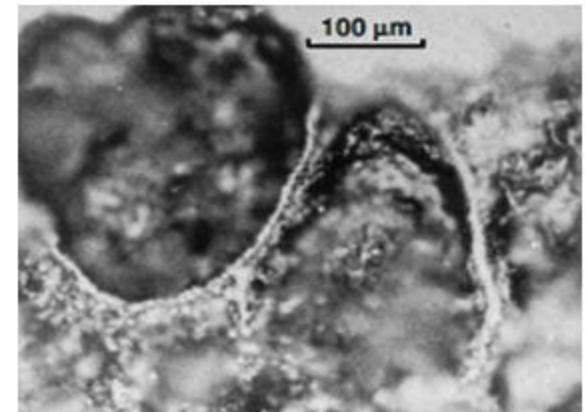
Relevante para planetas ou luas com oceanos abaixo da crosta (caso de Encélado e Europa)

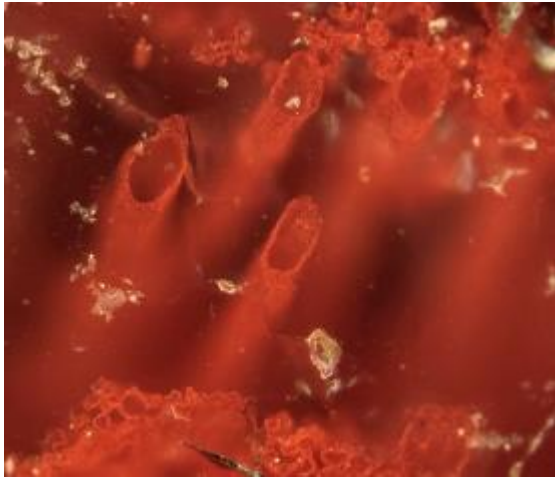


“Células” em fontes hidrotermais (Martin & Russel 2002)



Estruturas 3D descobertas em 1981 em chaminés hidrotermais com idades > 360 Ma e formadas por precepidados de FeS_2 e/ou FeS





Descoberta de fósseis de micro-organismos datando de 3,77 a 4,28 Ba em rochas ferruginosas sedimentares formadas por precipitados de ventos hidrotermais na região de Nuvvagittuq, Quebec (Dodd e outros 2017)

“Roseta” de carbonatos –origem biogênica ou não?

Resíduos de Ca, P e grânulos de grafite provavelmente de origem biogênica



Habitabilidade de um planeta

Existência de água líquida – a água pode permanecer no estado líquido mesmo em temperaturas da ordem de 500 K se a pressão for da ordem de 10 – 50 bar (superfluido)

A presença de uma atmosfera afeta a temperatura da superfície (efeito “estufa”). A perenidade da mesma depende do equilíbrio entre vulcanismo e perdas para o espaço (função da gravidade do planeta)

Clima – condicionado por vários fatores: distância entre o planeta e sua estrela, tectônica de placas, vulcanismo, rotação e inclinação do eixo de rotação.

Zona de habitabilidade evolui com o tempo devido a evolução da estrela central (a Terra sairá da ZH do sistema solar daqui a 1,8 Ba)

Exoplanetas em Zona Habitável (?)

Planet	R/R $\oplus$	M/M $\oplus$	T _{eq} (°C)	a (u.a.)	a _i (u.a.)	a _E (u.a.)
K-442b	1.34	2.5	-32	0.409	0.409	0.781
K-186f	1.17	1.5	-59	0.432	0.346	0.663
K-62f	1.41	3.0	-71	0.718	0.498	0.941
K-452b	1.63	4.8	-27	1.046	0.993	1.805
GJ 667Ce	1.40	2.7	-57	0.213	0.173	0.346
GJ 667Cd	1.66	5.1	-84	0.276	0.171	0.346

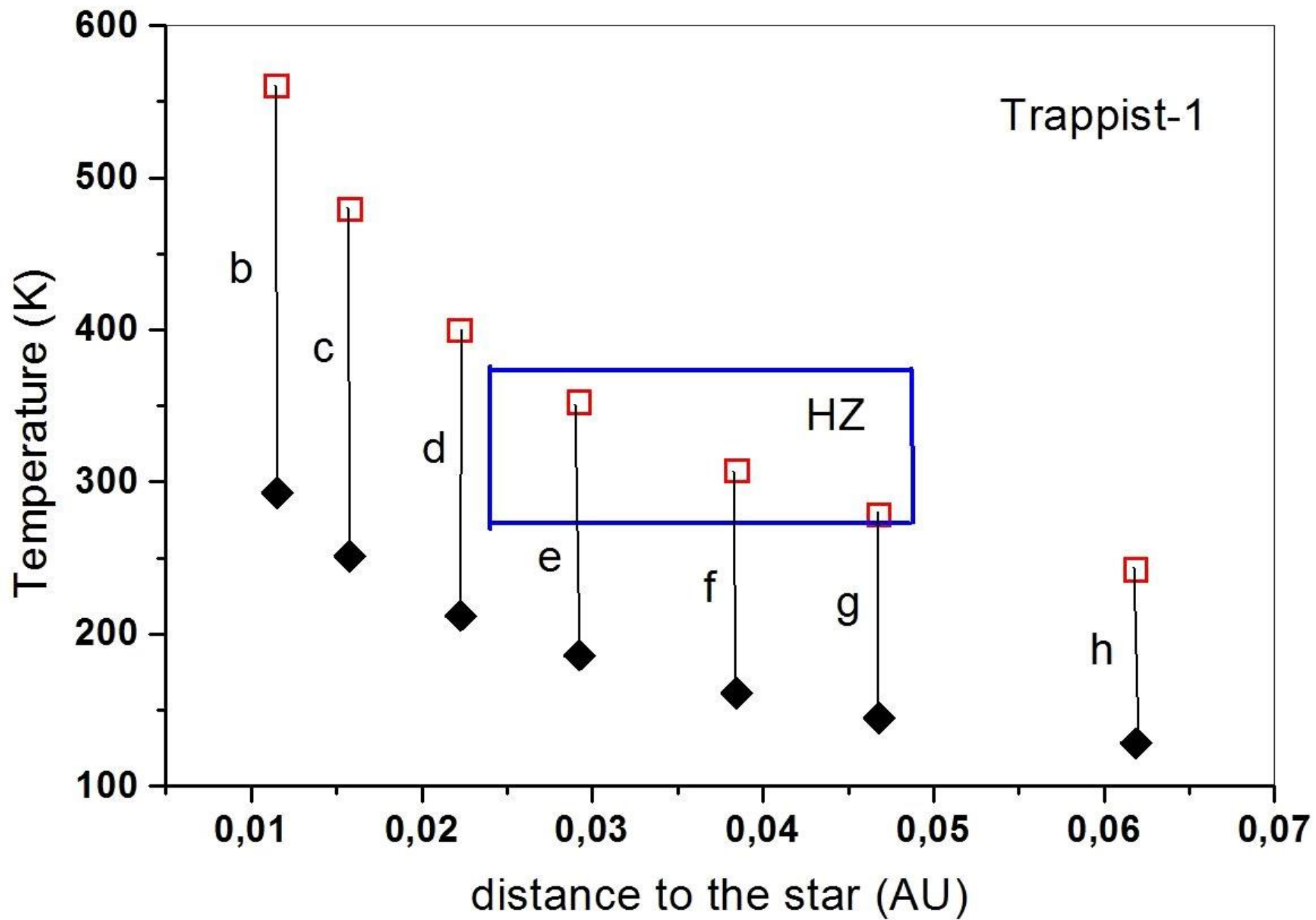
Efeito estufa incluído $\rightarrow$ CO₂ + H₂O

Modelos de atmosferas de Kopparapu et al. (2013; 2014)

The Trappist-1 Planetary System

Planet	$M/M_{\oplus}$	$R/R_{\oplus}$	ρ (g.cm ⁻³)	a (a.u.)	P_{orb} (days)
b	1.374	1.116	5.45	0.01154	1.5108
c	1.308	1.097	5.47	0.01580	2.4218
d	0.388	0.788	4.37	0.02227	4.0496
e	0.692	0.920	4.91	0.02925	6.0996
f	1.039	1.045	5.03	0.03849	9.2067
g	1.321	1.129	5.06	0.04683	12.3529
h	0.326	0.755	4.17	0.06189	18.7650

The central star: Spectral type: M8V Effective temperature: 2510 K Age: 7.6 Gyr
Mass: 0.089 $M_{\odot}$ Radius: 0.121 $R_{\odot}$ $L = 0.000522 L_{\odot}$



Two-layer model for Trappist-1 planets

Planet	$M_p/M_\oplus$	R (km)	R_c (km)	$M_c/M_\oplus$	H_m (km)	$M_m/M_\oplus$
b	1,374	7110	4014	0,435	3096	0,565
c	1,308	6989	4150	0,448	2839	0,552
d	0,388	5020	2750	0,367	2270	0,633
e	0,692	5860	3429	0,428	2431	0,572
f	1,039	6658	3718	0,389	2940	0,611
g	1,321	7193	3834	0,352	3359	0,648
h	0,326	4810	2520	0,331	2290	0,669

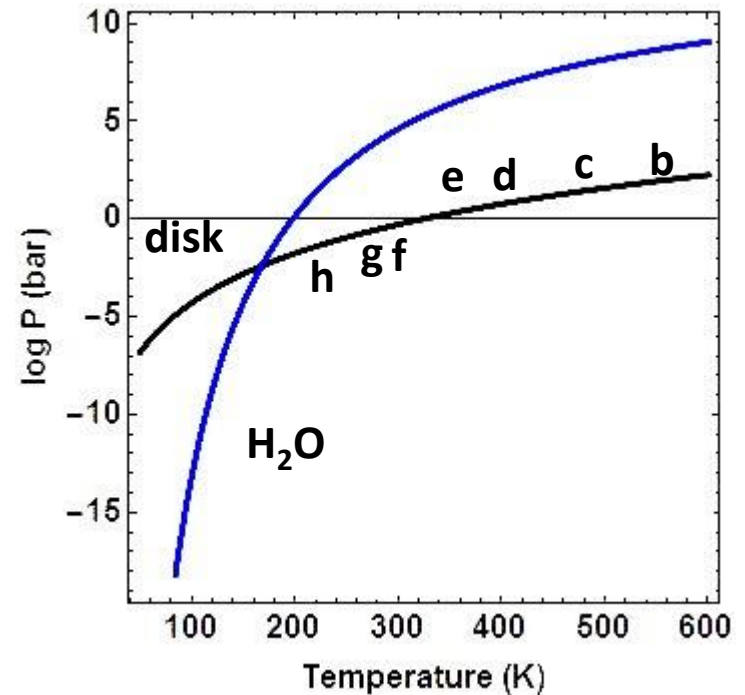
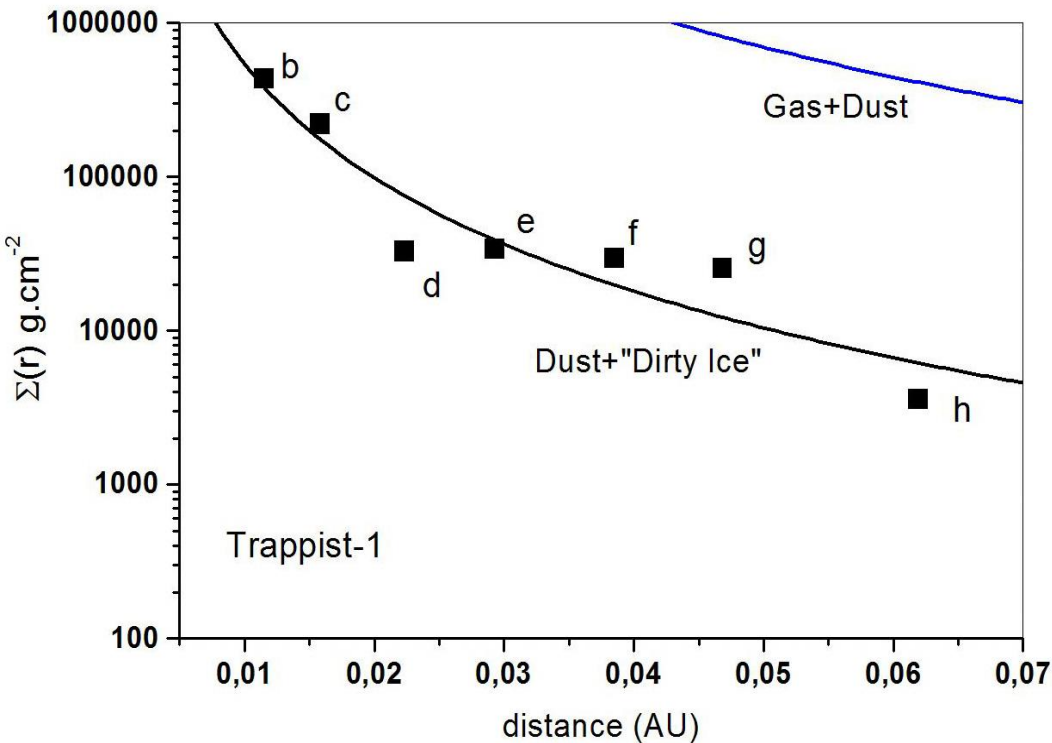
Core : Fe-Ni mix Mantle: basalt

Murnaghan equation of state $\rightarrow$

$$P = \frac{K_0}{\alpha} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\alpha - 1 \right]$$

Material	FeNi	basalt
K_0 (Mbar)	3,54	0,56
α	3,00	3,50
ρ_0 (g.cm ⁻³)	8,18	2,80

Protoplanetary disc model for Trappist-1

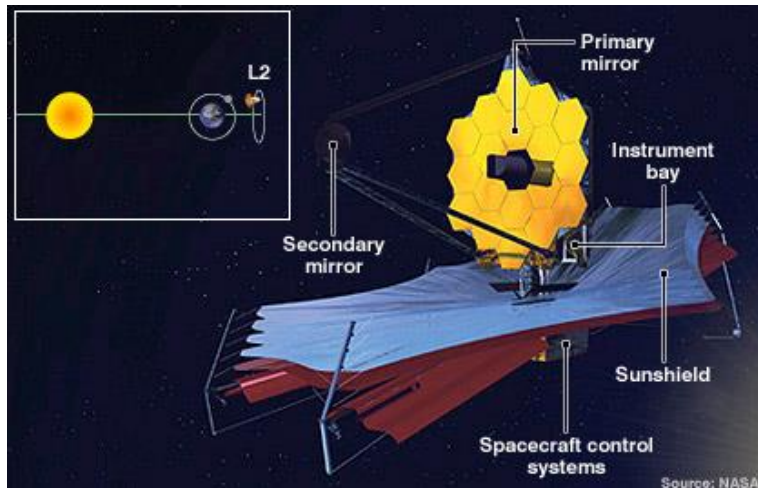


$$\frac{M_d}{M_*} \approx 0.063 \quad R_{\text{inner}} = 0.01 \text{ AU}$$

$$\rho_{\text{dust}} / \rho_{\text{gas}} = 0.01$$

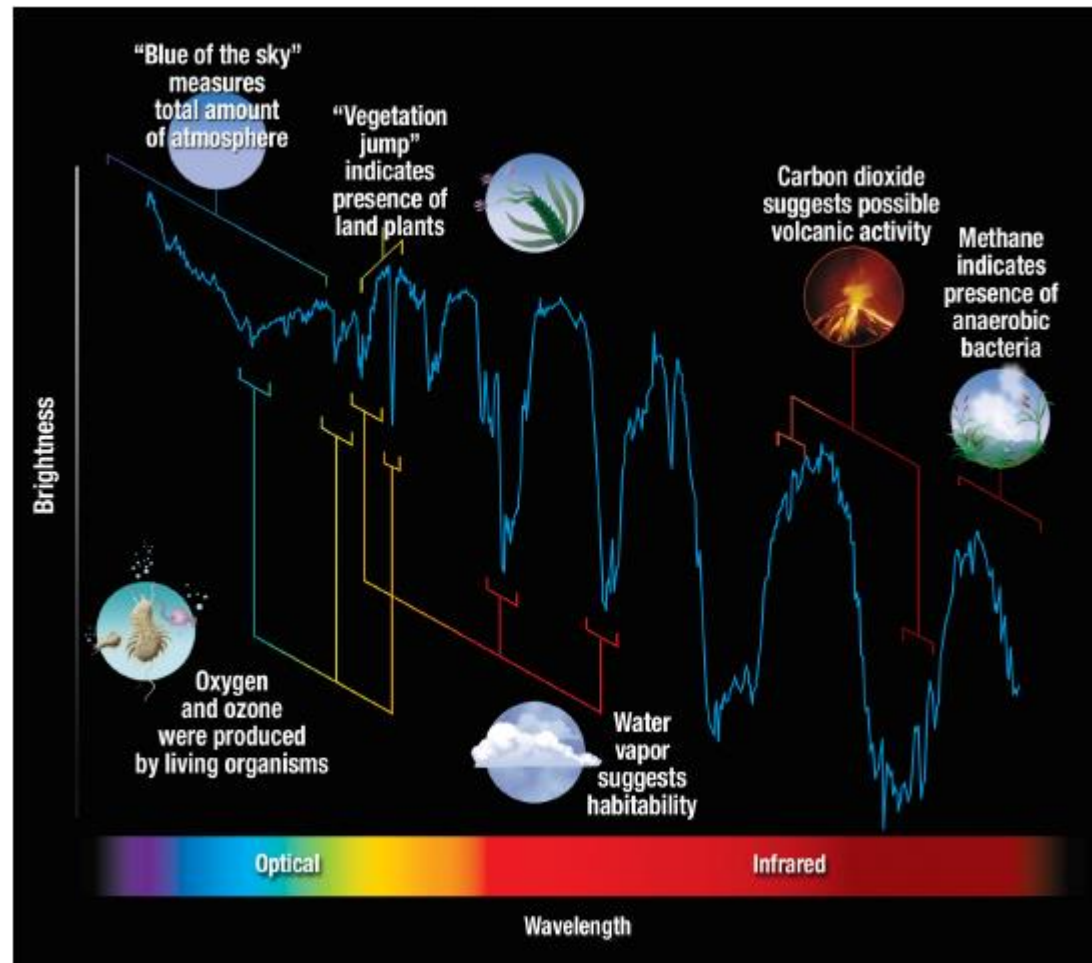
Radiative equilibrium
Hydrostatic equilibrium (z-axis)
Radial mass transport (neglected)
Water radius > 0,124 AU

O telescópio James Webb



**O telescópio James Webb
lançamento previsto – 31/10/2021**

**James Webb - $\phi = 6,5\text{m}$
HST - $\phi = 2,4\text{m}$**



Bio assinaturas possíveis

Epílogo

- Aceitar o Princípio de Pace abre a possibilidade de investigar a emergência da vida extraterrestre com base ao conhecido na Terra
- A vida pode ter emergido na Terra em uma curta escala de tempo (400 Ma) favorecendo a ideia que as bases seriam de origem exógena
- As bases da vida seriam provenientes de nuvens moleculares densas onde complexos orgânicos se formam na superfície dos grãos de poeira. A quiralidade levógira é adquirida nestas nuvens onde um intenso campo de radiação polarizada circularmente existe, produzido por protoestrelas e difuso pela poeira presente;
- LUCA – ancestral apenas dos filos Bacteria e Archea, emergiu provavelmente nas vizinhanças de fontes hidrotermais (nichos preservados do bombardeamento e provedores das primeiras células inorgânicas)
- Exossistemas planetários em estrelas “frias” (Trappist-1) onde um par J-S inexiste (sem mecanismo “vai-e-vem”) podem ter planetas rochosos desprovidos de oceanos