

FUNDAMENTOS DE ASTROBIOLOGIA

AST-416-3

Aula 5

Habitabilidade

C.A.Wuensche

INPE – Divisão de Astrofísica

<http://www.das.inpe.br/~alex>





Habitabilidade

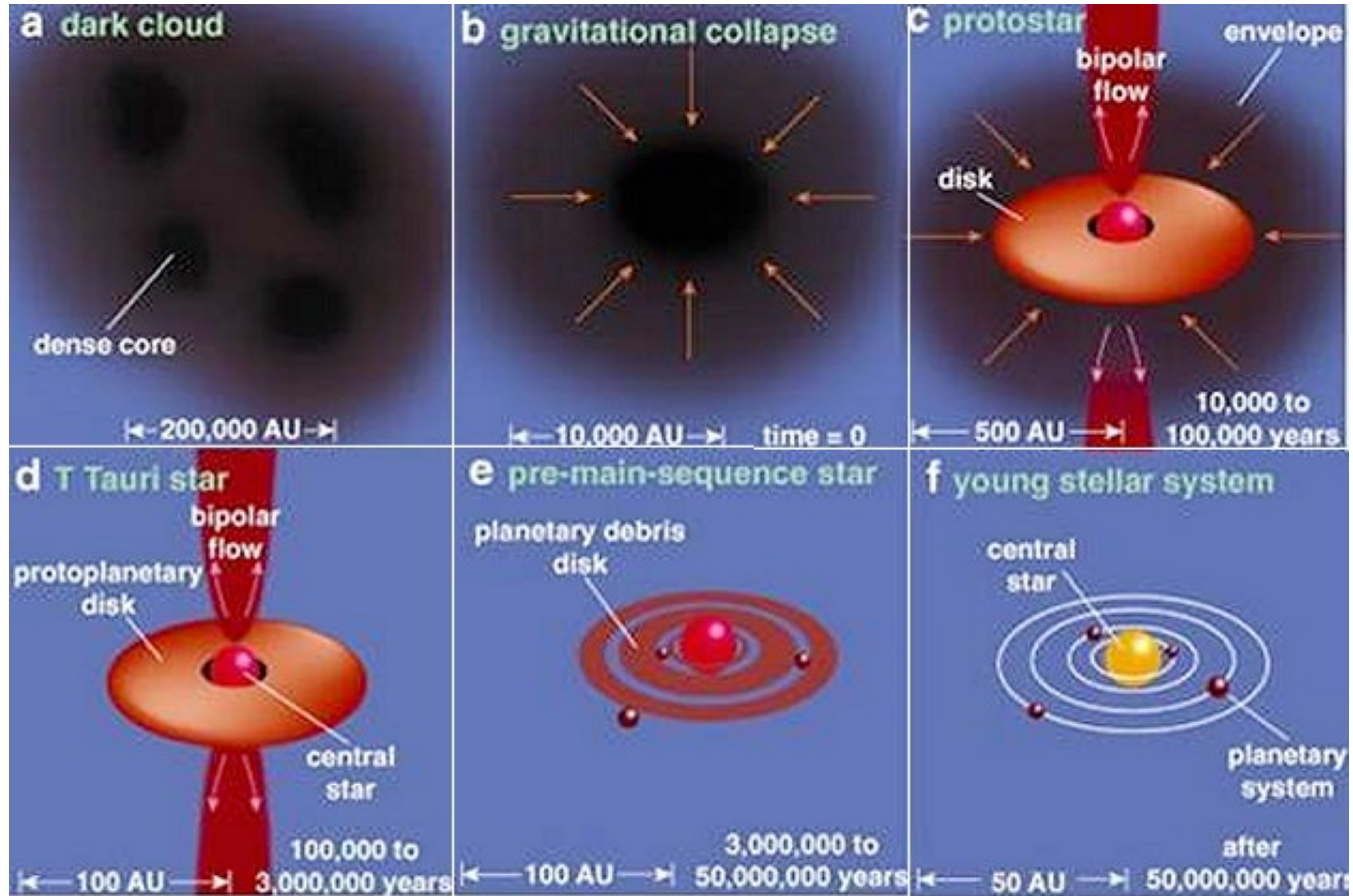
Leitura:

- ✓ Cap. 4 do livro "Astrobiologia: uma ciência emergente"
- ✓ Caps. 17 e 18 do Livro Astrobiology (Charles Cockel)
- ✓ Artigo "How to Characterize Habitable Worlds and Signs of Life" (Lisa Kaltenegger, ARAA, 2017)
- ✓ Artigo "The Astrobiology Primer 2.0", caps. 5 e 6 (Domagal-Goldman & Wright, Eds., 2016)
- ✓ Artigo "On the Habitability of our Universe" (A. Loeb, arXiv:1606.08926, 2016)



Problema geral da formação estelar

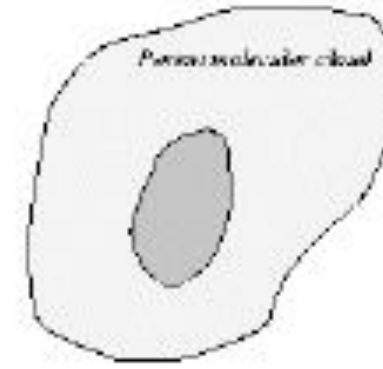
- ☑ Formação do núcleo por difusão ambipolar: modelos de auto similaridade e efeitos de flutuações turbulentas
- ☑ Fluxos externos: velocidades iniciais, equações de estado
- ☑ Variações no fluxo de raios cósmicos
- ☑ Soluções para o colapso interno com rotação
- ☑ Distribuição espectral de energia
- ☑ Física do disco: gravidade e viscosidade



Ref.: http://www.physicsoftheuniverse.com/topics_blackholes_stars.html

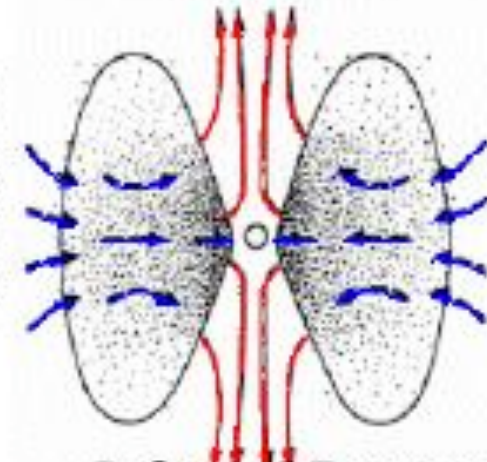
Low- Mass Stars

(after Lada 1987, Andre, Ward-Tompson & Barsony, 1993)
Prestellar Core



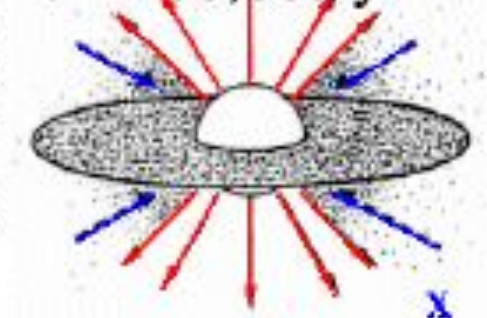
Submillimeter Protostar

Class 0



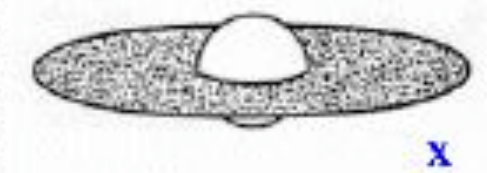
Infrared Protostar
100,000 yr

Class I



T Tauri star
1,000,000 yr

Class II



Evolved T Tauri
10,000,000 yr

Class III

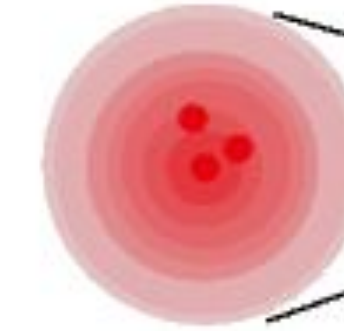


Massive Stars

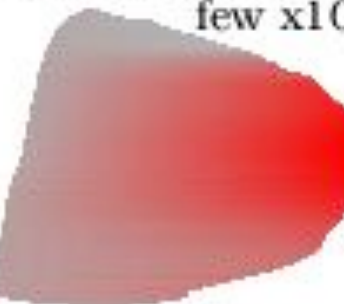
Prestellar Core(s?)



Hot Multi-Cores?



Ultra-Compact HII Region (UCHII)
few x100,000 yr
|<0.1 pc



OB Star
(w/accretion remnants?)
<1 Myr

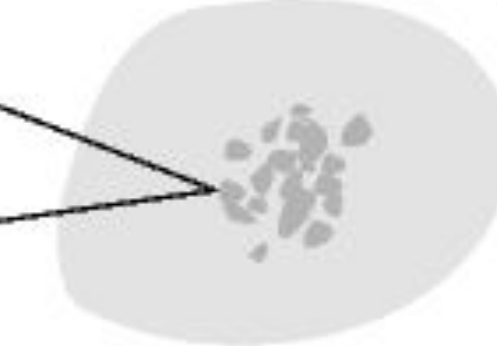


OB star

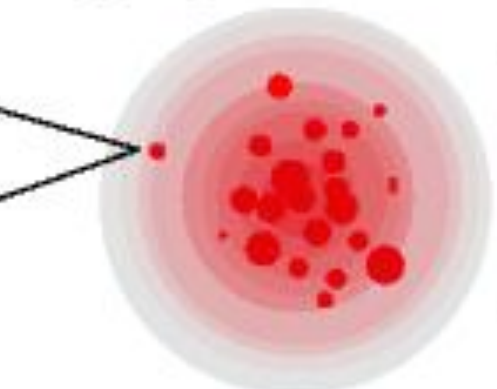


Massive Clusters

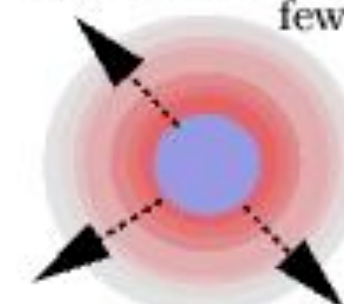
Massive Molecular Aggregates ?
 $>10^6 M_{\odot}$



Massive Submillimeter Aggregates ?
| few pc



Massive Ultra-Dense HII Regions (UDHII)
few x100,000 yr
| few pc



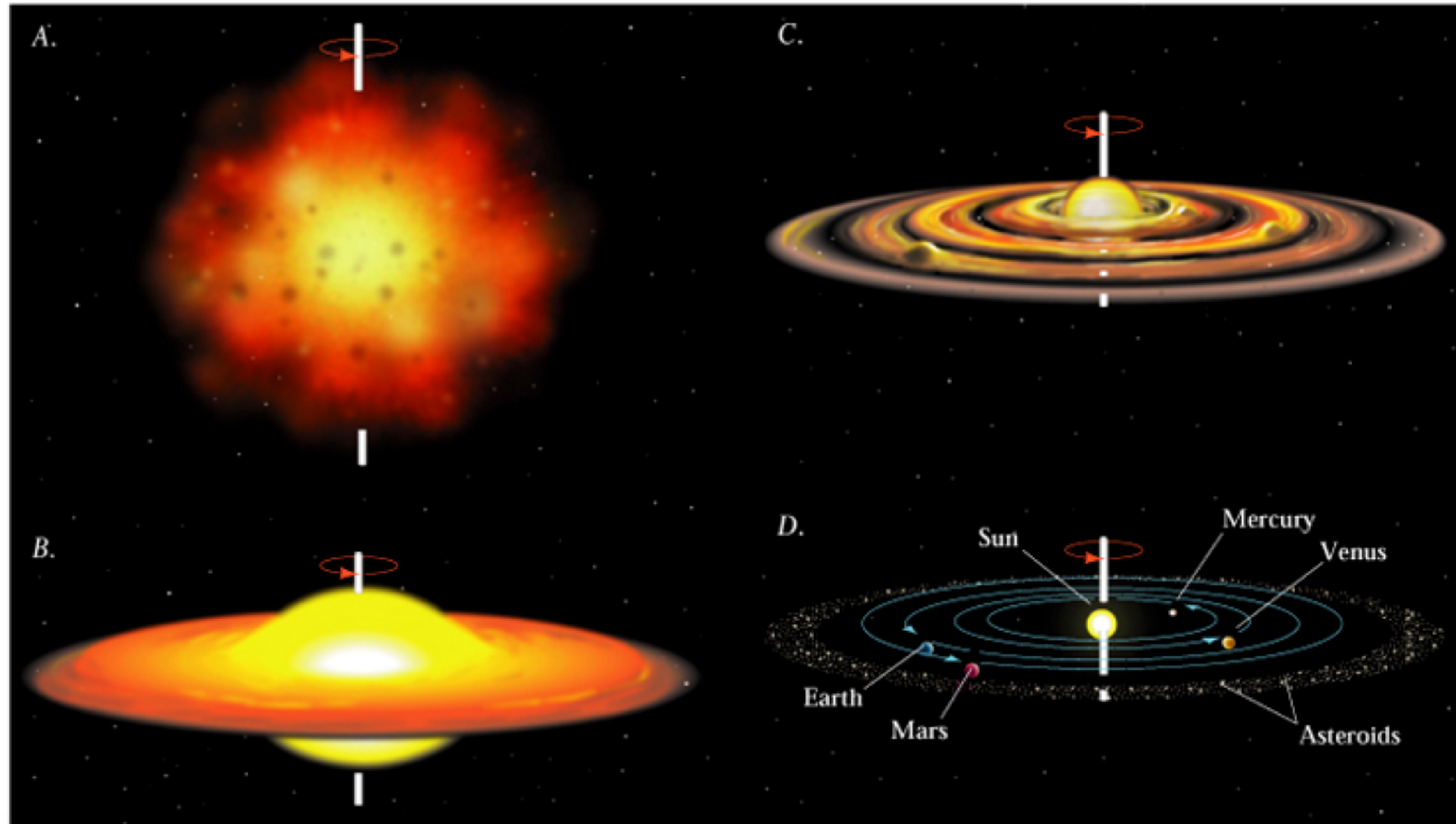
Young Super Starcluster
1-3 Myr



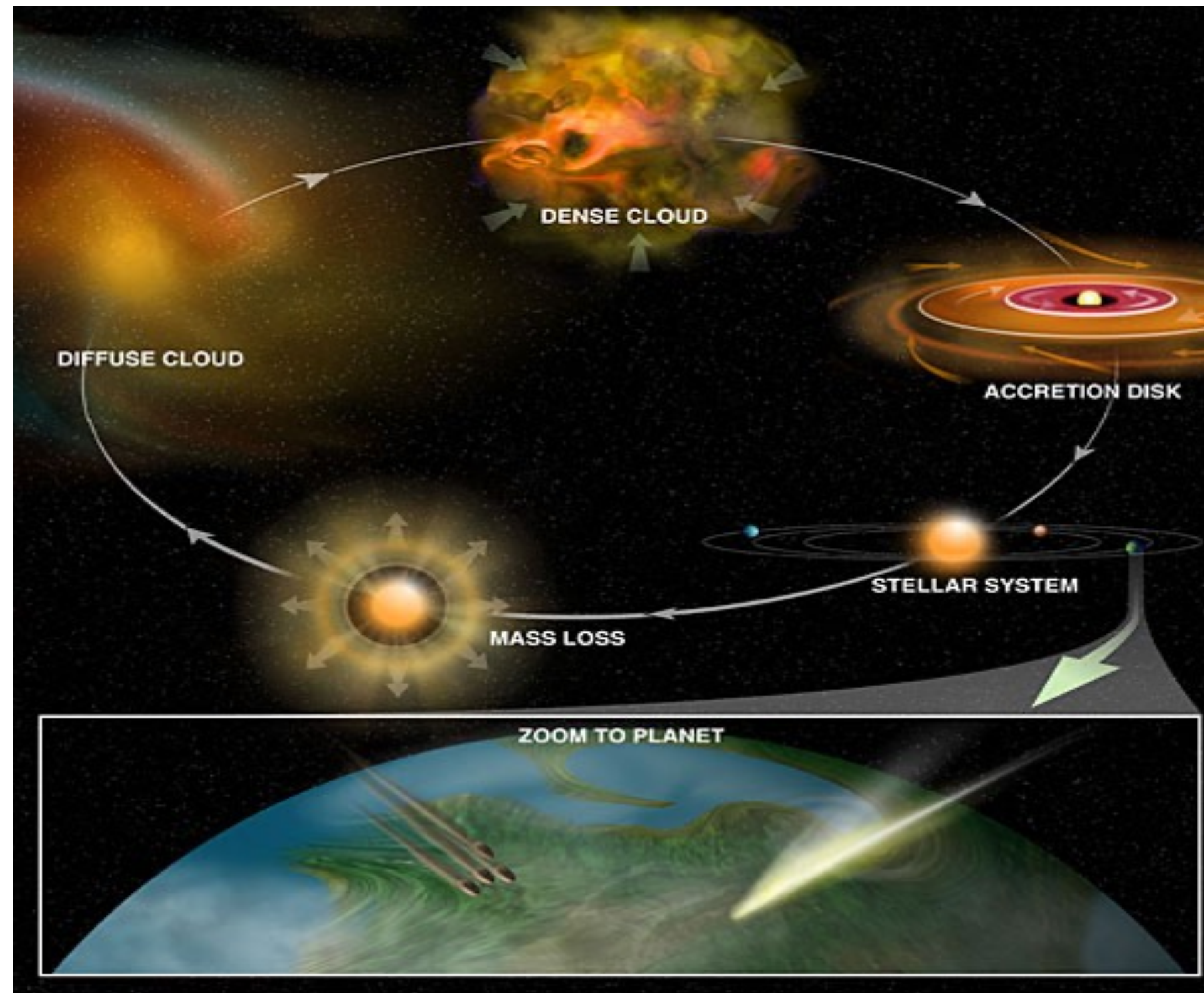
**Super Starclusters
-> Globular Clusters?**
3 Myr - 13 Gyr



Formação de um sistema planetário



Copyright 1999 John Wiley and Sons, Inc. All rights reserved.



Star Formation is a vitally important physical process in the grand scheme of Galactic Ecology, which represents an overarching cycle of Birth and Death



Formação do Sistema Solar

- ☑ estado inicial:
 - ✓ nuvem de gás e poeira em equilíbrio hidrostático
 - ✓ composição: basicamente hidrogênio
- ☑ estopim da contração
 - ✓ explosão de supernova
 - ✓ outro tipo de perturbação
- ☑ nuvem vira massa central + disco
 - ✓ massa central será o Sol
 - ✓ disco dará origem aos planetas

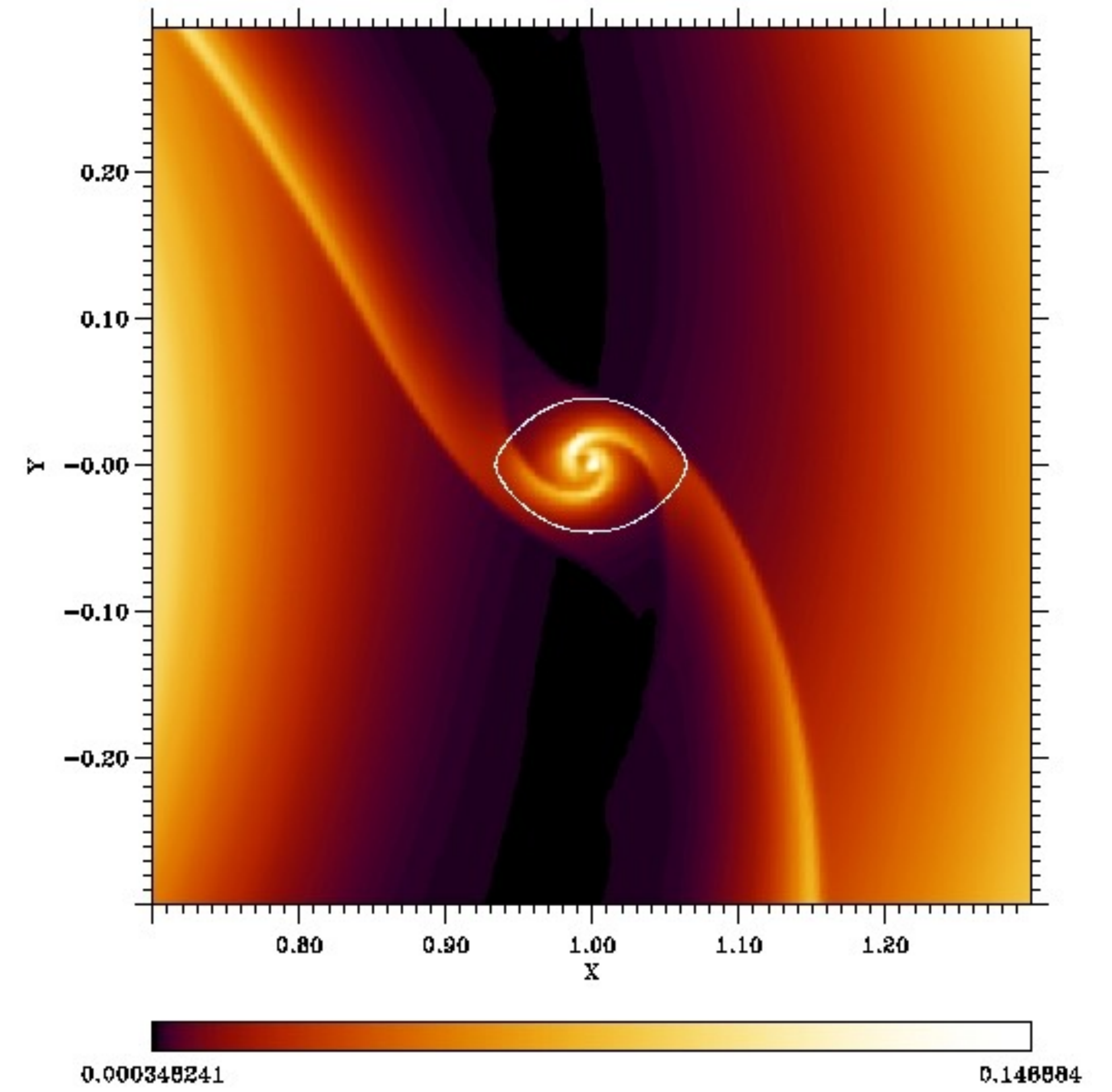
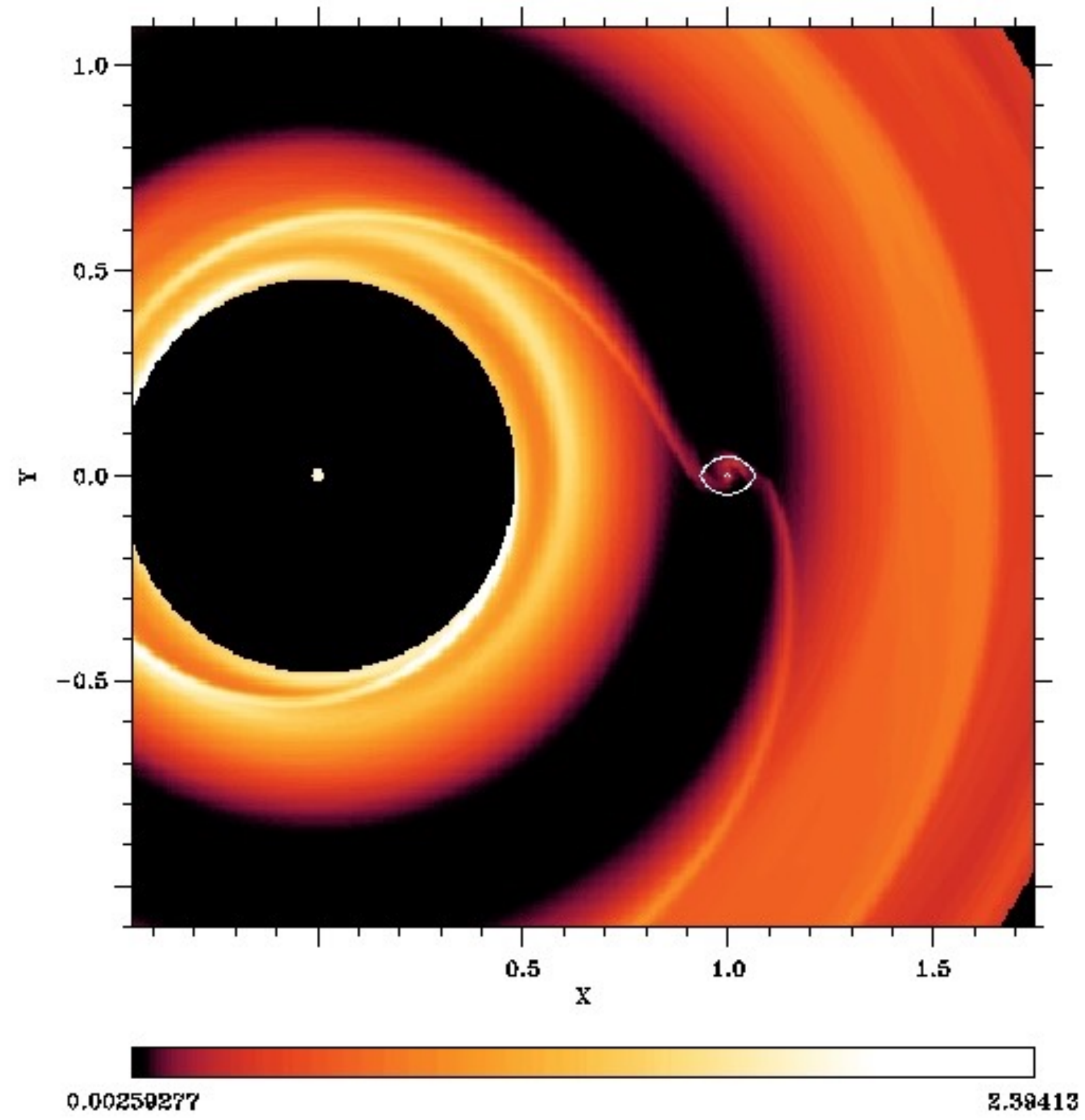


Formação do Sistema Solar

- ☑ formação dos planetas
 - ✓ formação de anéis
 - ✓ formação de planetesimais por colisão
 - ✓ colisão dos planetesimais – liberação de calor
 - ✓ estruturação: temperatura de condensação

- ☑ Idade do Sistema Solar: 5 bilhões de anos!

- ☑ Álbum de família



A Terra jovem



Muito mais UV, impactos e radiação em altas energias do que hoje... Provável “caldeirão” para o aparecimento dos precursores da vida - síntese de RNA (Nature, Maio 2009)



Chanrley, EAA lectures (2004)

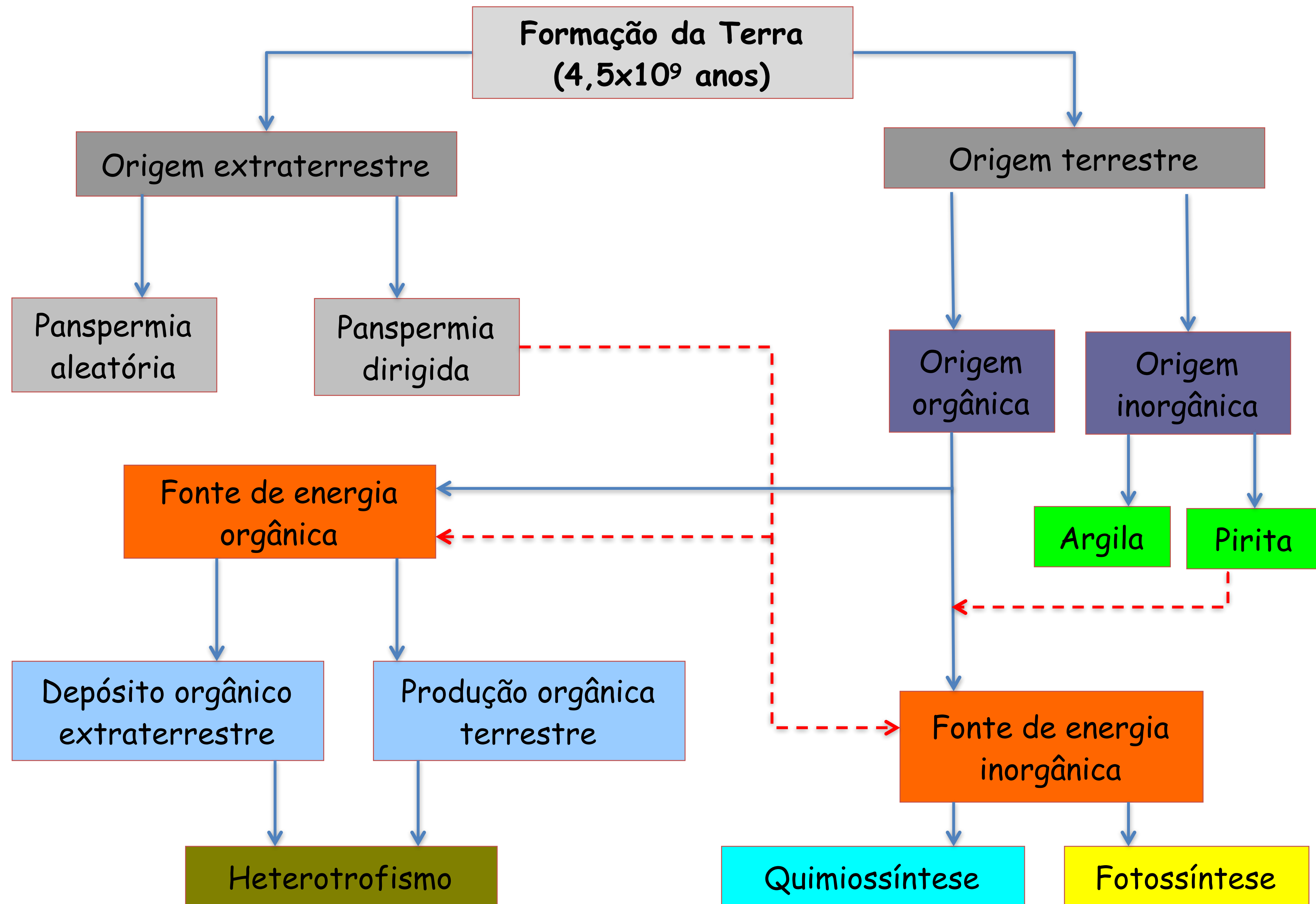
☑ Fontes terrestres

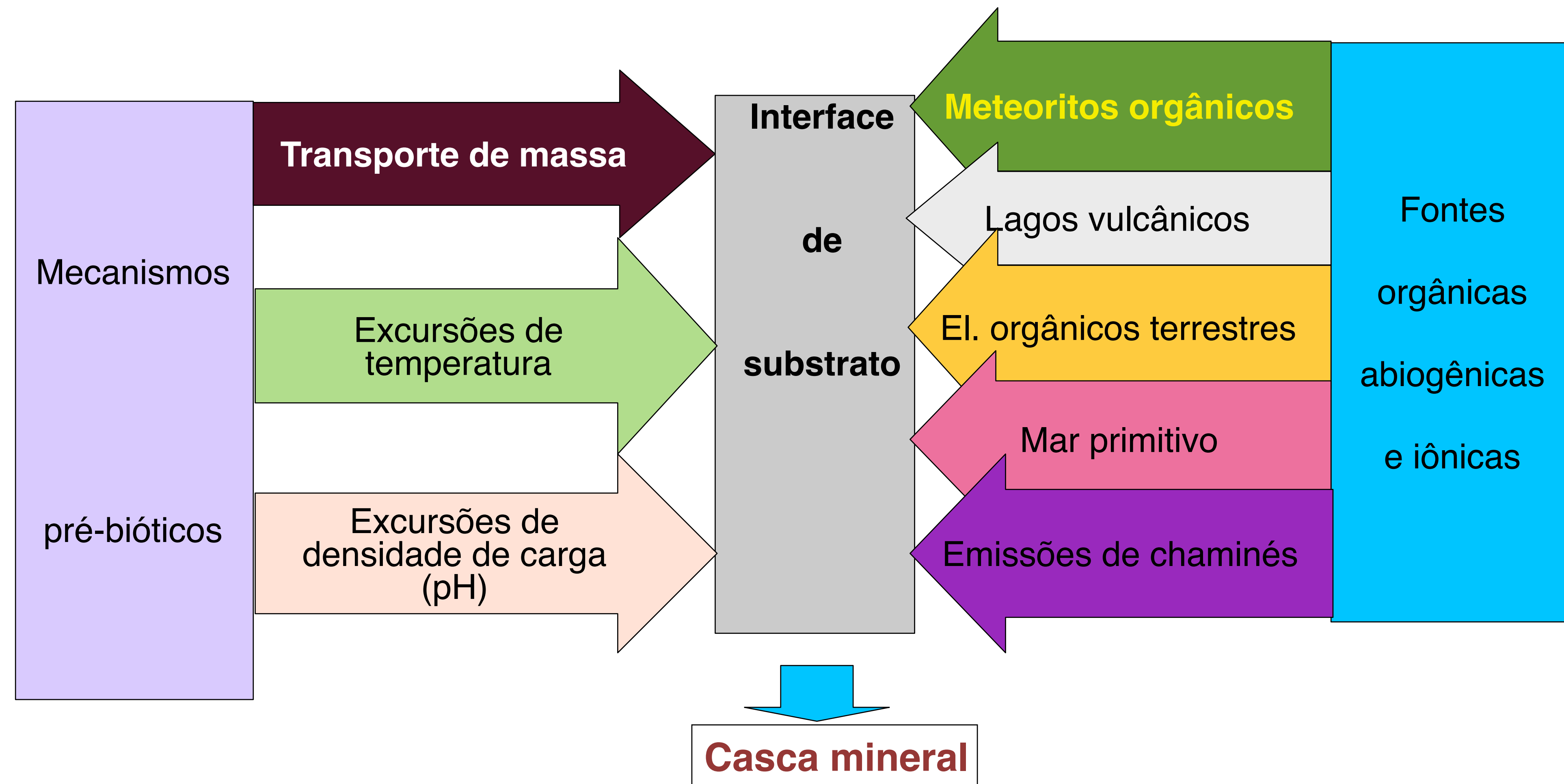
- ✓ Fotólise UV – 3×10^8
- ✓ Fontes hidrotermais – 1×10^8
- ✓ Descargas elétricas – 3×10^7
- ✓ Choques de impactos – 4×10^8

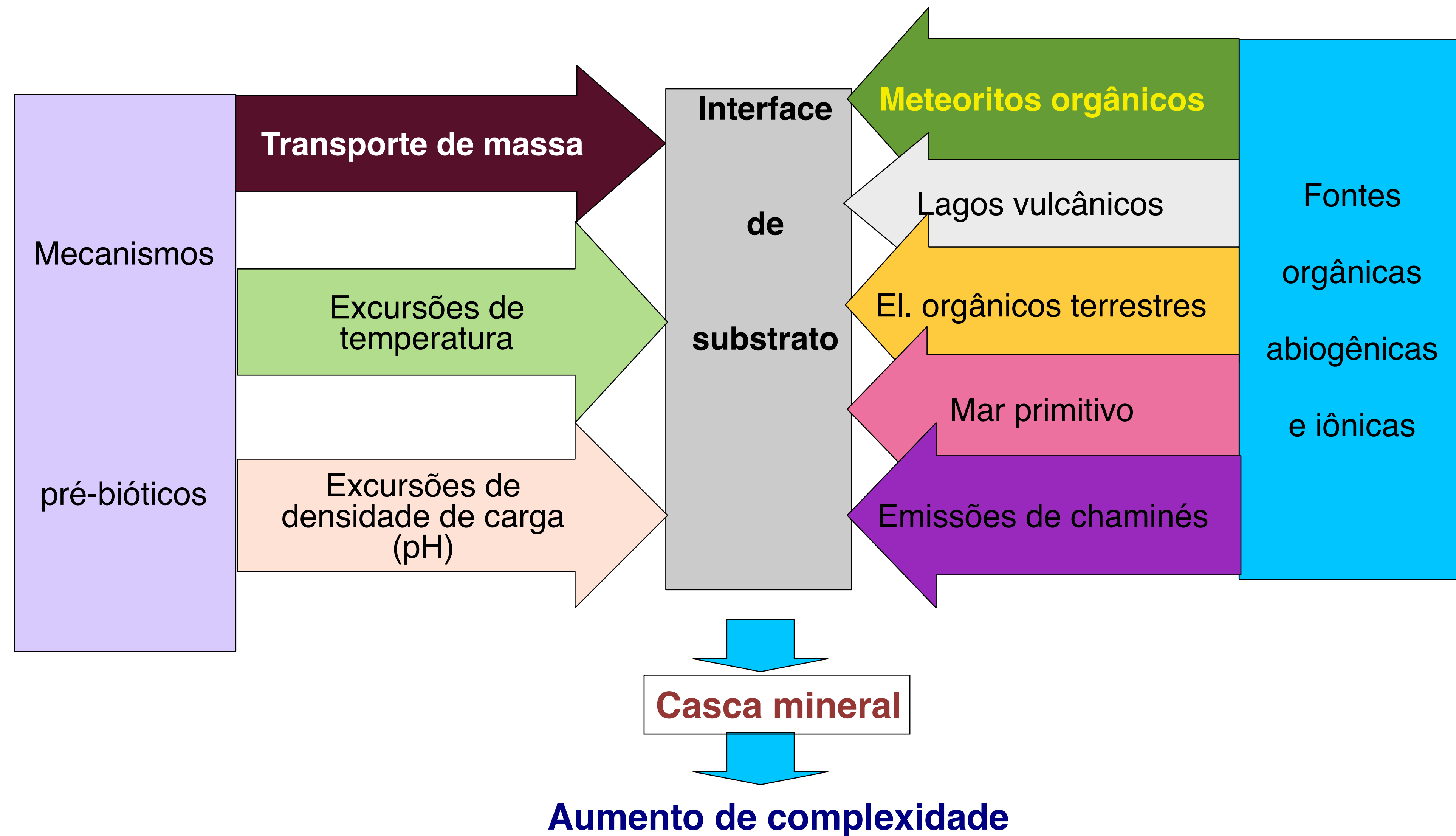
☑ Fontes extraterrestres (adaptada de Chyba e Sagan, 1992)

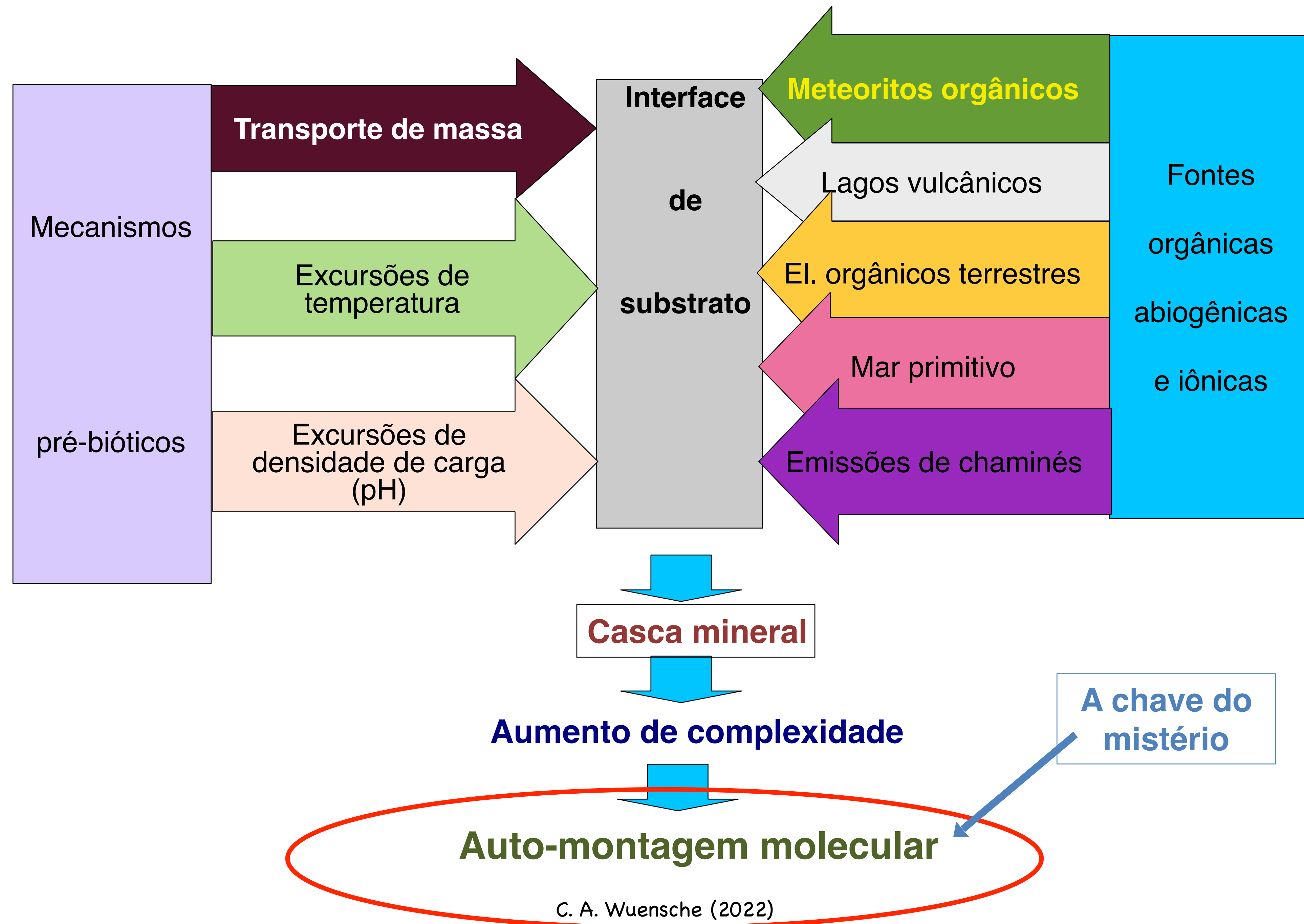
- ✓ Cometas e meteoritos – 3×10^{11}

☑ TOTAL: $\sim 10^{11}$

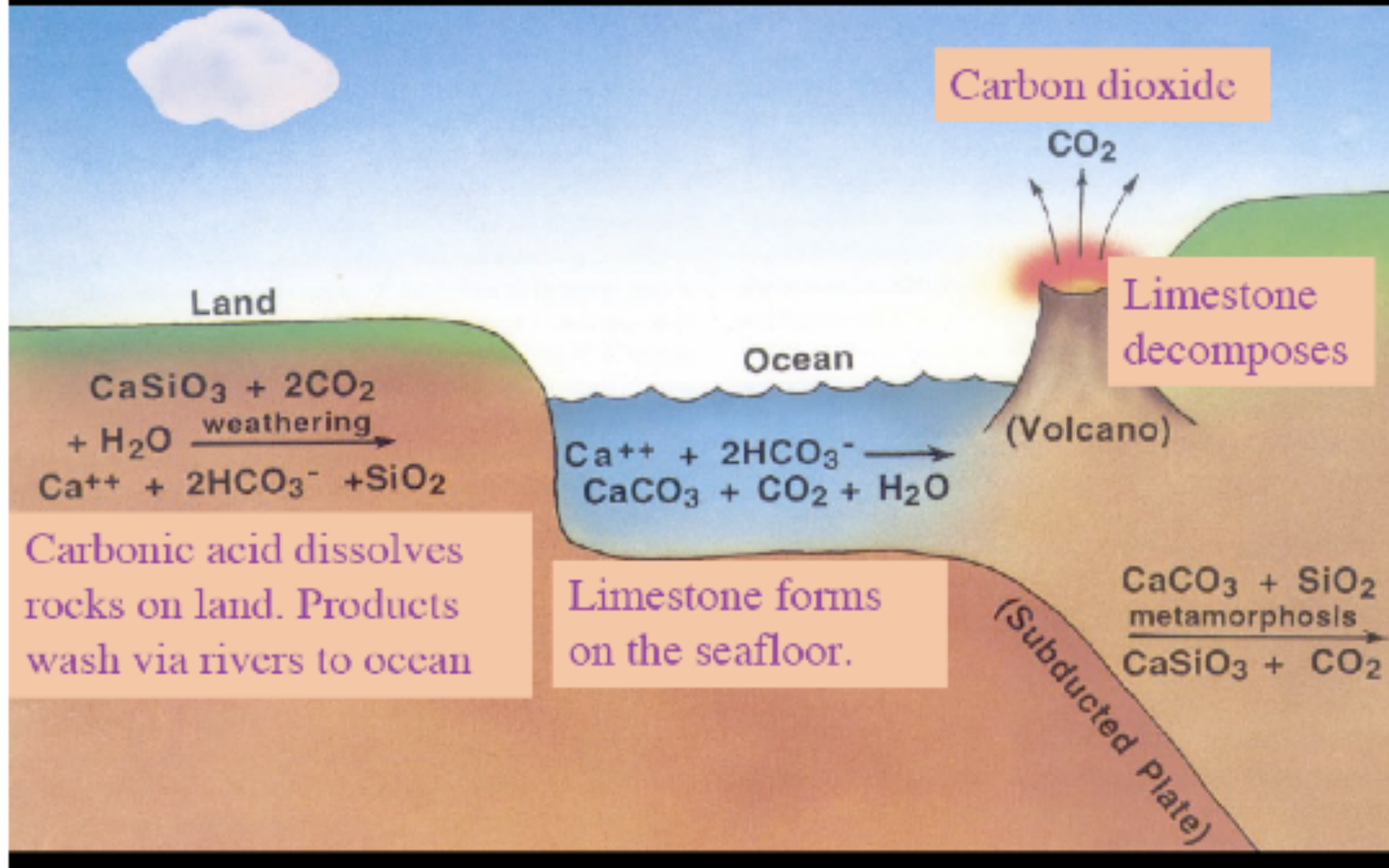




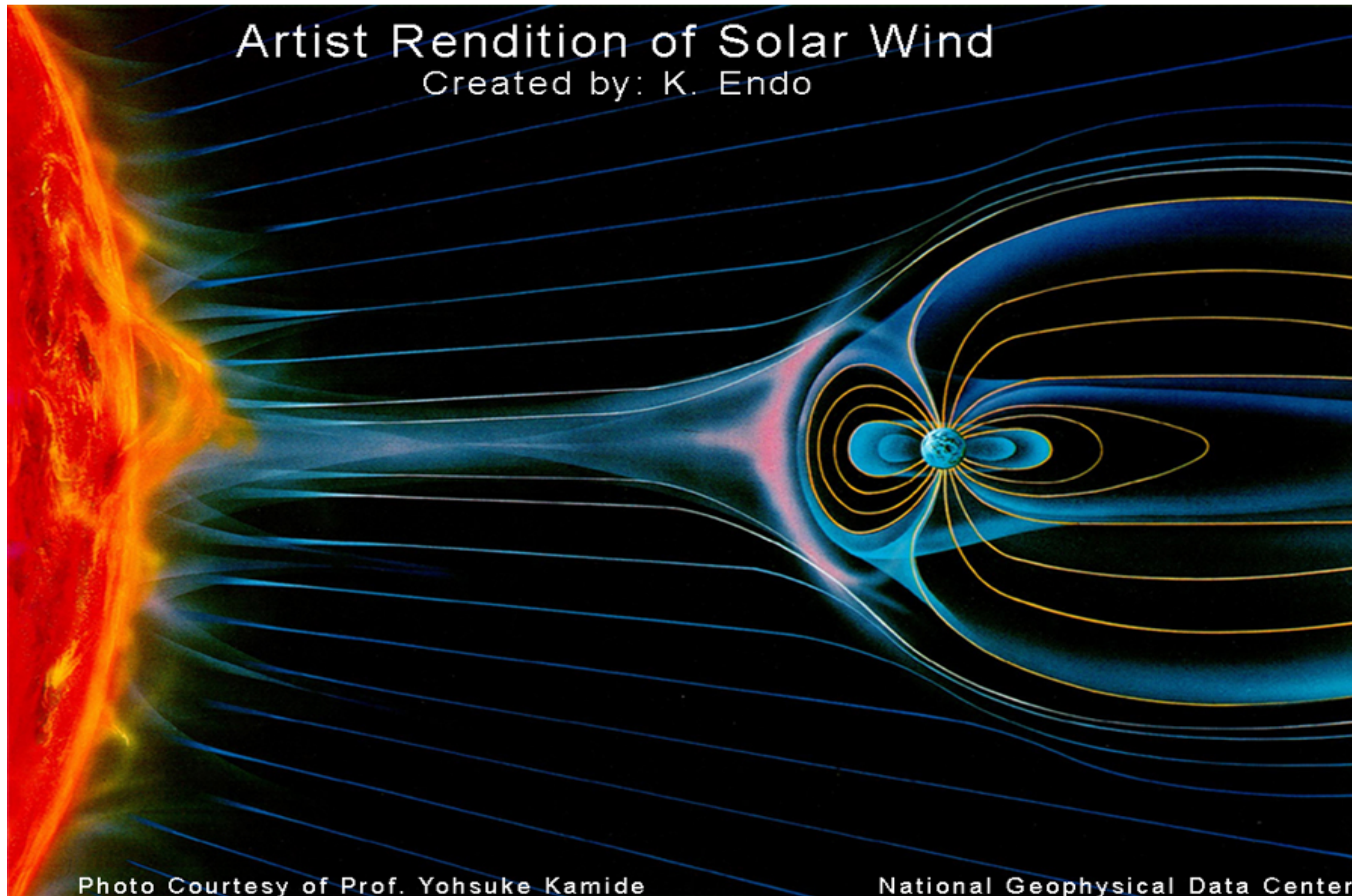




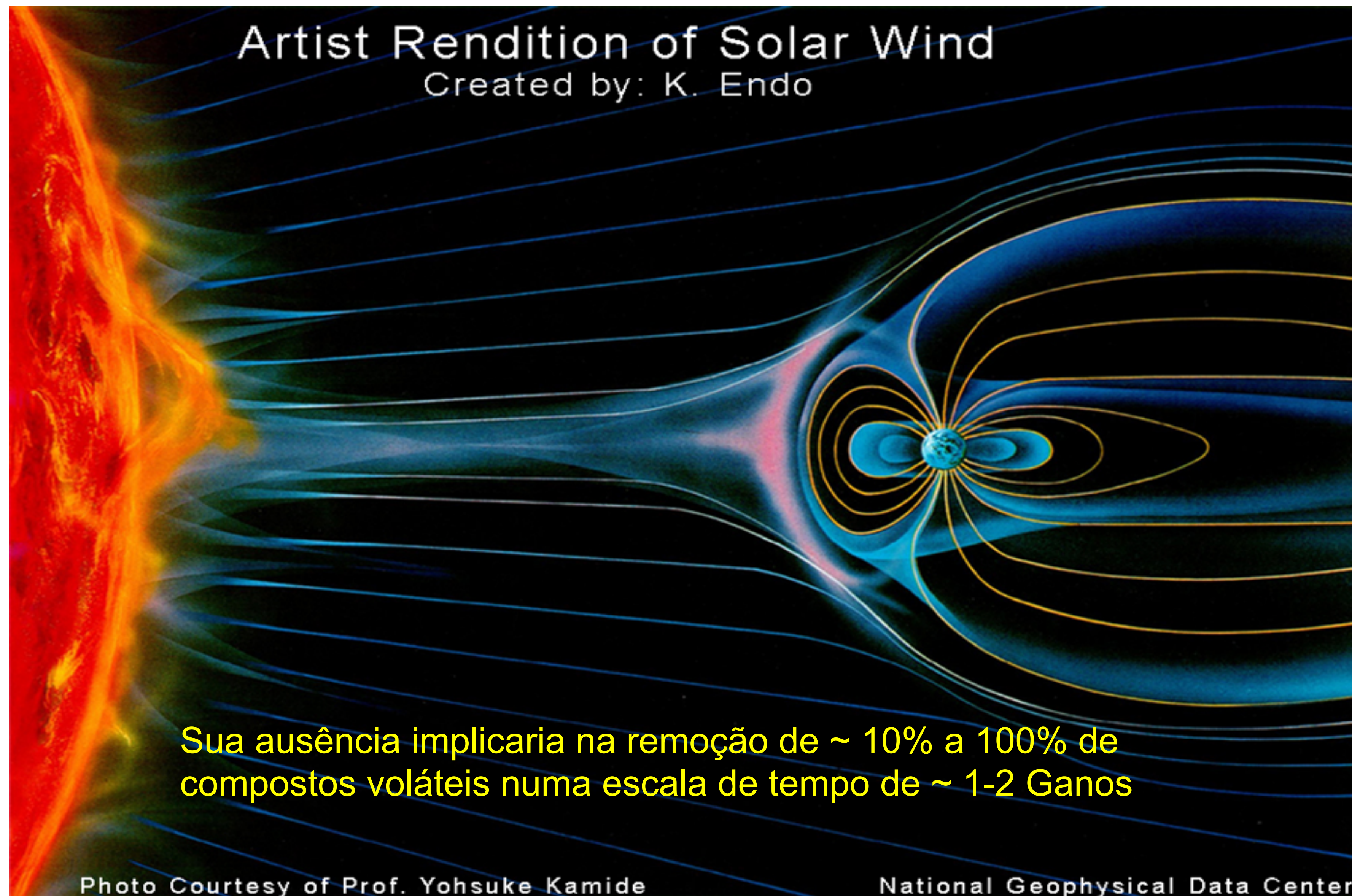
Earth's million-year thermostat



Presença de campo magnético



Presença de campo magnético

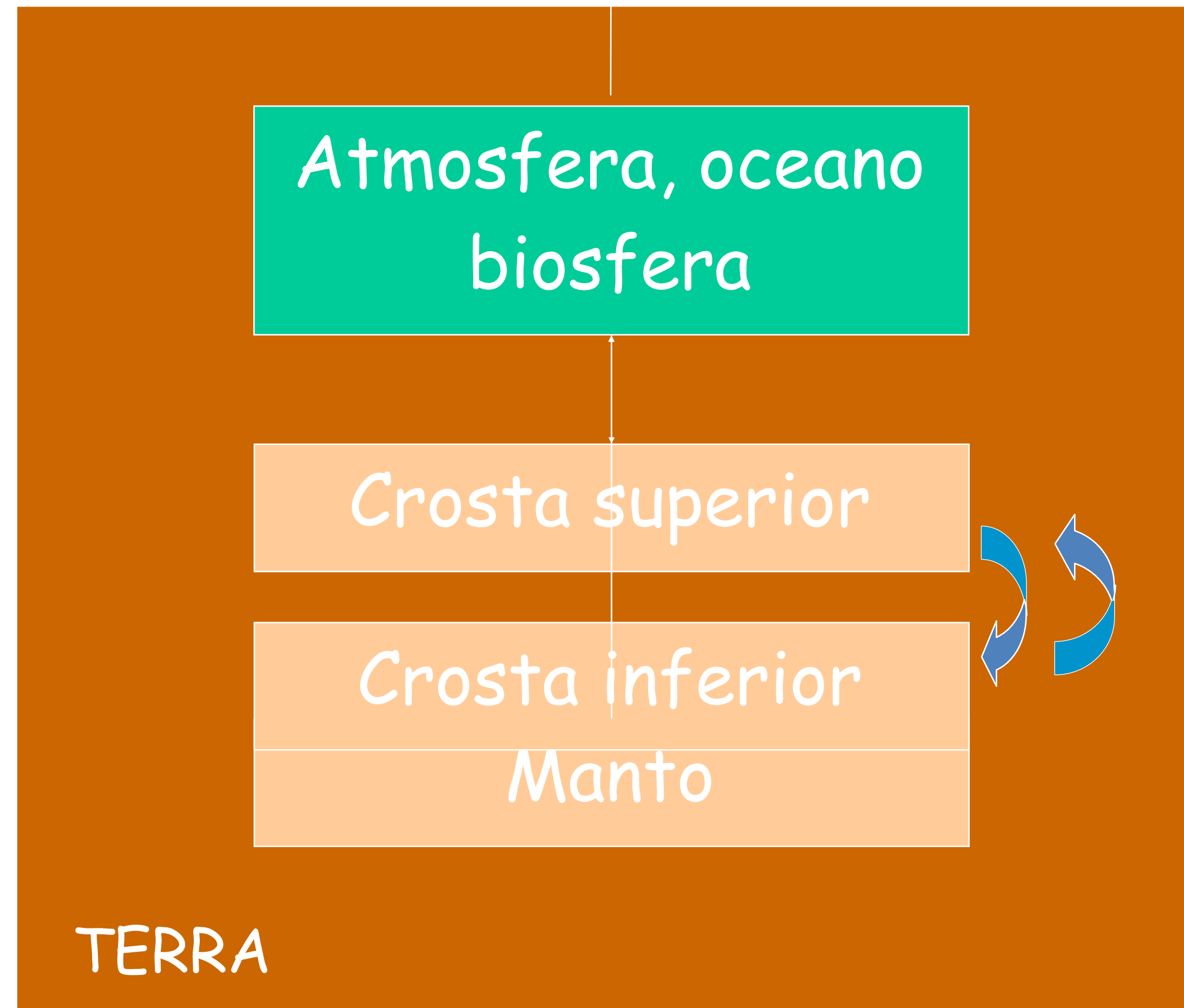


Fluxos que afetam o oxigênio

Escape do Hidrogênio

Gases metamórficos

Gases vulcânicos



Enterramento de material orgânico

Mistura devido à tectônica de placas

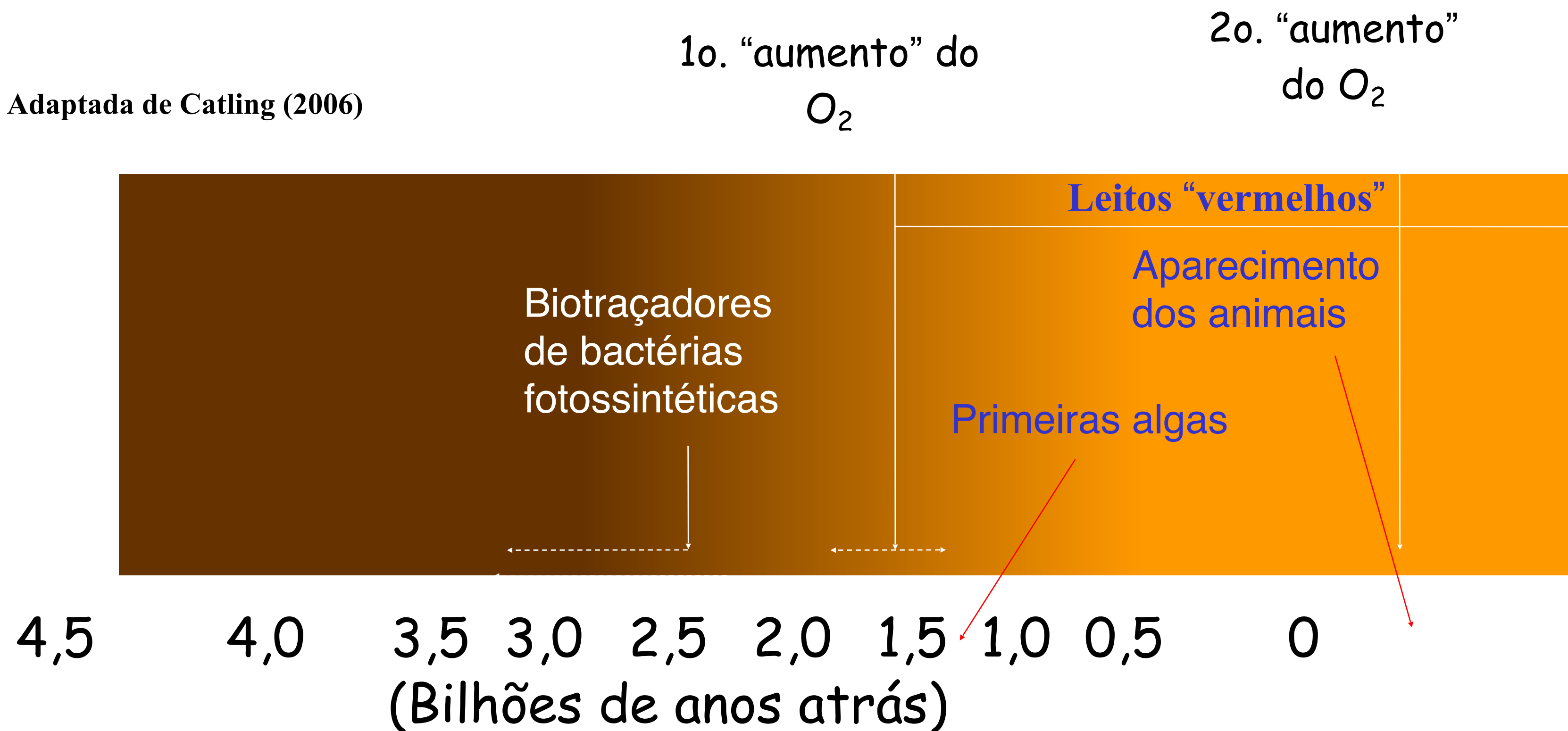


Vida e oxigênio co-evoluíram...

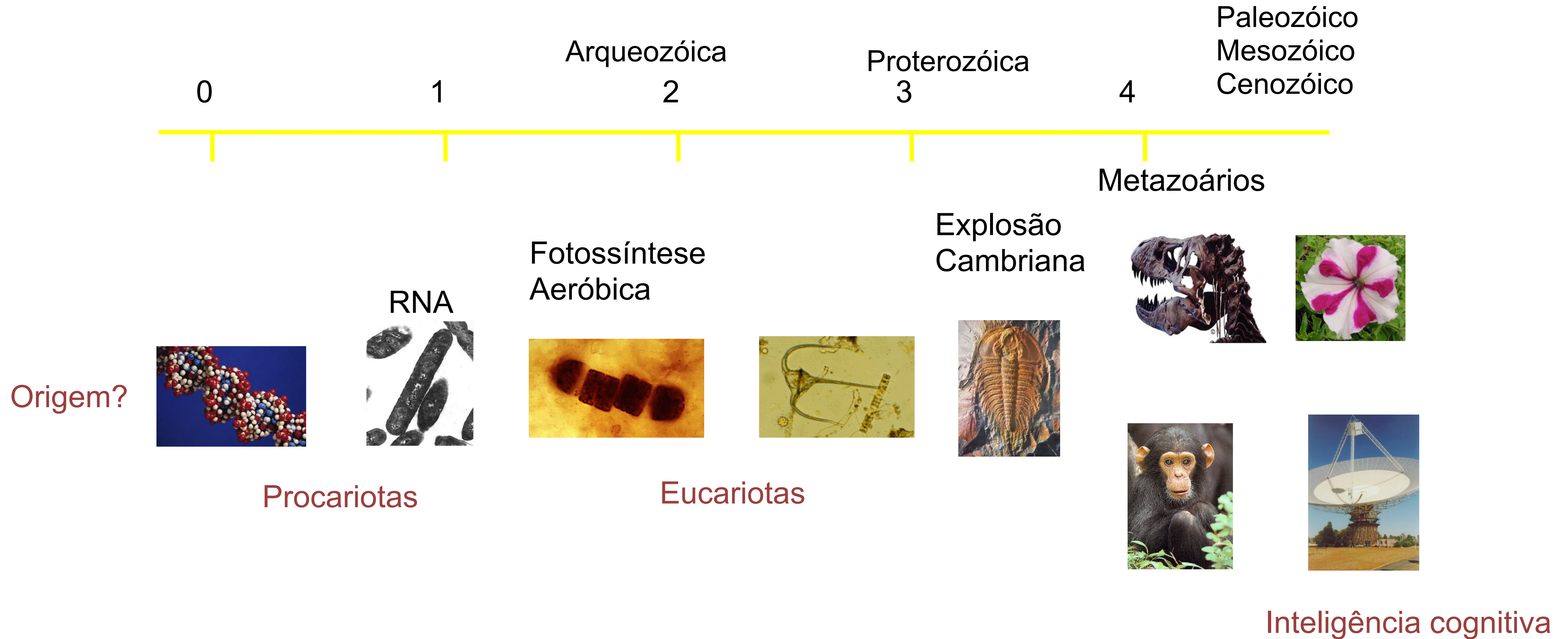
Primeiro aumento do O_2 : camada de ozônio, fósseis visíveis

Segundo aumento de O_2 : vida animal, fósseis abundantes

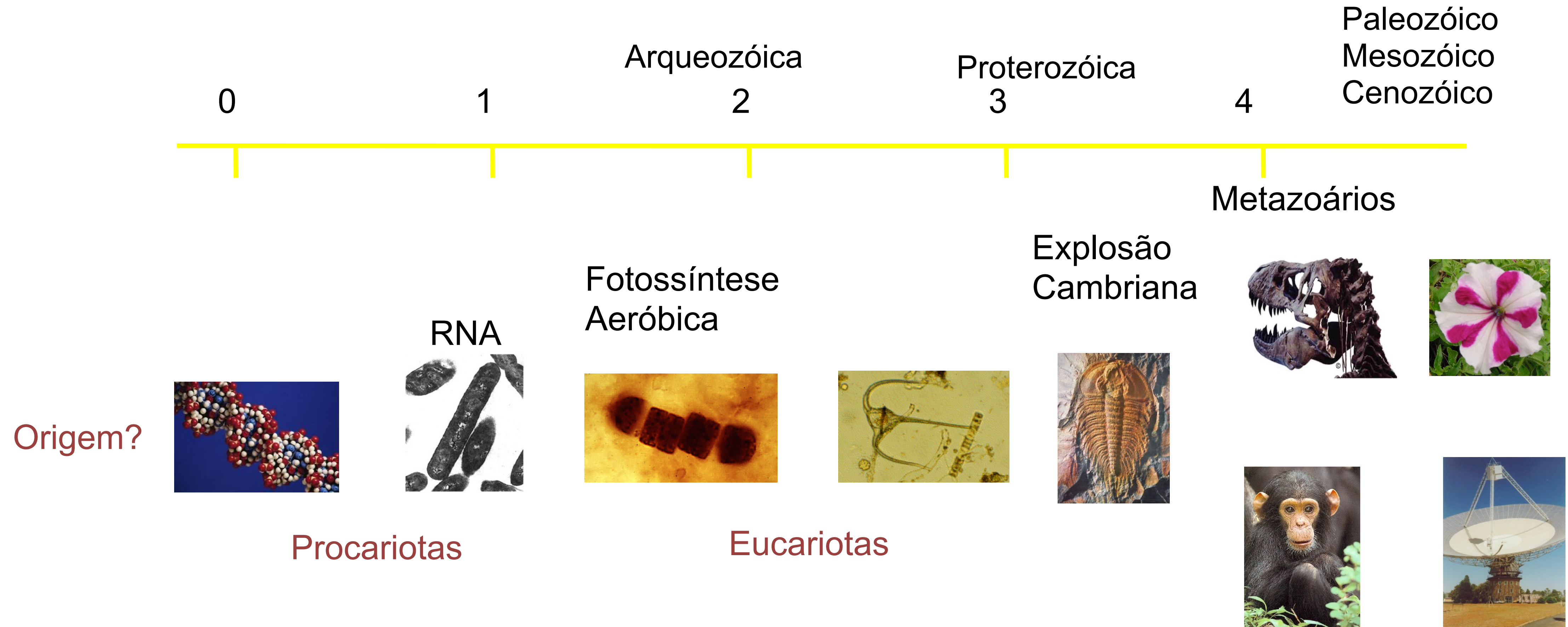
Adaptada de Catling (2006)



Zona Continuamente Habitável e Escalas de Tempo



Zona Continuamente Habitável e Escalas de Tempo



O_3 observável no Proterozóico $\sim 2 \times 10^9$ anos atrás (Segura et al 2003)

CH_4 observável apenas a 10^{-1} PAL de O_2 (Proterozóico)

Eventos de oxigenação (Blair-Hedges et al 2004): ~ 2.3 e 3.0×10^9 anos de idade

Leitos vermelhos

as rochas arenosas
avermelhadas apareceram há
~ 2,3 Gaos

Fe_2O_3 requer a presença
de O atmosférico



Oxigênio e o tamanho da vida

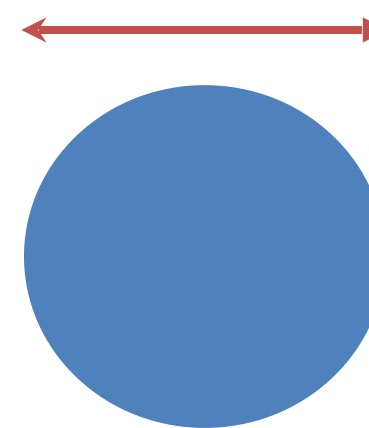
Tempo de oxigenação, 3,9 bilhões de anos

O_2 desprezível



$O_2 \sim 1\%$ do valor atual

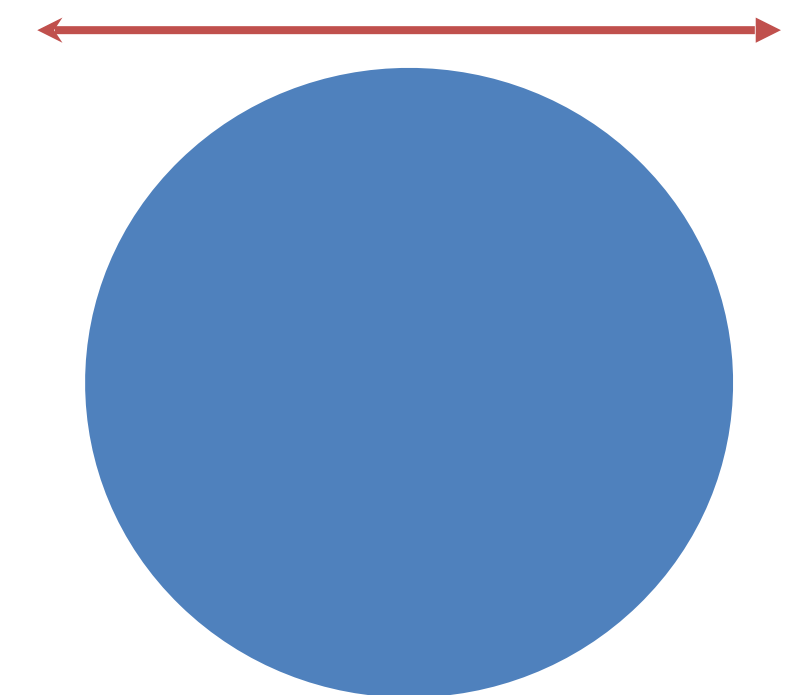
$\sim 1 \text{ mm}$



Tamanho limitado
por difusão

$O_2 \sim 10\text{--}100\%$ do valor atual

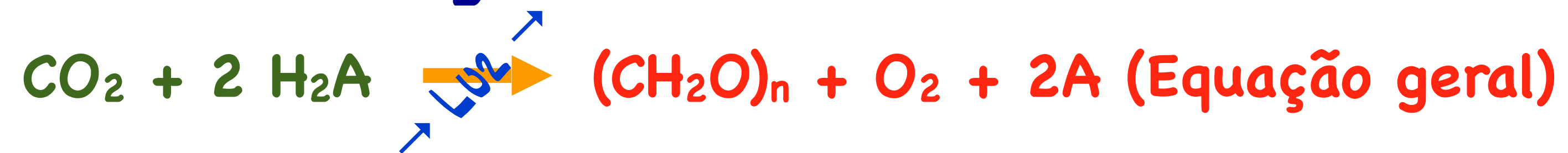
$\sim 1 \text{ cm}$



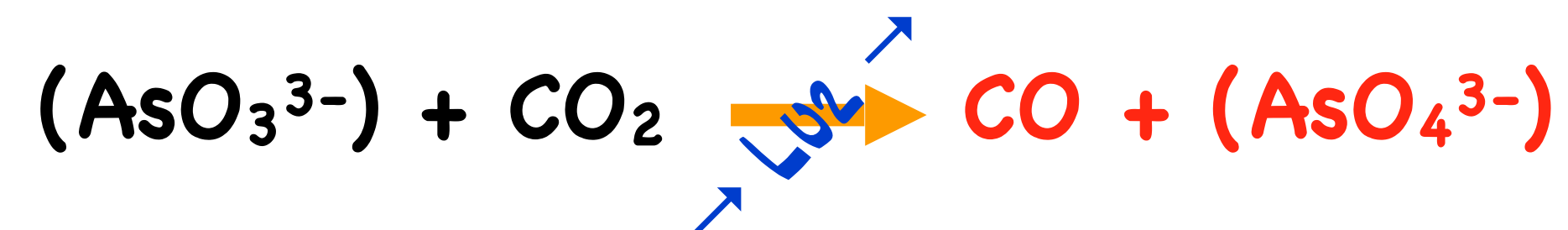
Possibilidade de circulação
Possibilidade de complexidade
Diversos níveis tróficos



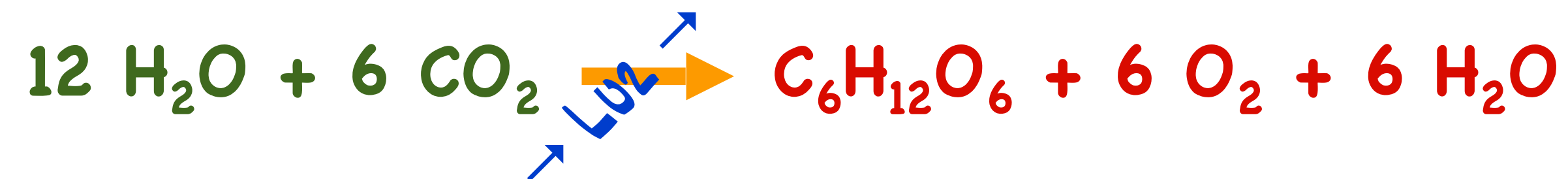
Reações de fotossíntese



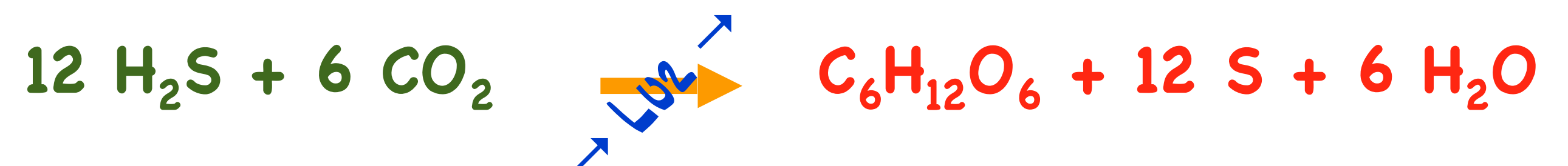
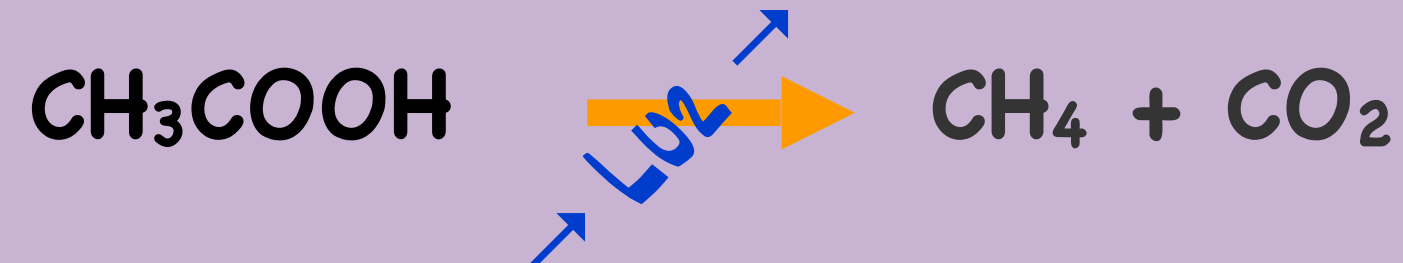
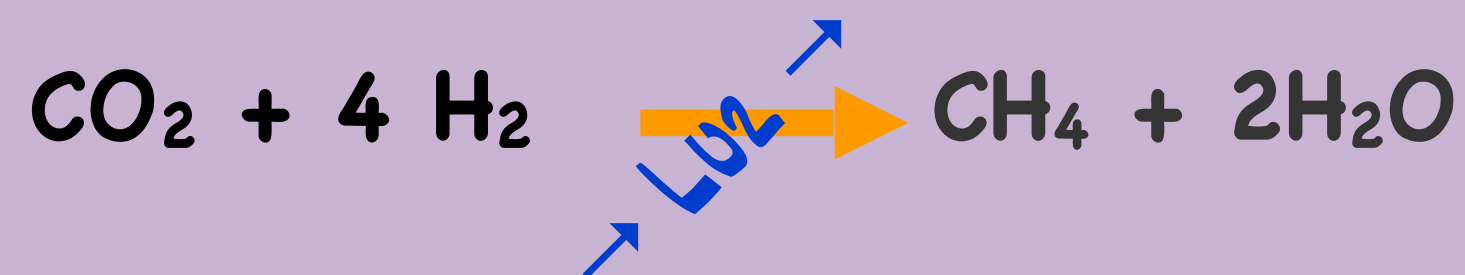
Alguns outros processos (e.g., usados por micróbios no Lago Mono - Califórnia) substituem água por outros compostos (Arsenito) no papel de doador de elétron. A equação fica, então:



A reação conhecida de fotossíntese, transformando gás carbônico em oxigênio é:

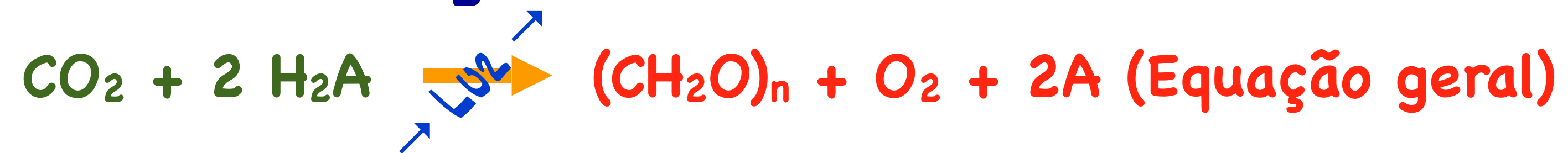


E os processos a seguir são todos anaeróbicos

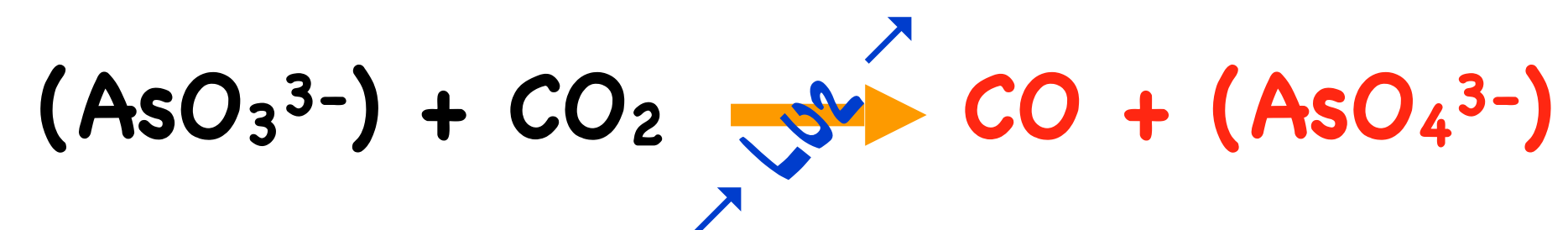




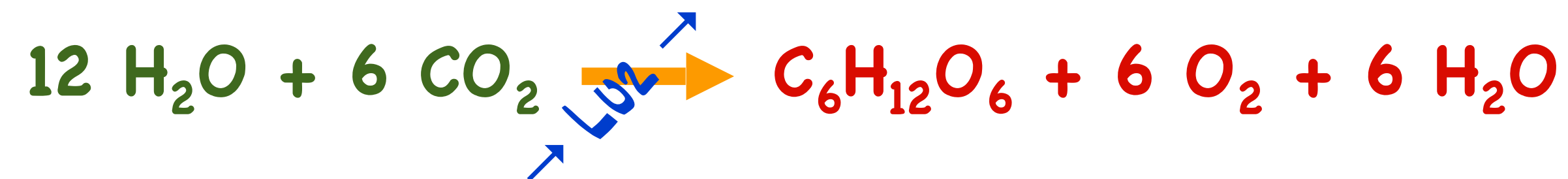
Reações de fotossíntese



Alguns outros processos (e.g., usados por micróbios no Lago Mono - Califórnia) substituem água por outros compostos (Arsenito) no papel de doador de elétron. A equação fica, então:

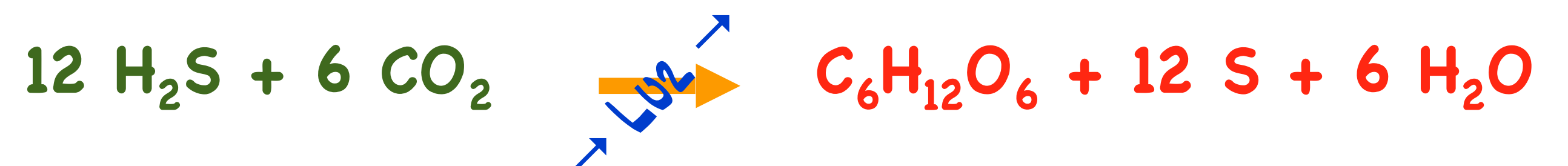
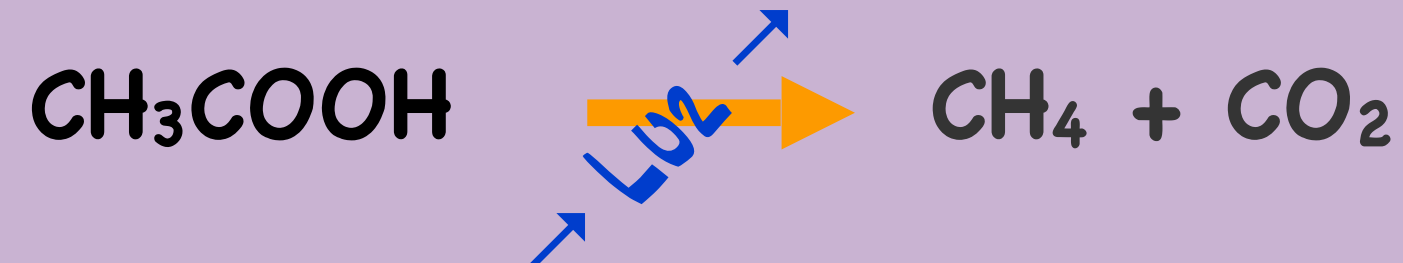
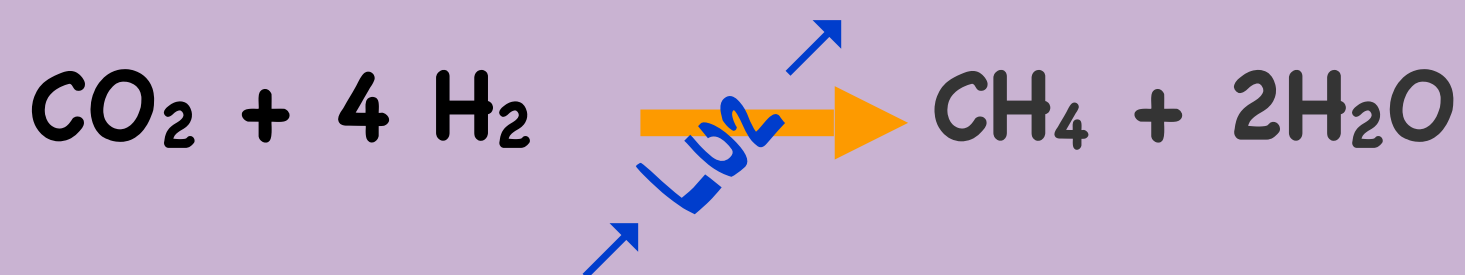


A reação conhecida de fotossíntese, transformando gás carbônico em oxigênio é:



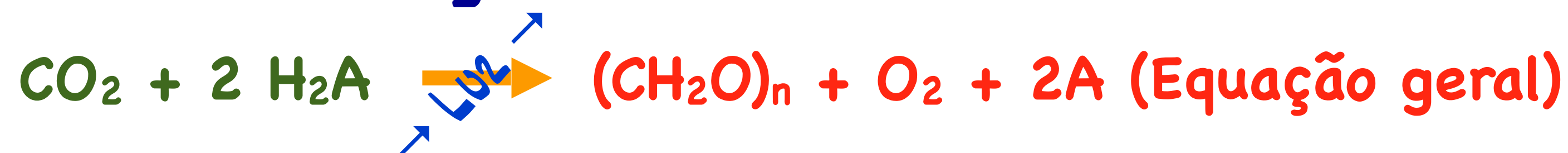
E os processos a seguir são todos anaeróbicos

METANOGENÊSE

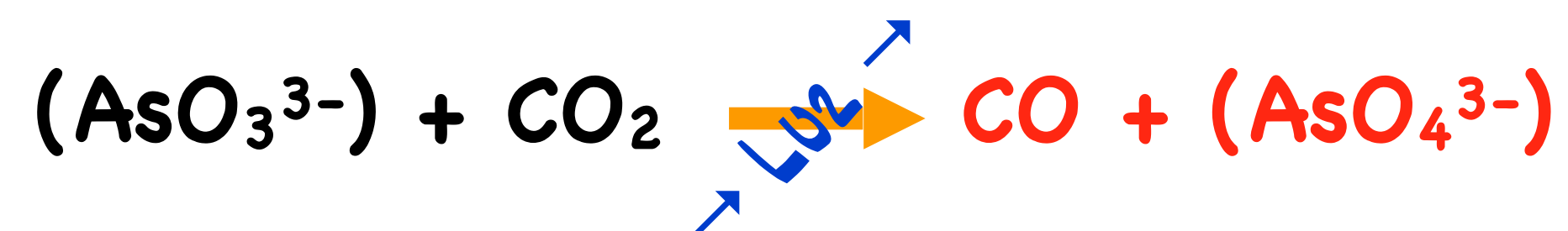




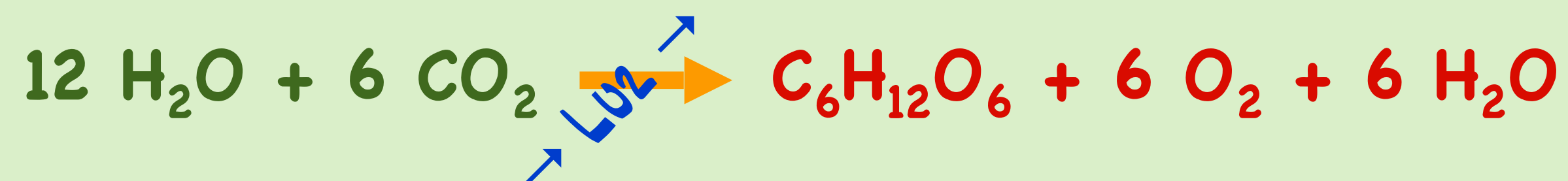
Reações de fotossíntese



Alguns outros processos (e.g., usados por micróbios no Lago Mono - Califórnia) substituem água por outros compostos (Arsenito) no papel de doador de elétron. A equação fica, então:

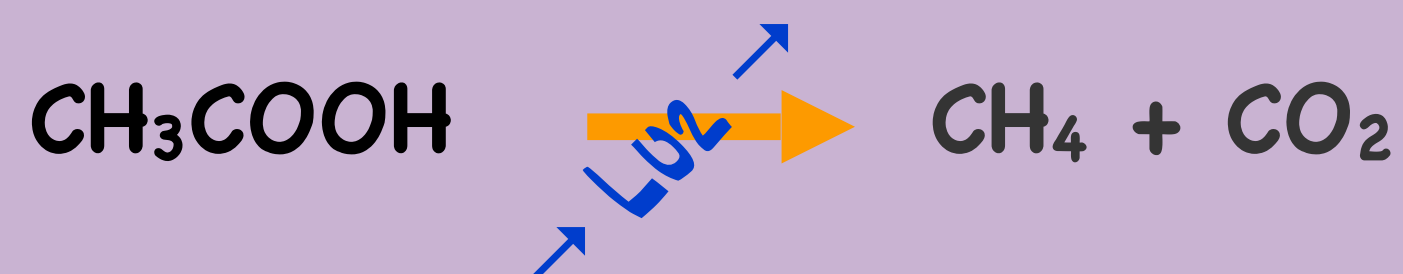
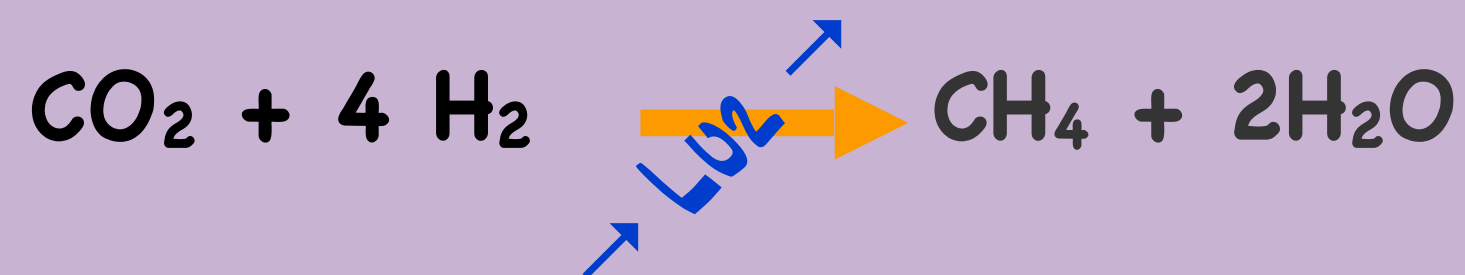


A reação conhecida de fotossíntese, transformando gás carbônico em oxigênio é:

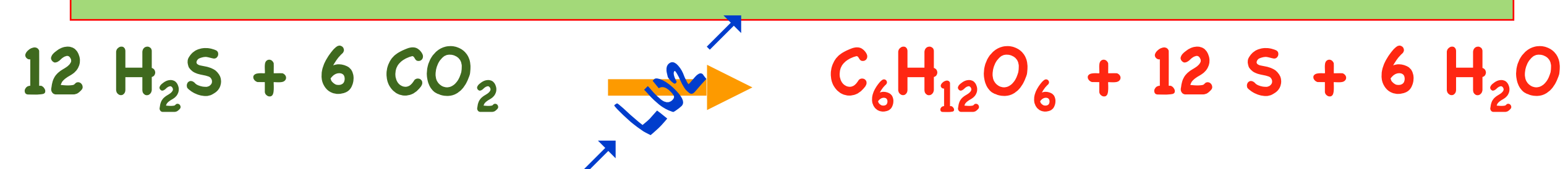


E os processos a seguir são todos anaeróbicos

METANOGENÊSE

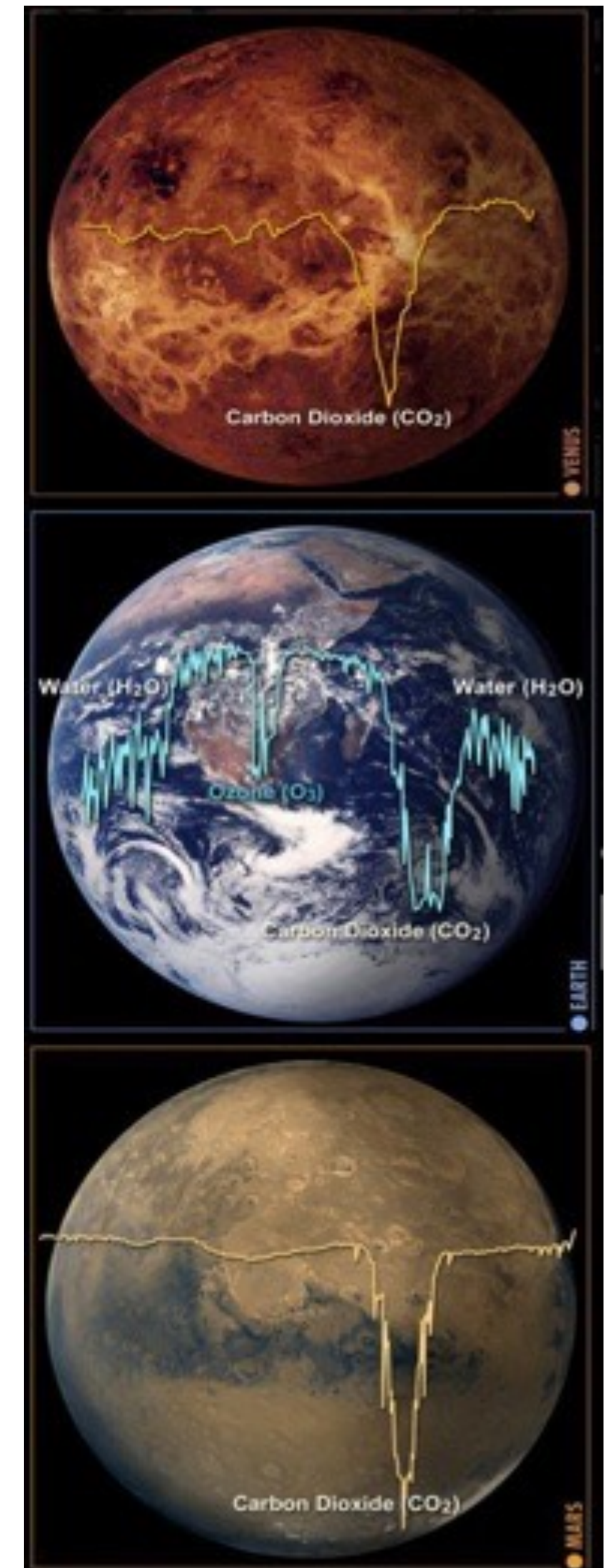


MUITO MAIS EFICIENTE QUE TODAS AS OUTRAS
(32x mais do que a reação com H₂S)

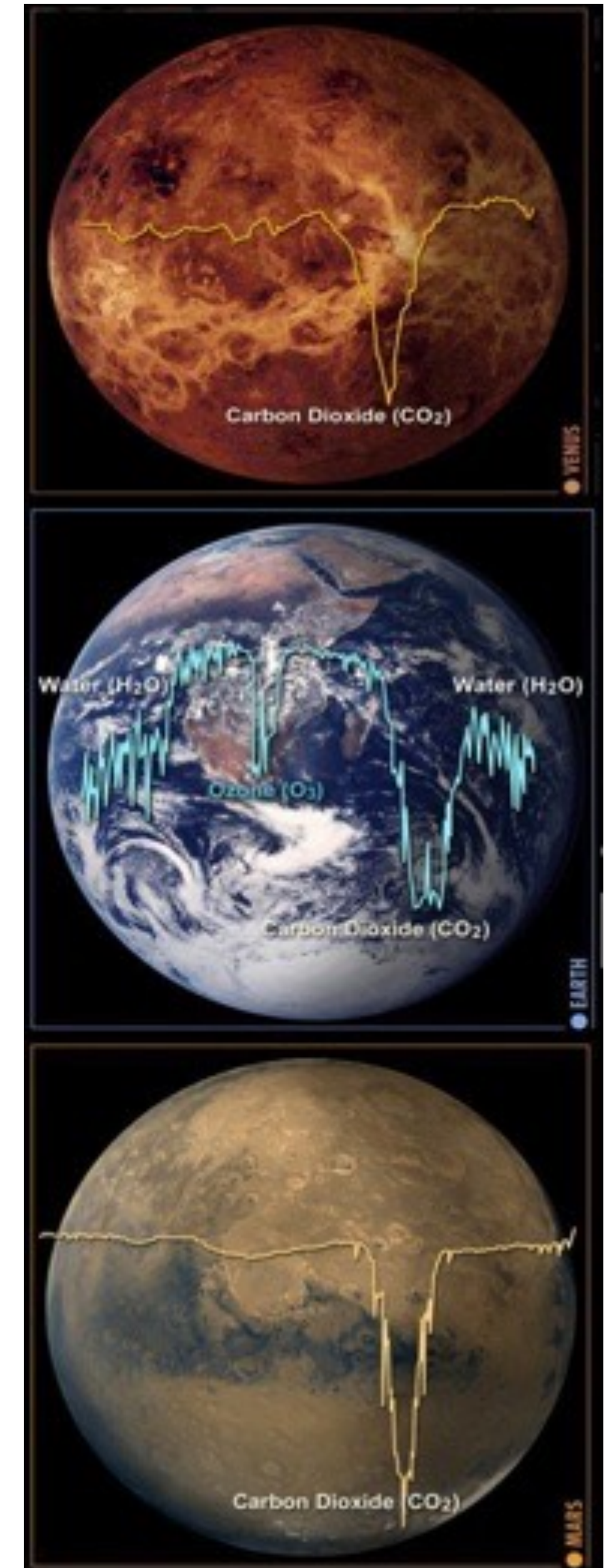
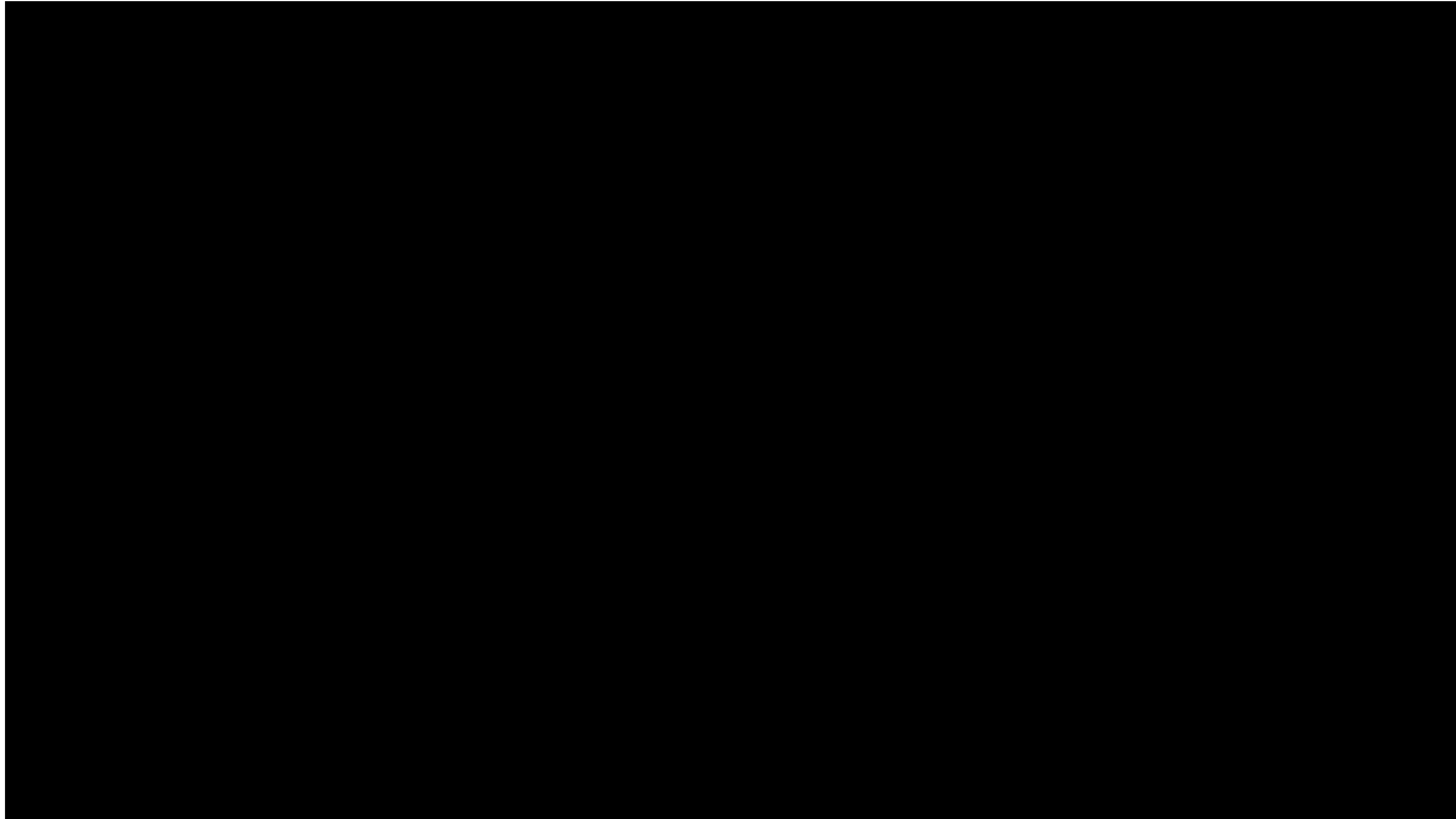




Possibilidade de detecção remota de vida

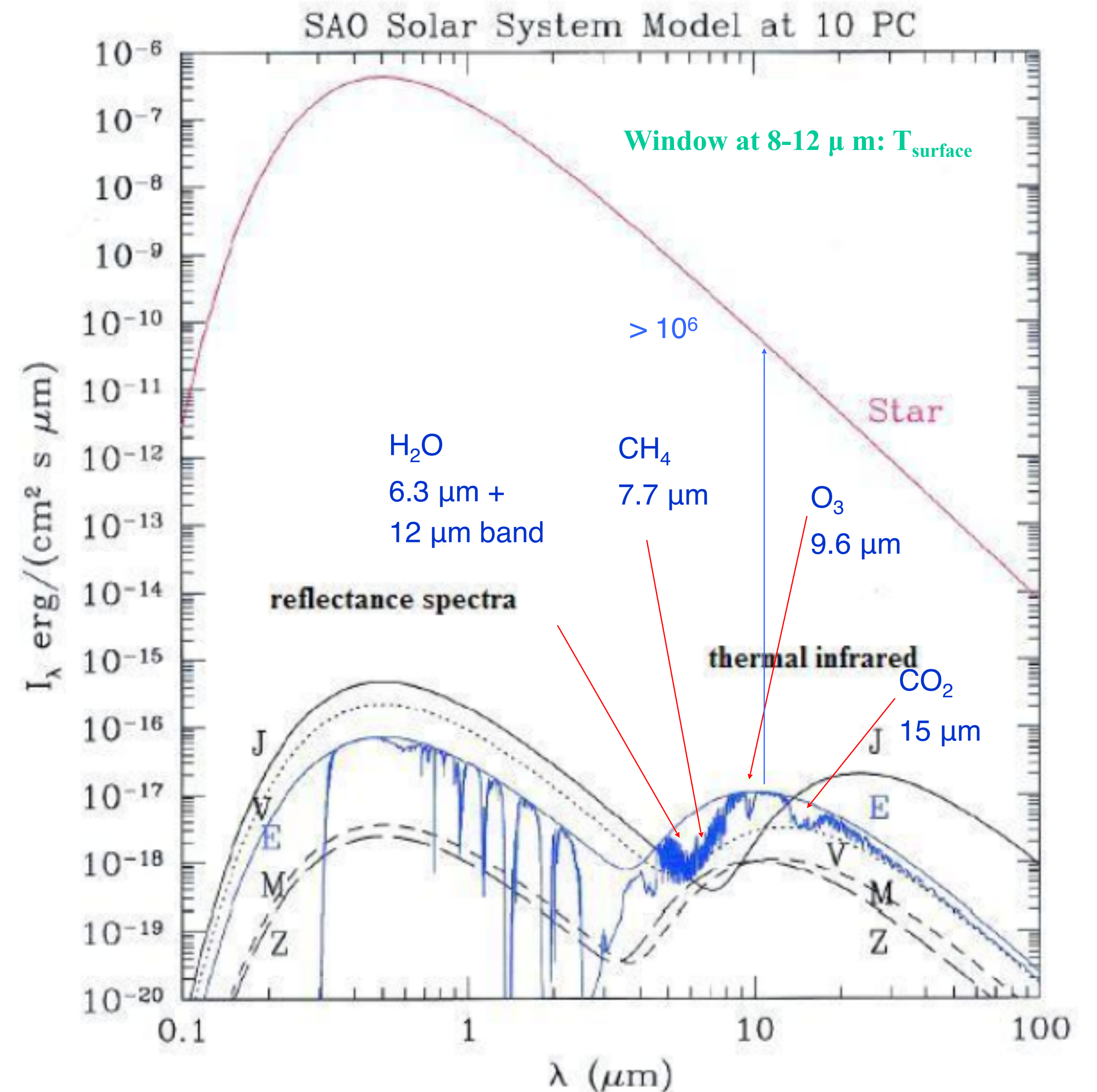
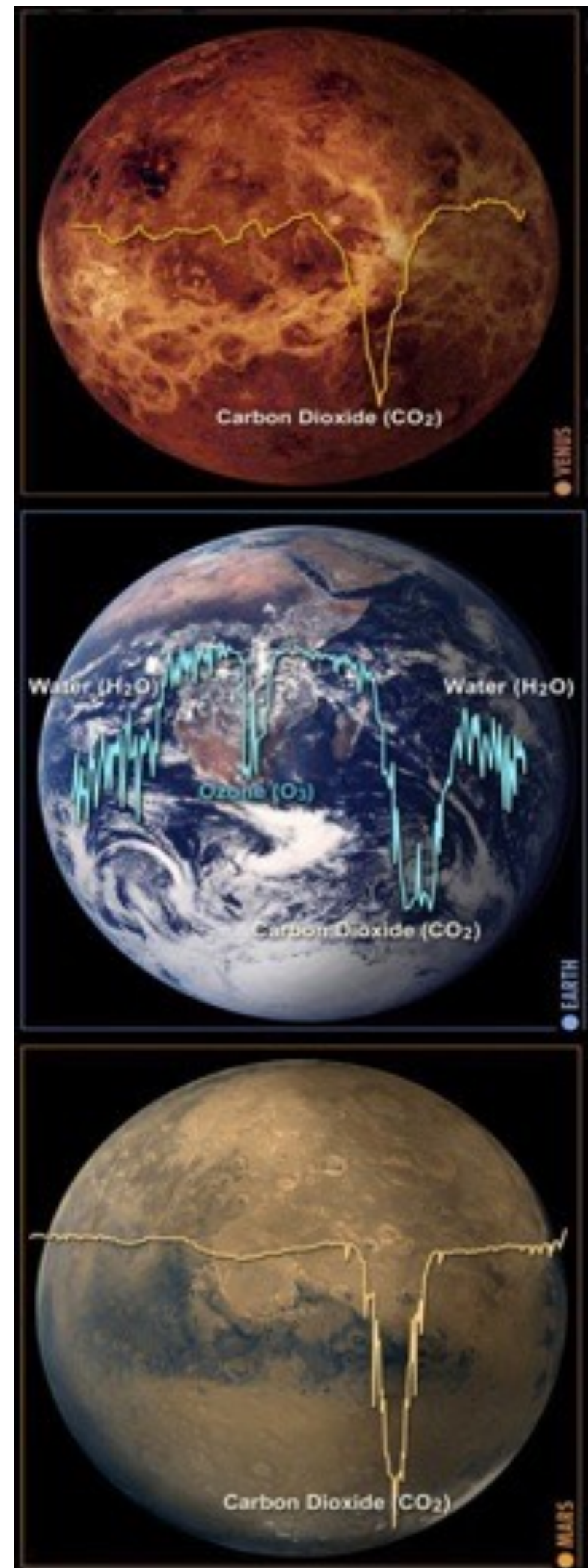


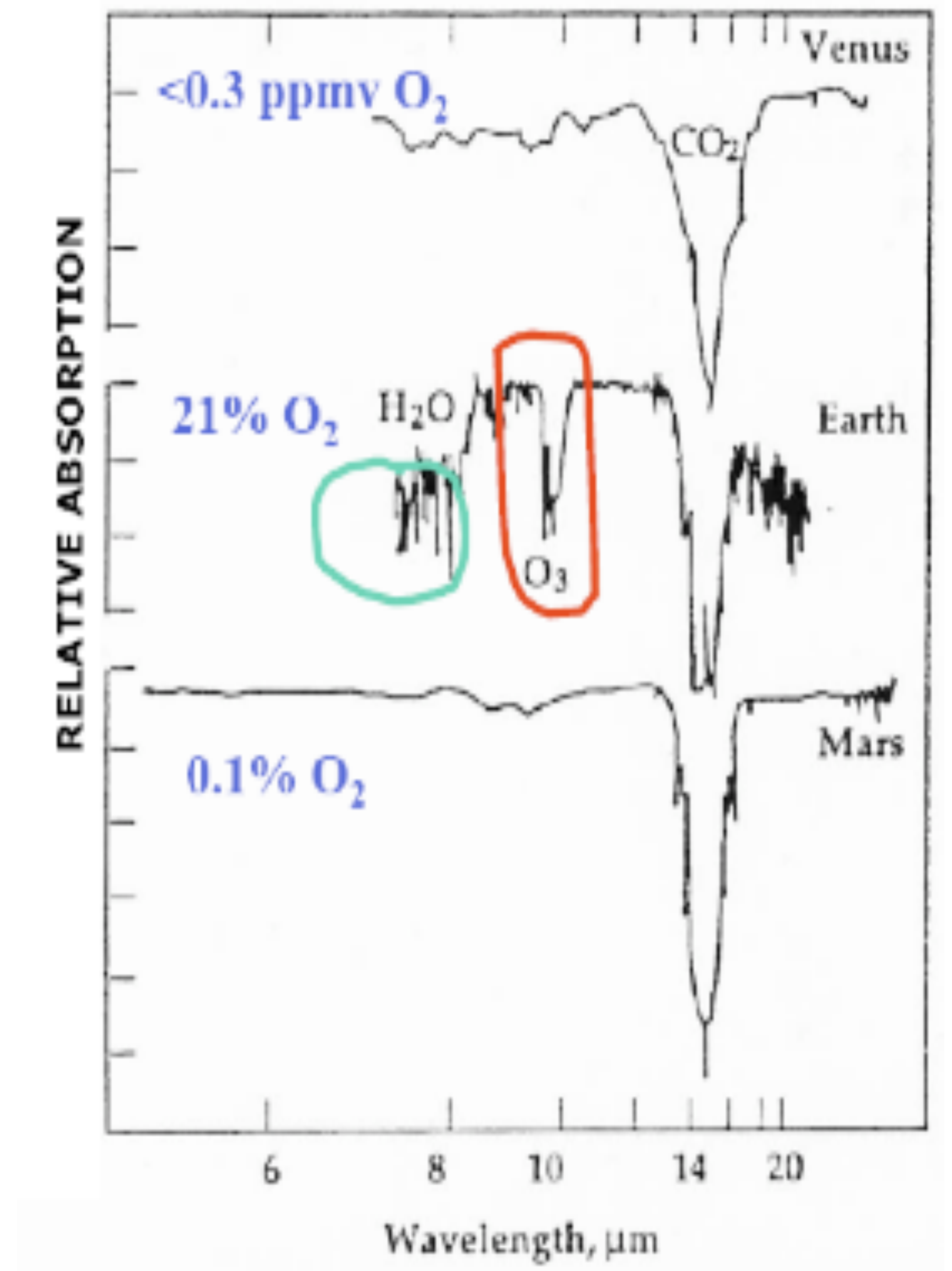
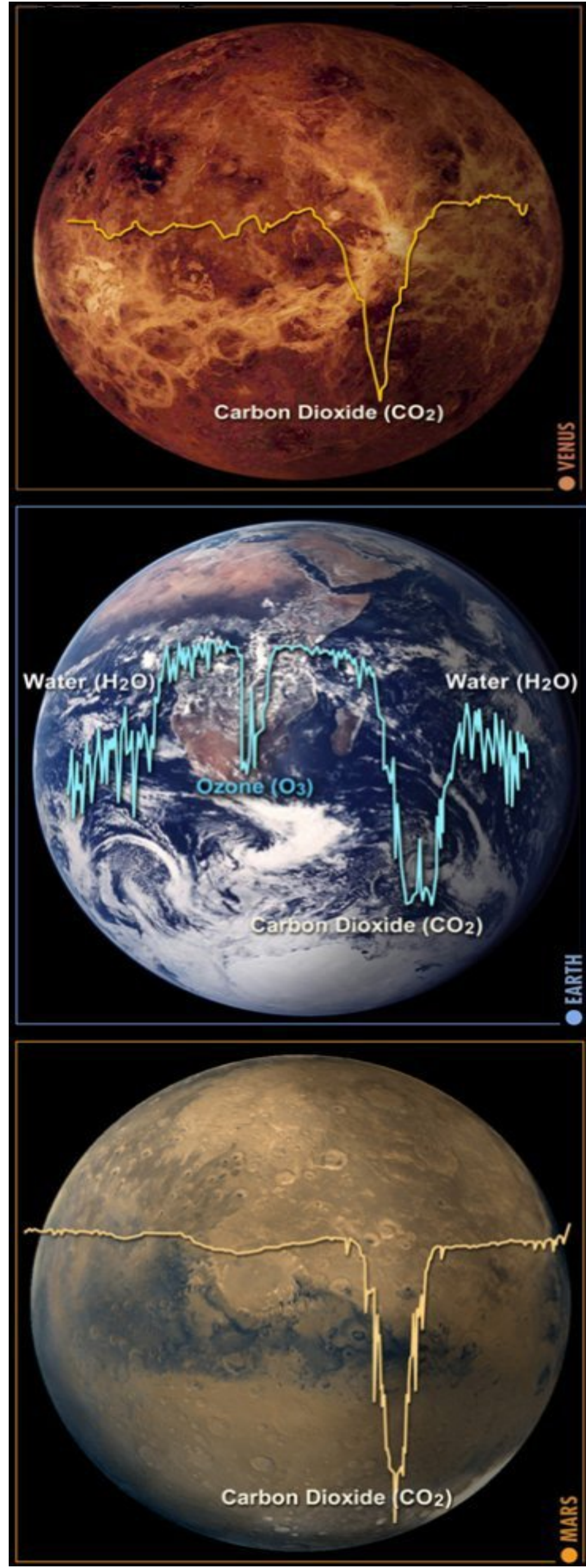
Possibilidade de detecção remota de vida



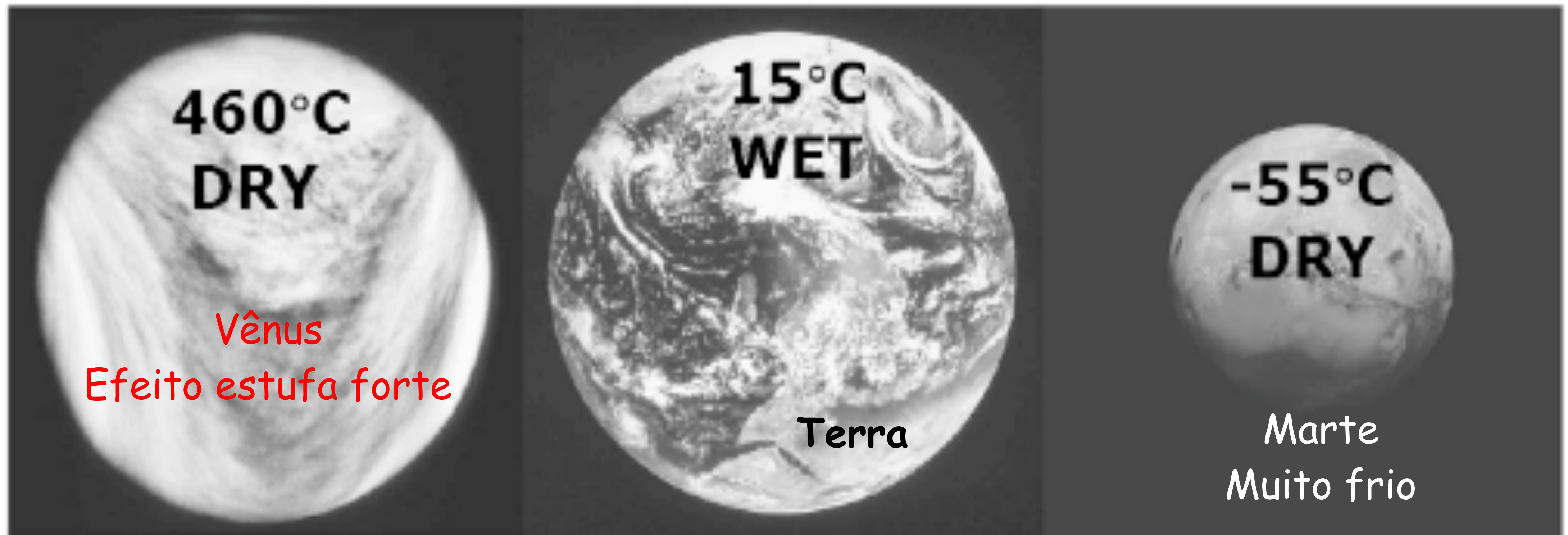
Caracterização de um sistema habitável

Contraste planeta/estrela no **IV térmico**
(Des Marais et al. ,2002, Segura et al. 2003)





3 planetas diferentes, 3 climas diferentes



Muito perto do Sol
Oceanos evaporaram
Muito seco e sem
tectônica de placas

Oceanos
Tectônica de placas
Ciclo atmosférico de C
Vida

Muito pequeno
Sem tectônica de placas
Perda de atmosfera
Muito distante (frio)



Ausência de ciclos carbonatos-silicatos

☑ Vênus

- ✓ Ausência de água líquida
- ✓ Ausência de chuva e erosão dos silicatos
- ✓ Acúmulo de CO_2 vulcânico

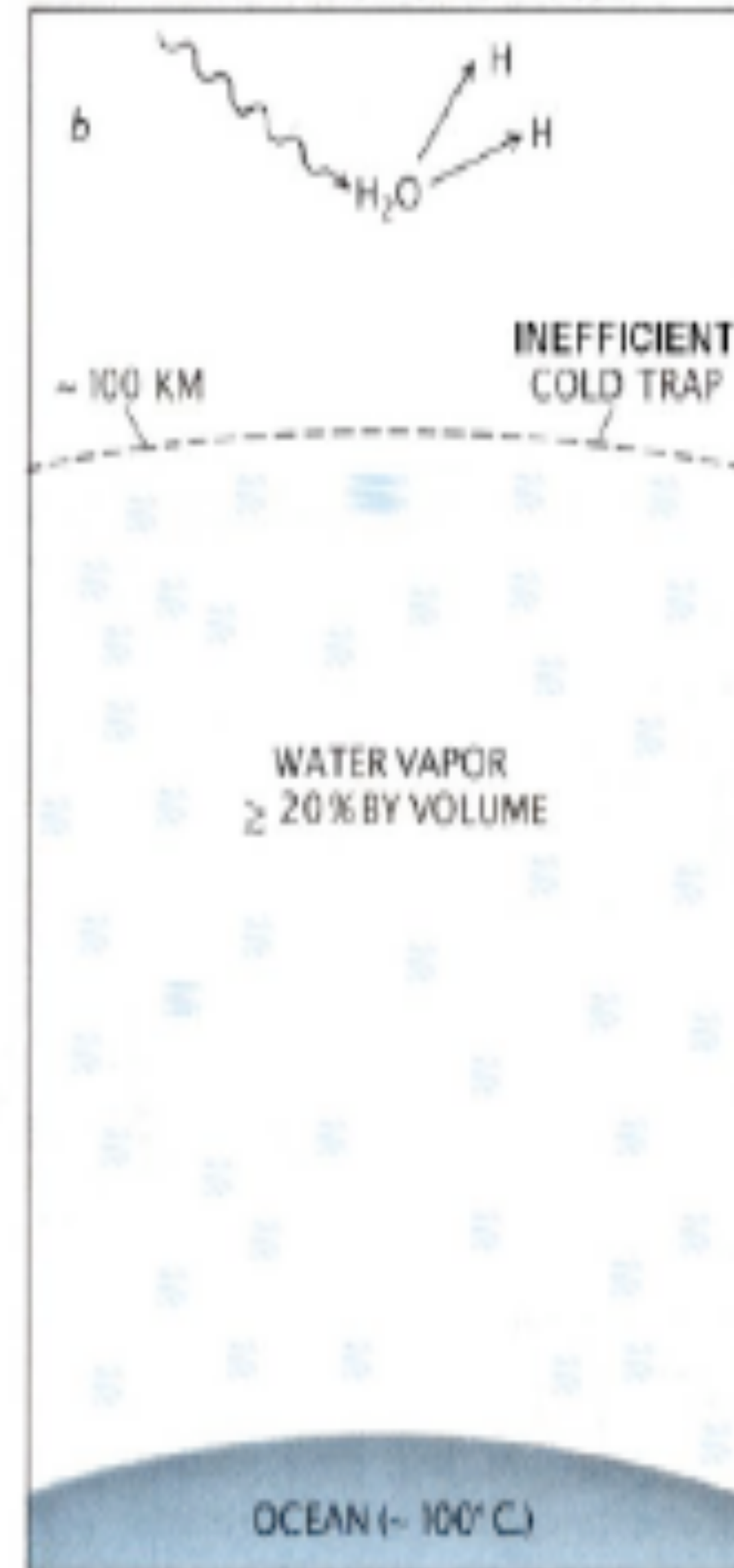
☑ Marte

- ✓ Ausência de vulcanismo
- ✓ Ausência de reposição de CO_2
- ✓ Perda de CO_2 para o espaço

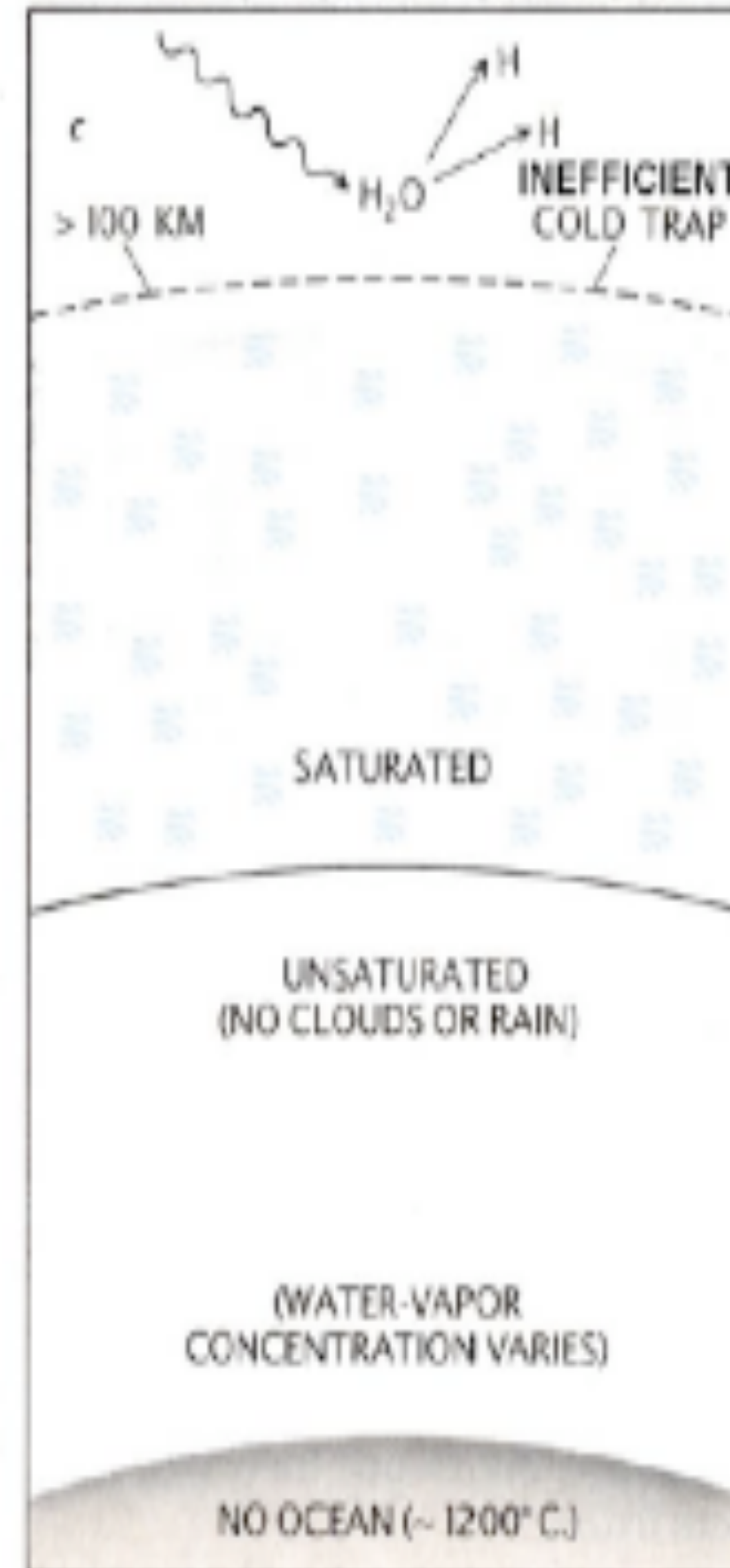
EARTH'S ATMOSPHERE



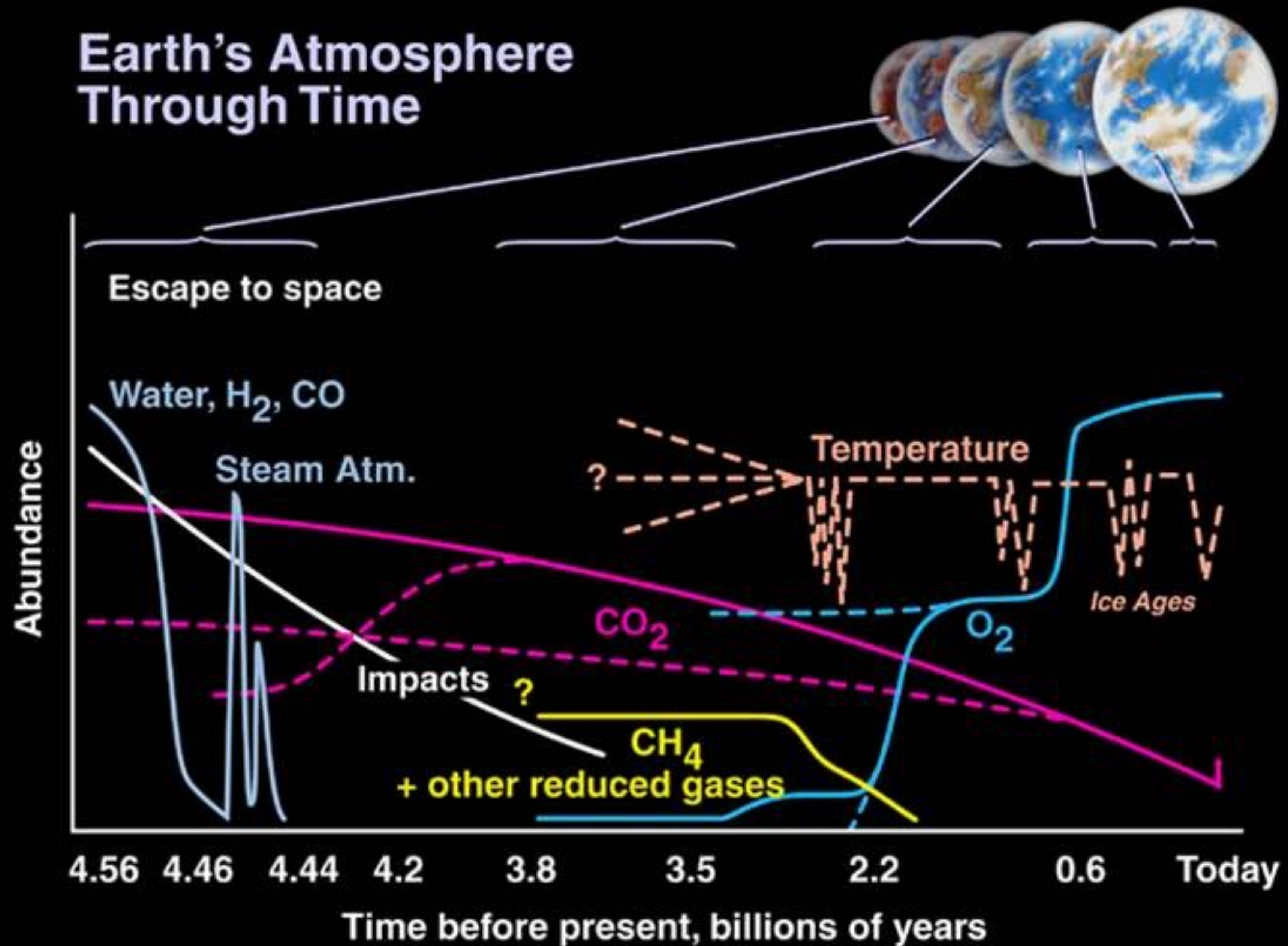
EARLY VENUS—MOIST GREENHOUSE



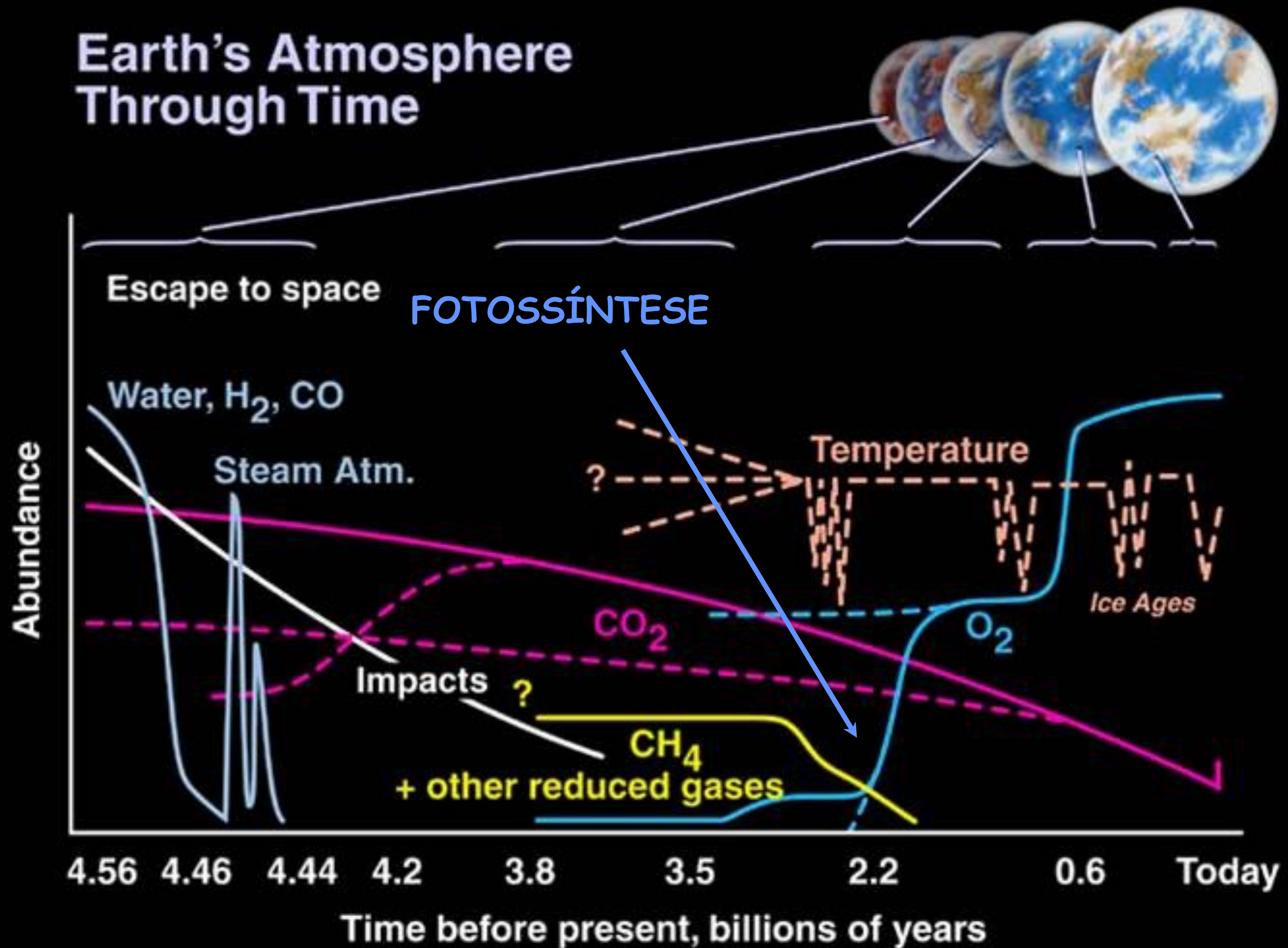
EARLY VENUS—RUNAWAY GREENHOUSE



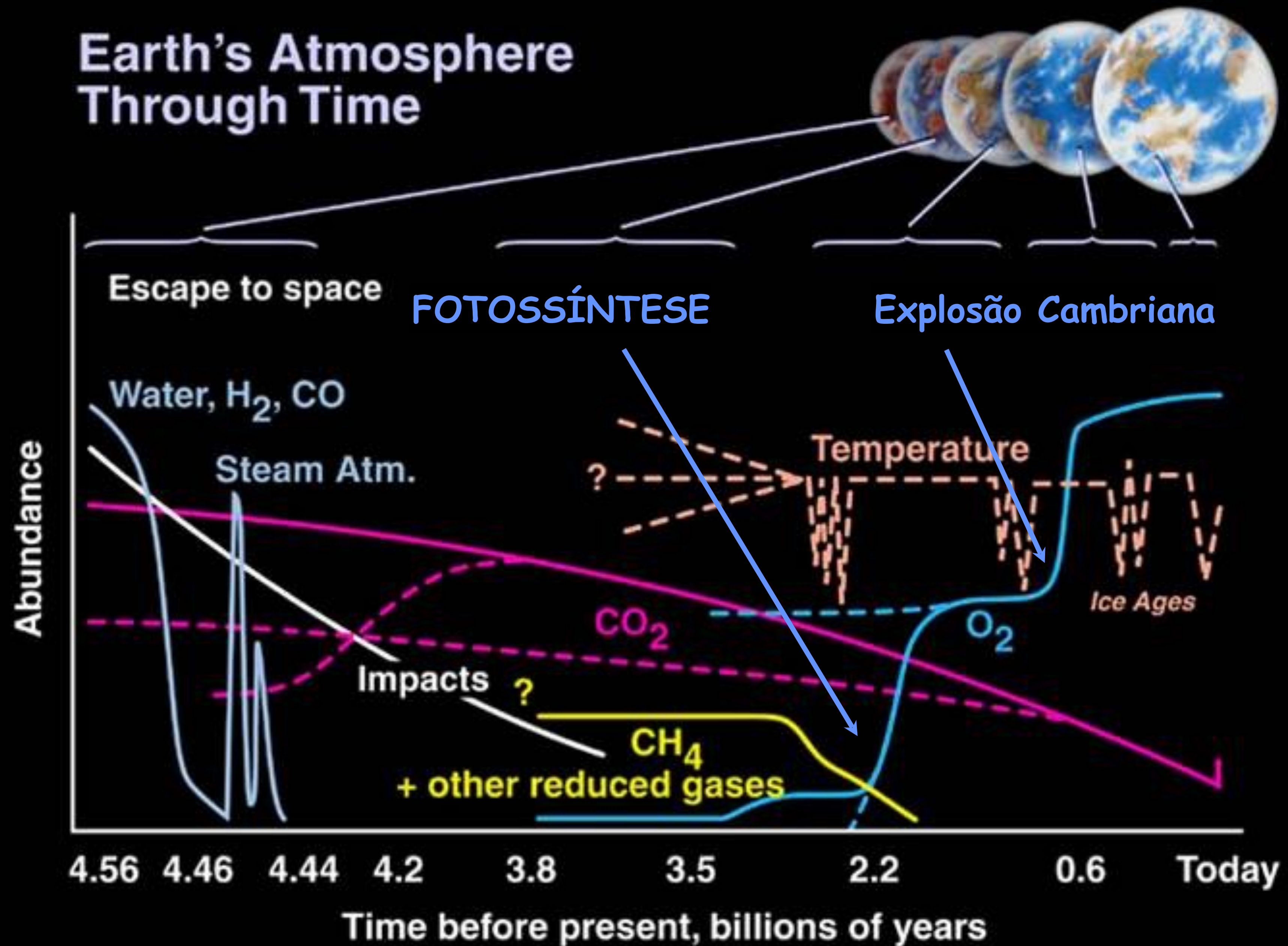
Earth's Atmosphere Through Time



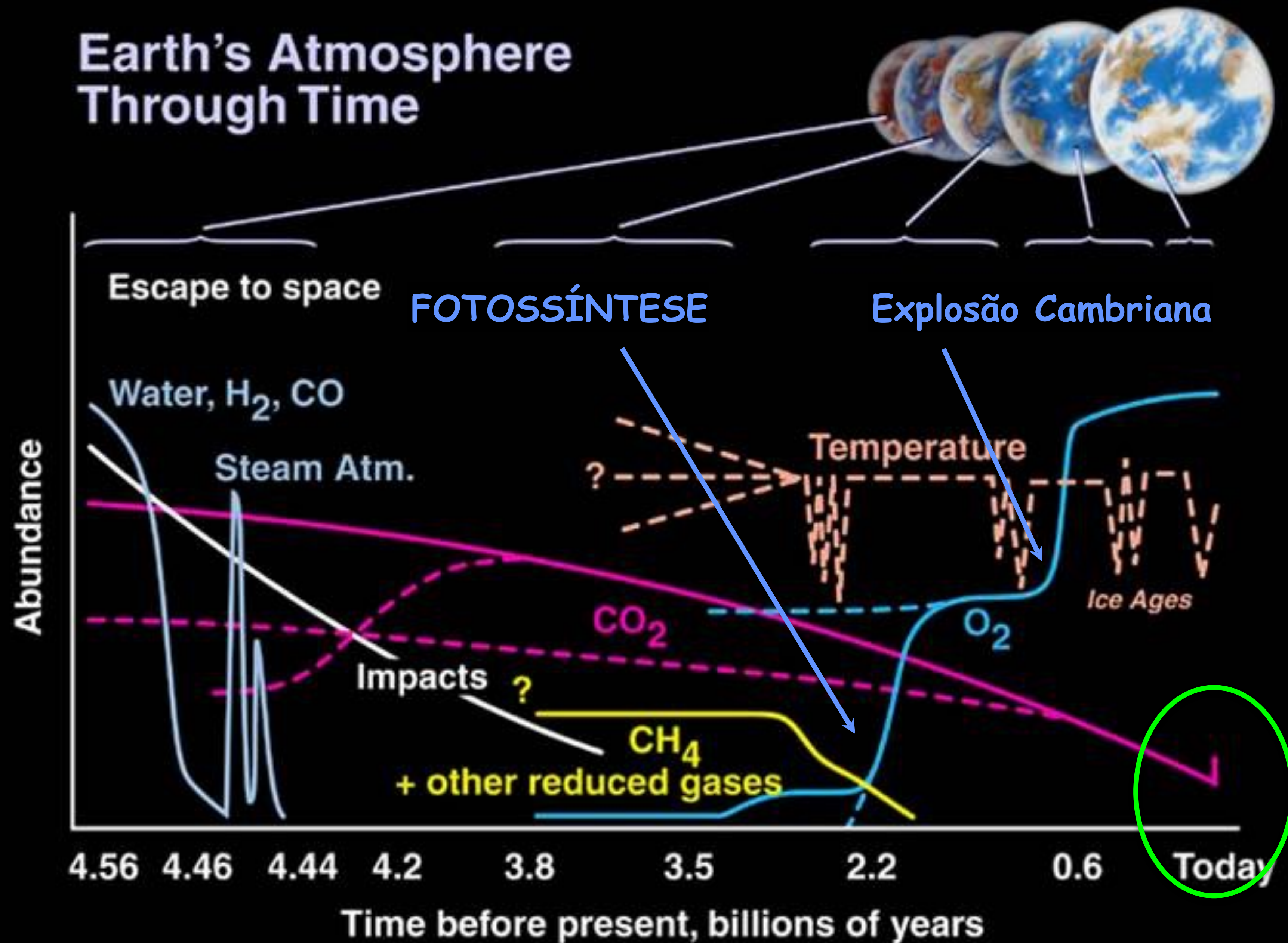
Earth's Atmosphere Through Time



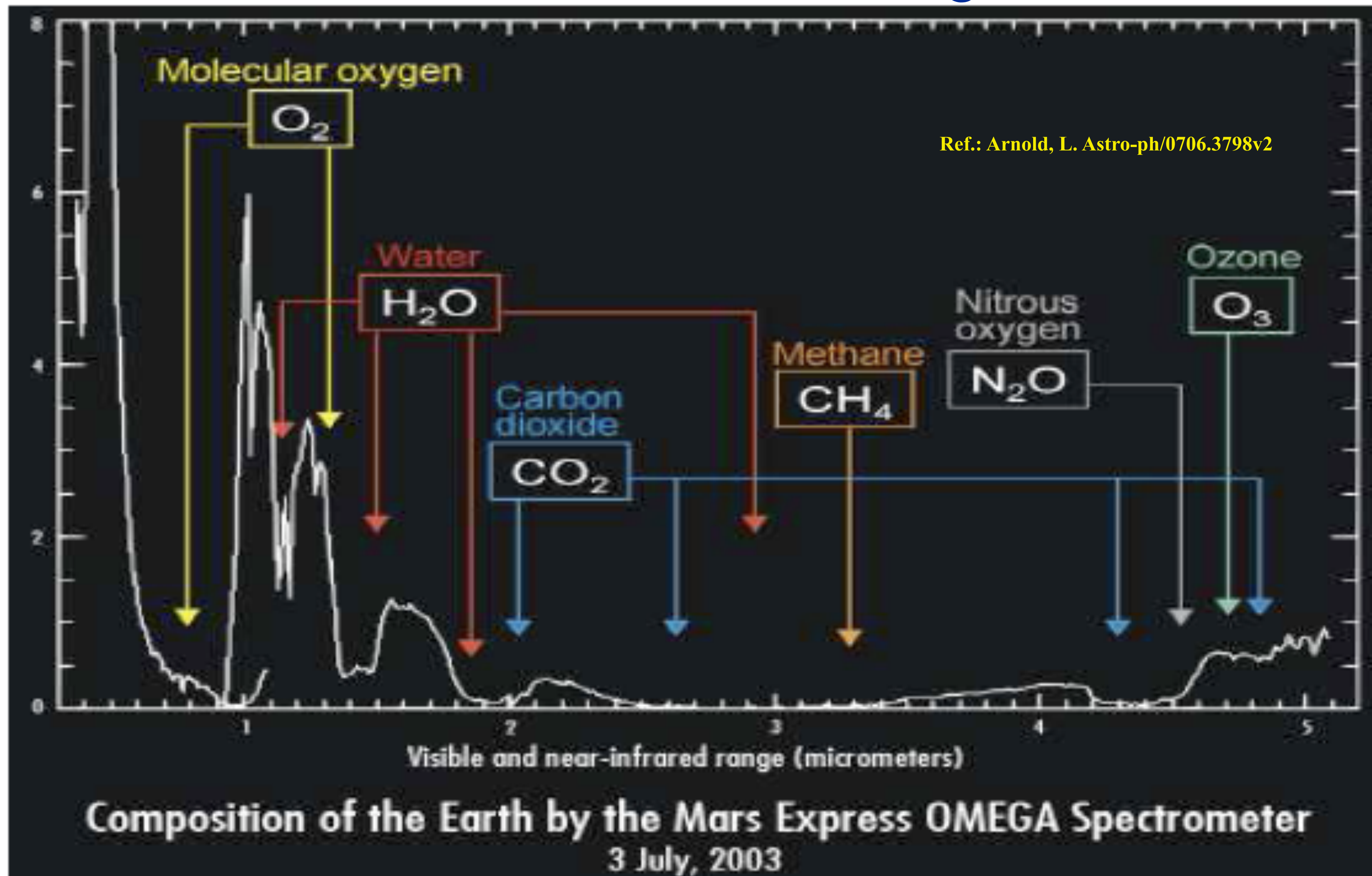
Earth's Atmosphere Through Time



Earth's Atmosphere Through Time



A Terra vista de longe...





Razões para habitabilidade na Terra

- ☑ Água líquida permitiu o aparecimento de micróbios
- ☑ Tectônica de placas permitiu a reposição de CO₂ para a persistência da vida
- ☑ Campos magnéticos evitaram que gases atmosféricos escapassem para o espaço (exceto H, He). Daí...
 - ✓ Micróbios produziram O₂, CH₄ ⇒ CH₄ e depois O₂ dominou
 - ✓ Camada de ozônio formou-se a ~ 2.3 bilhões de anos
 - ✓ Desenvolvimento de algas simples e fungos
 - ✓ Mais O₂ e animais em 600 milhões de anos
 - ✓ Humanos modernos há cerca de 2 milhões de anos



Razões para habitabilidade na Terra

- ☑ Água líquida permitiu o aparecimento de micróbios
- ☑ Tectônica de placas permitiu a reposição de CO_2 para a persistência da vida
- ☑ Campos magnéticos evitaram que gases nocivos escapassem para o espaço (exceto H, He). Daí...
 - ✓ Micróbios produziram O_2 , CH_4 ⇒ depois O_2 dominou
 - ✓ Camada de ozônio formada 2.3 bilhões de anos
 - ✓ Desenvolvimento de plantas e fungos
 - ✓ Mais O_2 e ar 600 milhões de anos
 - ✓ Humanos modernos há cerca de 2 milhões de anos



Condições de habitabilidade

(a **NOSSA** receita)

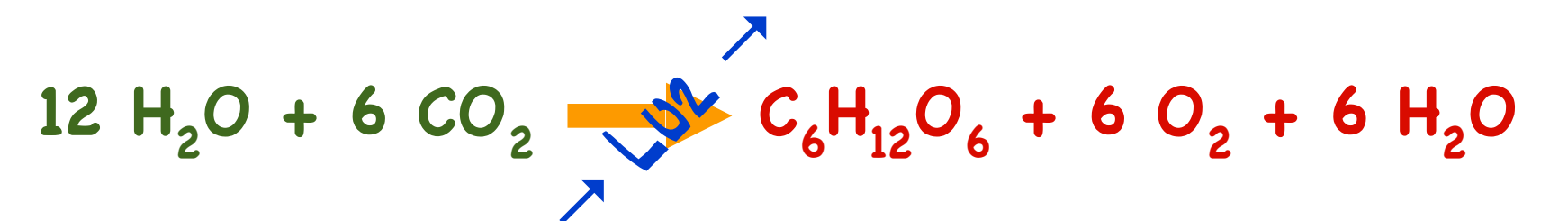
🔧 Condições terrestres

- 🔧 **Intenso bombardeamento por meteoritos** no início da formação da Terra (primeiros 700 milhões de anos)
- 🔧 **Resistência a catástrofes** por ~ 1 bilhão de anos

🔧 **DISPONIBILIDADE DE OXIGÊNIO** - Essencial para o aumento da complexidade biológica

🔧 Condições gerais

- 🔧 **Intensa atividade geológica**
- 🔧 **Água** na superfície por, pelo menos, um bilhão de anos
- 🔧 **Existência de campo magnético**
- 🔧 **Estabilidade climática por longos períodos** (dezenas a centenas de milhões de anos)





Condições de habitabilidade

(a **NOSSA** receita)

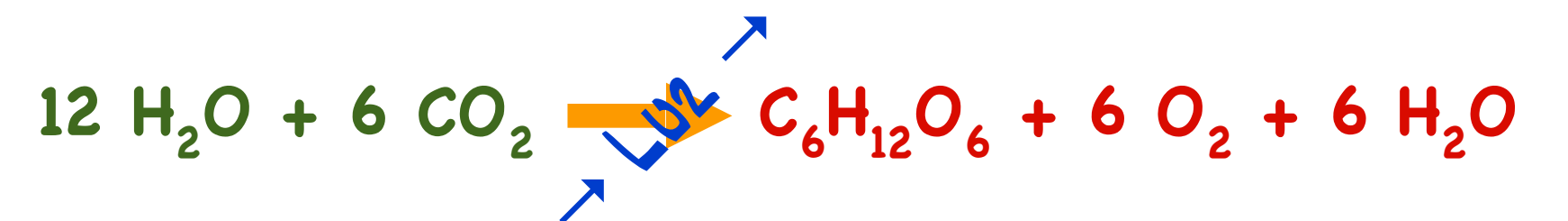
🔧 Condições terrestres

- 🔧 **Intenso bombardeamento por meteoritos** no início da formação da Terra (primeiros 700 milhões de anos)
- 🔧 **Resistência a catástrofes** por ~ 1 bilhão de anos

🔧 **DISPONIBILIDADE DE OXIGÊNIO** - Essencial para o aumento da complexidade biológica

🔧 Condições gerais

- 🔧 **Intensa atividade geológica**
- 🔧 **Água** na superfície por, pelo menos, um bilhão de anos
- 🔧 **Existência de campo magnético**
- 🔧 **Estabilidade climática por longos períodos** (dezenas a centenas de milhões de anos)





Habitabilidade cósmica

- ☑ Melhor conhecimento da diversidade das formas de vida terrestre permite usá-lo como referência para explorar vida em outros sistemas planetários
- ✓ Novas definições de habitabilidade
- ✓ Novas maneiras de detectar sinais de vida C.A.C.
- ☑ Período de transição para nova instrumentação capaz de caracterizar exoplanetas e explorar suas condições de habitabilidade
- ☑ Detecção de milhares de exoplanetas => novo status para a planetologia comparada (além do Sistema Solar)



Habitabilidade – a perspectiva da Terra

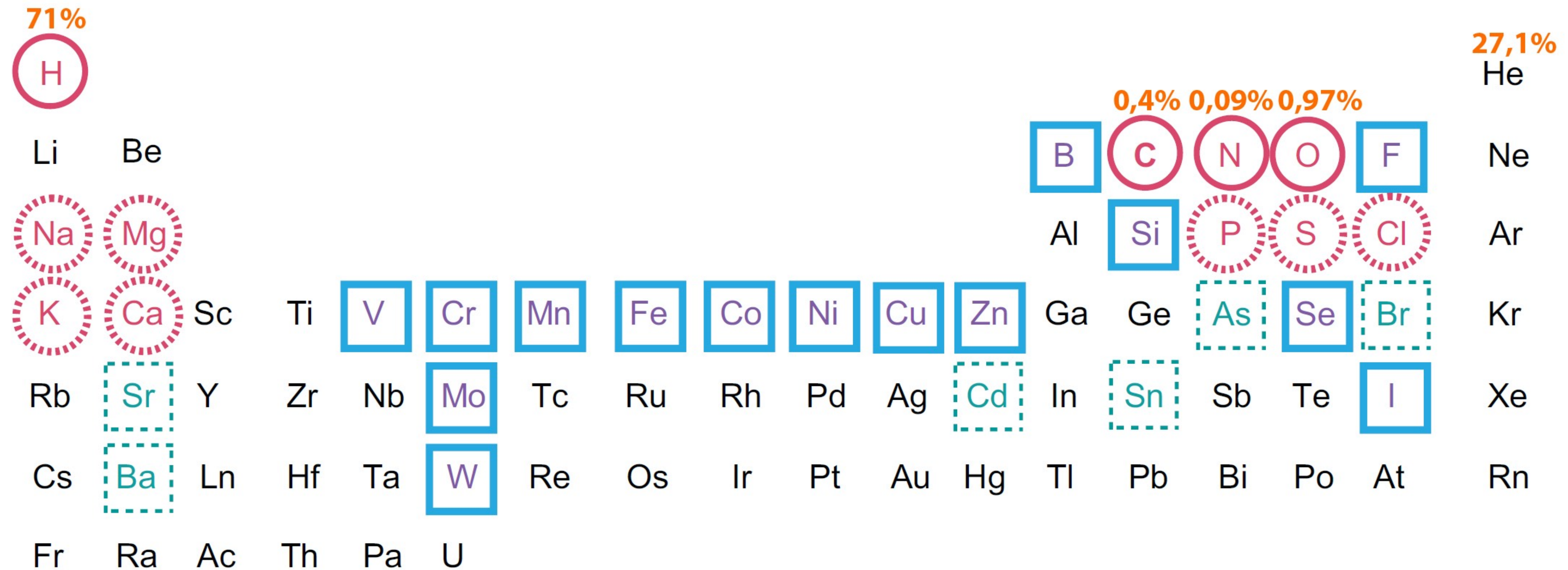
- ☑ Requisitos mínimos (nessa perspectiva) para uma busca com parâmetros de comparação
 - ✓ Fontes potenciais de energia
 - ✓ Composição química do ambiente (com ou sem biotrajadores)
 - ✓ Disponibilidade de um solvente
 - ✓ Vínculos físicos (temperatura, pressão, pH, salinidade, radiação...)



Habitabilidade – a perspectiva da Terra

- ☑ Requisitos mínimos (nessa perspectiva) para uma vida com parâmetros de comparação
 - ✓ Fontes potenciais de energia
 - ✓ Composição química do ambiente (ou sem biotrajadores)
 - ✓ Disponibilidade de um solvente
 - ✓ Vínculos físicos (temperatura, pressão, pH, salinidade, radiação)

Condições necessárias mas não suficientes....



Elementos principais

○ (~ 96.8% peso corporal)

⊙ (~ 3.2% peso corporal)



Traço de elementos que acredita-se serem essenciais para bactérias, plantas e animais



Traço de elementos possivelmente importantes para algumas espécies

Porcentagem em massa de elementos no Sol

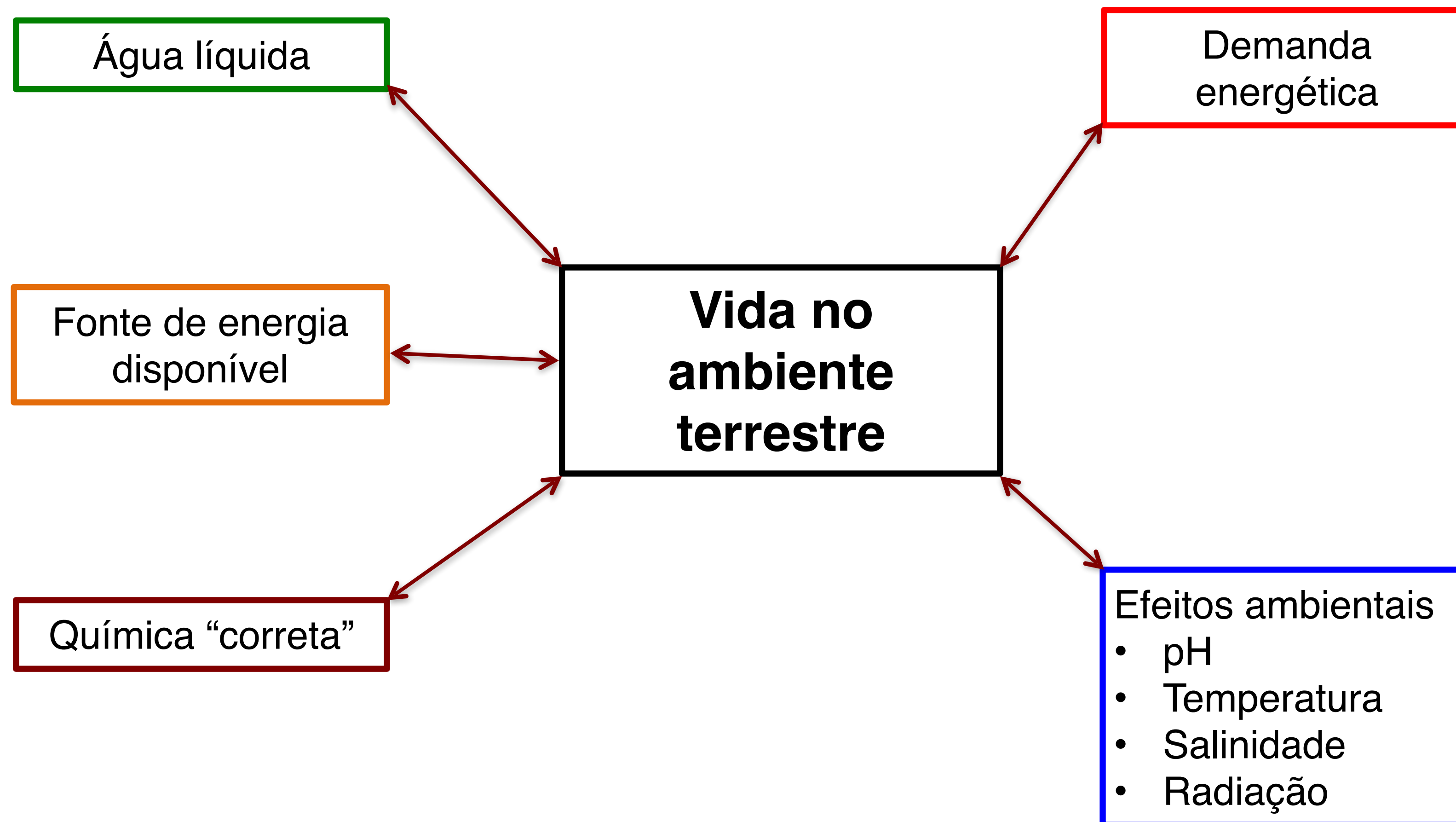


Mais especificamente...

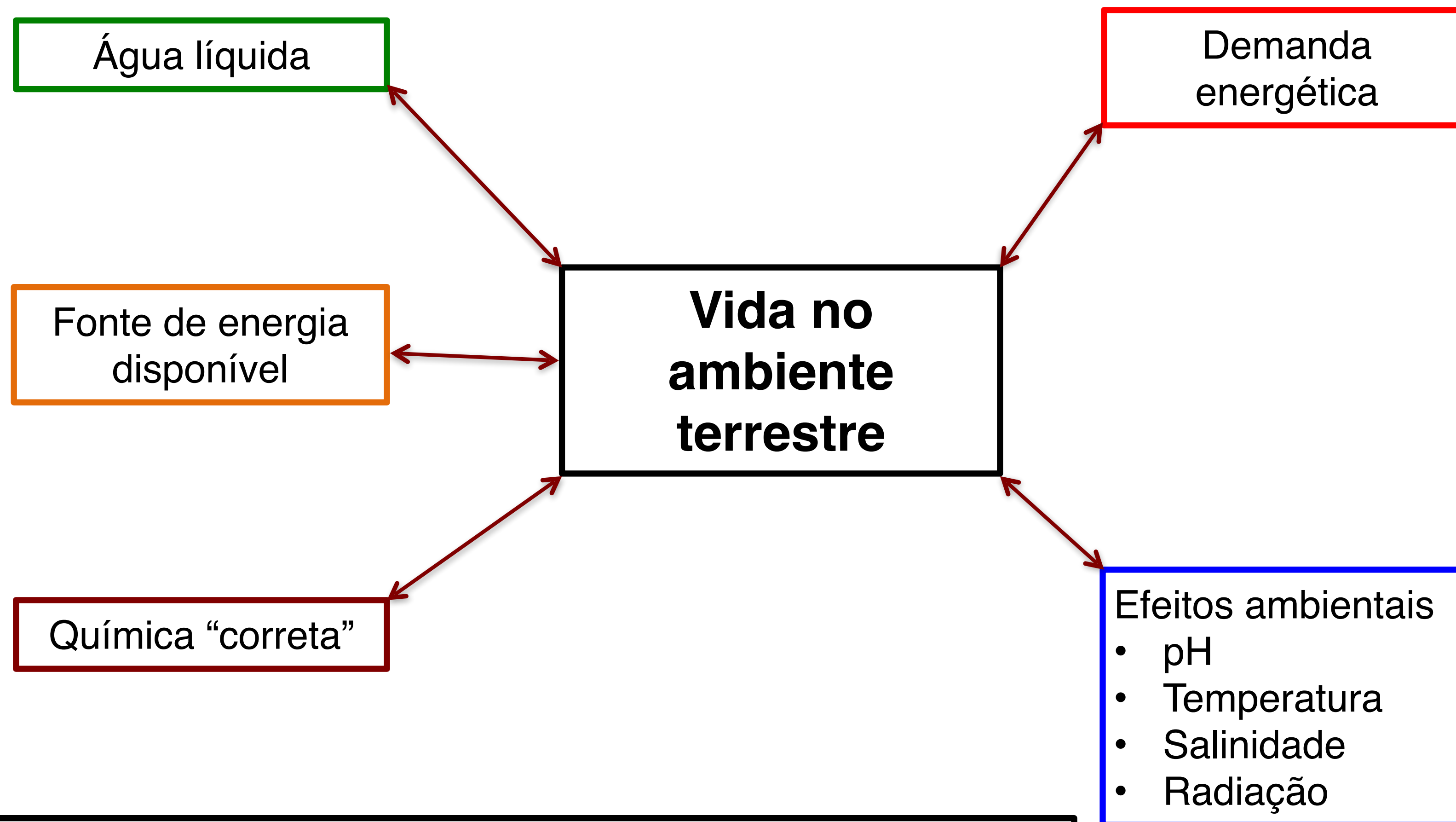
- ☑ Composição química do ambiente
 - ✓ Essencialmente CHONPS, mas com vários outros em proporções variadas (a vida utiliza 77 dos elementos da tabela periódica)
 - ✓ Microorganismos adaptam-se de forma extraordinária, usando elementos químicos diferentes em suas reações metabólicas, conforme a pressão ambiental
- ☑ Solventes: porque H_2O ?
 - ✓ H_2O compõe a maior parte dos organismos vivos (40% plantas, 60% micróbios e 70% mamíferos)
 - ✓ H_2O é uma molécula comum na Terra, composta de 2 dos elementos mais abundantes no Universo
 - ✓ H_2O é uma molécula polar e solvente extremamente eficaz
 - ✓ H_2O é um isolante elétrico e térmico eficaz



Balanco energético e habitabilidade



Balanço energético e habitabilidade



"Follow the water" é mais fácil de quantificar do que **"follow the energy"**



Exceções para as formas de vida?

- ☑ Shadow biosphere? Possíveis formas de vida não detectadas devem ser significativamente diferentes das que conhecemos (de outra forma, já teriam sido detectadas)
- ☑ Outras bioquímicas (Bains 2004)?
- ☑ Outros solventes (Bains 2004)?
- ☑ Outras fontes de energia?
- ☑ Outros códigos genéticos?



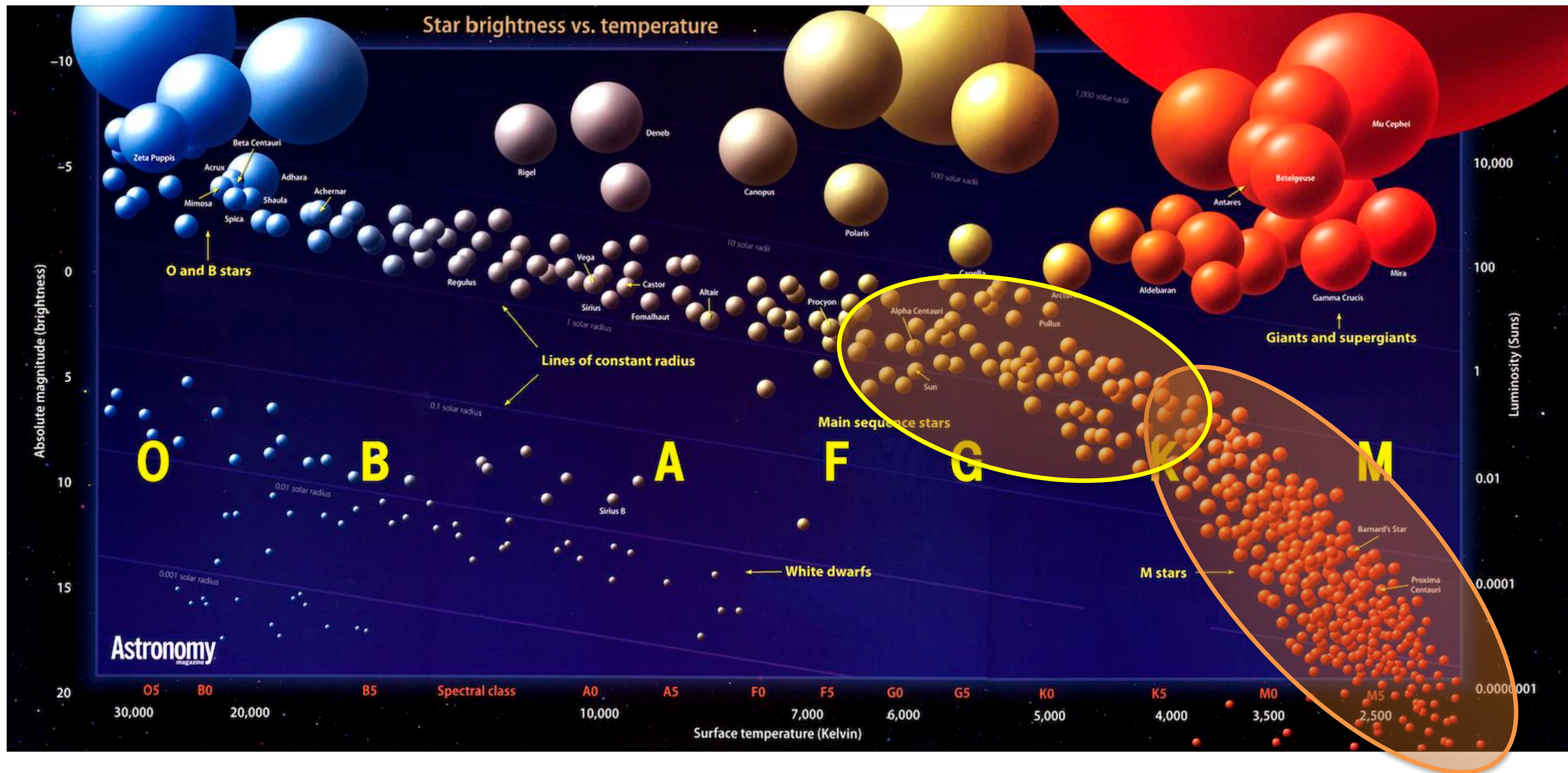
Limites para a vida?

TABLE 4. THE KNOWN LIMITS OF LIFE ON EARTH

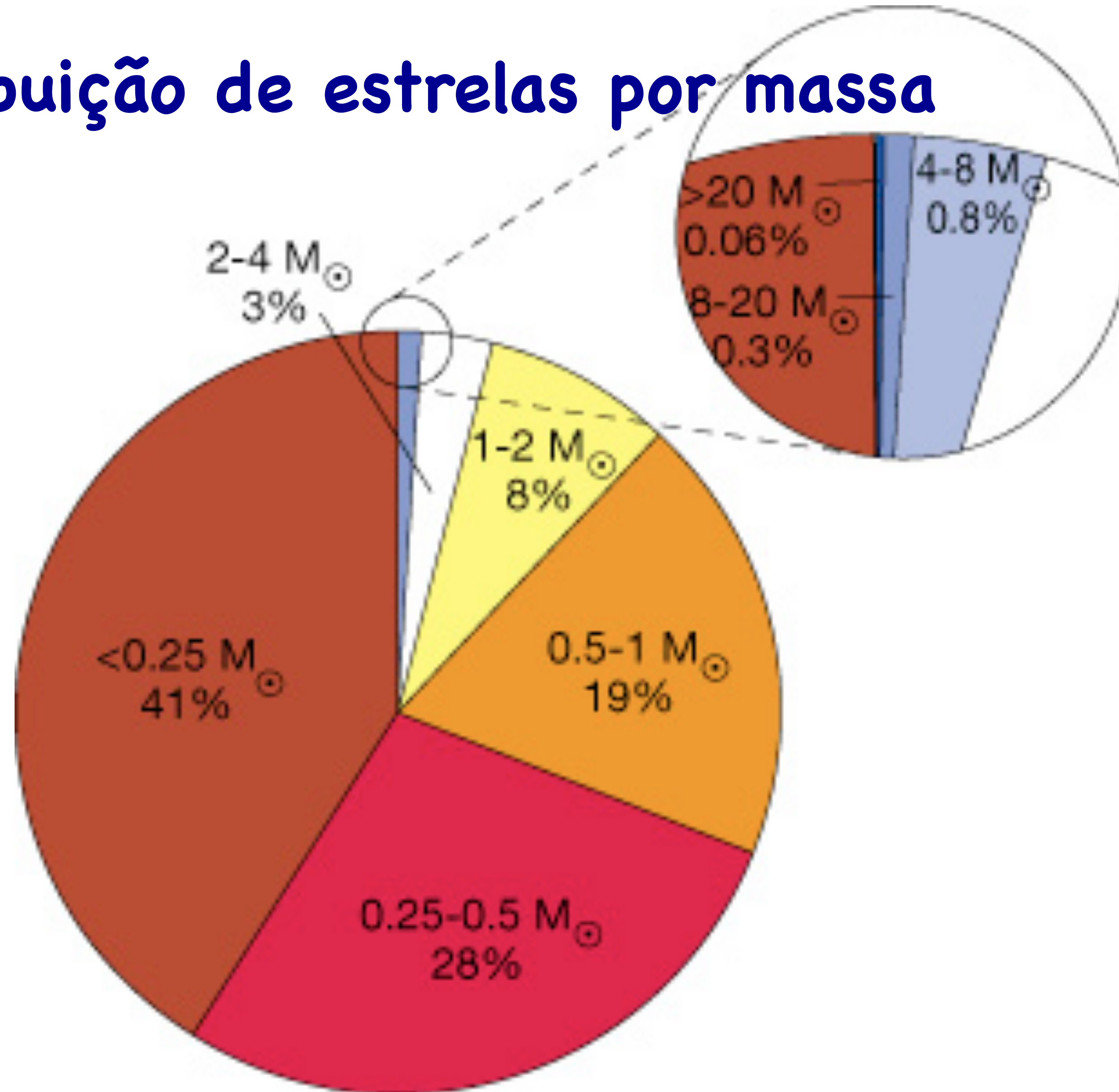
<i>Factor</i>	<i>Extremophile</i>	<i>Earth environments</i>	<i>Limit</i>	<i>References</i>
High temperature	Thermophile or hyperthermophile	Submarine hydrothermal vents, terrestrial hot springs, deep subterranean environments	121–122°C	1–3
Low temperature	Psychrophile	Ice, permafrost, Antarctic dry valleys	–20°C	4–5
High pressure	Barophile or piezophile	Subseafloor, deep subterranean environments such as the Mariana Trench	>1300 atm	6–8
High pH	Alkaliphile	Soda lakes	11.3–11.4	9–11
Low pH	Acidophile	Acid mine drainage, hot springs	–0.06	12–14
High salinity	Halophile	Brines, evaporite deposits	NaCl ~ 5 M	15–17
Desiccation	Xerophile	Antarctic dry valleys, deserts	<10% relative humidity	18–20
Ionizing radiation	Radioresistant	High-radiation environments (from radioactive waste, nuclear reactors, cosmic rays, gamma rays, X-rays)	>6000 Gy	21–23
UV radiation	Radioresistant	High deserts, upper atmosphere	5000 J/m ²	21, 24
Toxic element concentrations	—	Acid mine drainage, hot springs	Depends on element	25–26

“The Astrobiology Primer 2.0”, Domagal-Goldman & Wright, 2016

O Diagrama HR



A distribuição de estrelas por massa





Main sequence stars (V)

Spectral Type	Temperature (K)	Absolute Magnitude	Luminosity (in solar luminosities)	Mass (in solar masses)
O5	54,000	-4.5	200,000	32.7
O6	45,000	-4.0	140,000	29.5
O7	43,300	-3.9	120,000	28.3
O8	40,600	-3.8	80,000	25.2
O9	37,800	-3.6	55,000	22.6
B0	29,200	-3.3	24,000	17.8
B1	23,000	-2.3	5550	11.7
B2	21,000	-1.9	3190	10.0
B3	17,600	-1.1	1060	7.32
B5	15,200	-0.4	380	5.46
B6	14,300	0	240	4.79
B7	13,500	0.3	140	4.10
B8	12,300	0.7	73	3.41
B9	11,400	1.1	42	2.91
A0	9600	1.5	24	2.48
A1	9330	1.7	20	2.35
A2	9040	1.8	17	2.25
A3	8750	2.0	14	2.13
A4	8480	2.1	12	2.03
A5	8310	2.2	11	1.98
A7	7920	2.4	8.8	1.86

F0	7350	3.0	5.1	1.59
F2	7050	3.3	3.8	1.46
F3	6850	3.5	3.2	1.39
F5	6700	3.7	2.7	1.33
F6	6550	4.0	2.0	1.22
F7	6400	4.3	1.5	1.12
F8	6300	4.4	1.4	1.10
G0	6050	4.7	1.2	1.05
G1	5930	4.9	1.1	1.03
G2	5800	5.0	1	1.00
G5	5660	5.2	0.73	0.91
G8	5440	2.6	0.51	0.82
K0	5240	6.0	0.38	0.76
K1	5110	6.2	0.32	0.72
K2	4960	6.4	0.29	0.70
K3	4800	6.7	0.24	0.67
K4	4600	7.1	0.18	0.61
K5	4400	7.4	0.15	0.58
K7	4000	8.1	0.11	0.53
M0	3750	8.7	0.080	0.49
M1	3700	9.4	0.055	0.44
M2	3600	10.1	0.035	0.38
M3	3500	10.7	0.027	0.36
M4	3400	11.2	0.022	0.34



Main sequence stars (V)

Spectral Type	Temperature (K)	Absolute Magnitude	Luminosity (in solar luminosities)	Mass (in solar masses)
O5	54,000	-4.5	200,000	32.7
O6	45,000	-4.0	140,000	29.5
O7	43,300	-3.9	120,000	28.3
O8	40,600	-3.8	80,000	25.2
O9	37,800	-3.6	55,000	22.6
B0	29,200	-3.3	24,000	17.8
B1	23,000	-2.3	5550	11.7
B2	21,000	-1.9	3190	10.0
B3	17,600	-1.1	1060	7.32
B5	15,200	-0.4	380	5.46
B6	14,300	0	240	4.79
B7	13,500	0.3	140	4.10
B8	12,300	0.7	73	3.41
B9	11,400	1.1	42	2.91
A0	9600	1.5	24	2.48
A1	9330	1.7	20	2.35
A2	9040	1.8	17	2.25
A3	8750	2.0	14	2.13
A4	8480	2.1	12	2.03
A5	8310	2.2	11	1.98
A7	7920	2.4	8.8	1.86

F0	7350	3.0	5.1	1.59
F2	7050	3.3	3.8	1.46
F3	6850	3.5	3.2	1.39
F5	6700	3.7	2.7	1.33
F6	6550	4.0	2.0	1.22
F7	6400	4.3	1.5	1.12
F8	6300	4.4	1.4	1.10
G0	6050	4.7	1.2	1.05
G1	5930	4.9	1.1	1.03
G2	5800	5.0	1	1.00
G5	5660	5.2	0.73	0.91
G8	5440	2.6	0.51	0.82
K0	5240	6.0	0.38	0.76
K1	5110	6.2	0.32	0.72
K2	4960	6.4	0.29	0.70
K3	4800	6.7	0.24	0.67
K4	4600	7.1	0.18	0.61
K5	4400	7.4	0.15	0.58
K7	4000	8.1	0.11	0.53
M0	3750	8.7	0.080	0.49
M1	3700	9.4	0.055	0.44
M2	3600	10.1	0.035	0.38
M3	3500	10.7	0.027	0.36
M4	3400	11.2	0.022	0.34



Main sequence stars (V)

Spectral Type	Temperature (K)	Absolute Magnitude	Luminosity (in solar luminosities)	Mass (in solar masses)
O5	54,000	-4.5	200,000	32.7
O6	45,000	-4.0	140,000	29.5
O7	43,300	-3.9	120,000	28.3
O8	40,600	-3.8	80,000	25.2
O9	37,800	-3.6	55,000	22.6
B0	29,200	-3.3	24,000	17.8
B1	23,000	-2.3	5550	11.7
B2	21,000	-1.9	3190	10.0
B3	17,600	-1.1	1060	7.32
B5	15,200	-0.4	380	5.46
B6	14,300	0	240	4.79
B7	13,500	0.3	140	4.10
B8	12,300	0.7	73	3.41
B9	11,400	1.1	42	2.91
A0	9600	1.5	24	2.48
A1	9330	1.7	20	2.35
A2	9040	1.8	17	2.25
A3	8750	2.0	14	2.13
A4	8480	2.1	12	2.03
A5	8310	2.2	11	1.98
A7	7920	2.4	8.8	1.86

F0	7350	3.0	5.1	1.59
F2	7050	3.3	3.8	1.46
F3	6850	3.5	3.2	1.39
F5	6700	3.7	2.7	1.33
F6	6550	4.0	2.0	1.22
F7	6400	4.3	1.5	1.12
F8	6300	4.4	1.4	1.10
G0	6050	4.7	1.2	1.05
G1	5930	4.9	1.1	1.03
G2	5800	5.0	1	1.00
G5	5660	5.2	0.73	0.91
G8	5440	2.6	0.51	0.82

M5	3200	12.3	0.011	0.28
M6	3100	13.4	0.0051	0.22
M7	2900	13.9	0.0032	0.19
M8	2700	14.4	0.0020	0.17
L0	2600	*	0.00029	0.098
L3	2200	*	0.00013	0.078
L8	1500	*	0.000032	0.052
T2	1400	*	0.000025	0.048
T6	1000	*	0.0000056	0.032
T8	800	*	0.0000036	0.028



Giants (III)

Spectral Type	Temperature (K)	Absolute Magnitude	Luminosity (in solar luminosities)
G5	5010	0.7	127
G8	4870	0.6	113
K0	4720	0.5	96
K1	4580	0.4	82
K2	4460	0.2	70
K3	4210	0.1	58
K4	4010	0.0	45
K5	3780	-0.2	32
M0	3660	-0.4	15
M1	3600	-0.5	13
M2	3500	-0.6	11
M3	3300	-0.7	9.5
M4	3100	-0.75	7.4
M5	2950	-0.8	5.1
M6	2800	-0.9	3.3



Supergiants (I)

Spectral Type	Temperature (K)	Absolute Magnitude	Luminosity (in solar luminosities)
B0	21,000	-6.4	320,000
B1	16,000	-6.4	280,000
B2	14,000	-6.4	220,000
B3	12,800	-6.3	180,000
B5	11,500	-6.3	140,000
B6	11,000	-6.3	98,000
B7	10,500	-6.3	82,000
B8	10,000	-6.2	73,000
B9	9700	-6.2	61,000
A0	9400	-6.2	50,600
A1	9100	-6.2	44,000
A2	8900	-6.2	40,000
A5	8300	-6.1	36,000

F0	7500	-6	20,000
F2	7200	-6	18,000
F5	6800	-5.9	16,000
F8	6150	-5.9	12,000
G0	5800	-5.9	9600
G2	5500	-5.8	9500
G5	5100	-5.8	9800
G8	5050	-5.7	11,000
K0	4900	-5.7	12,000
K1	4700	-5.6	13,500
K2	4500	-5.6	15,200
K3	4300	-5.6	17,000
K4	4100	-5.5	18,300
K5	3750	-5.5	20,000
M0	3660	-5.3	50,600
M1	3600	-5.3	52,000
M2	3500	-5.3	53,000
M3	3300	-5.3	54,000
M4	3100	-5.2	56,000
M5	2950	-5.2	58,000



As funções de massa inicial

- ☑ Função probabilística que define a massa inicial de uma estrela (quando ela entra na seq. principal)
- ☑ Propriedades evolutivas (L , tempo de vida, tipo de estágio final) são fortemente dependentes de M

Inicialmente proposta por Salpeter (1955) e ligeiramente alterada por outros autores

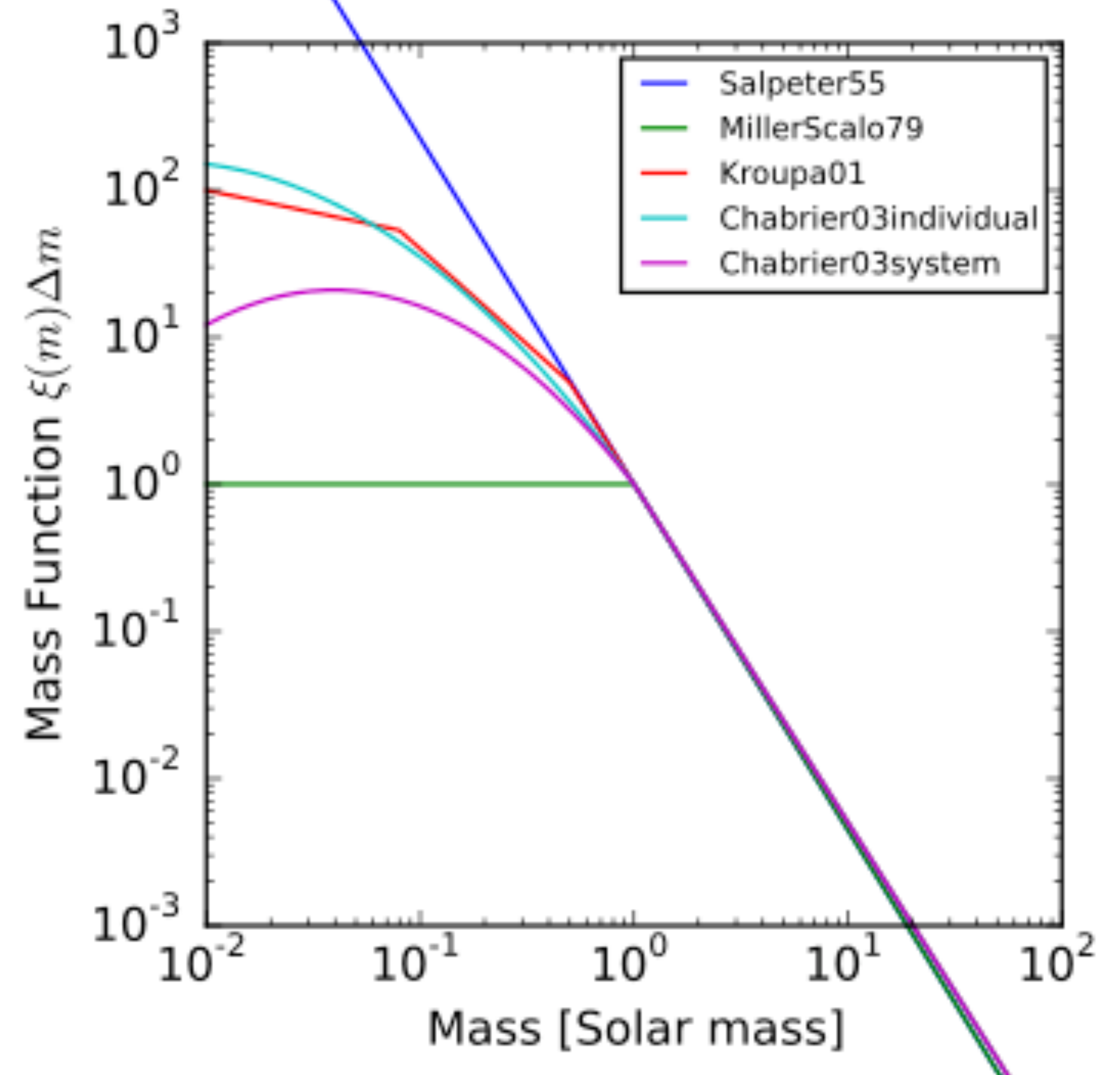
$$L \sim M^{3,1}, M \approx 10 M_{Sun}$$

$$L \sim M^{4,7}, M \approx 1 M_{Sun}$$

$$L \sim M^{2,7}, M \approx 0,1 M_{Sun}$$

As funções de massa inicial

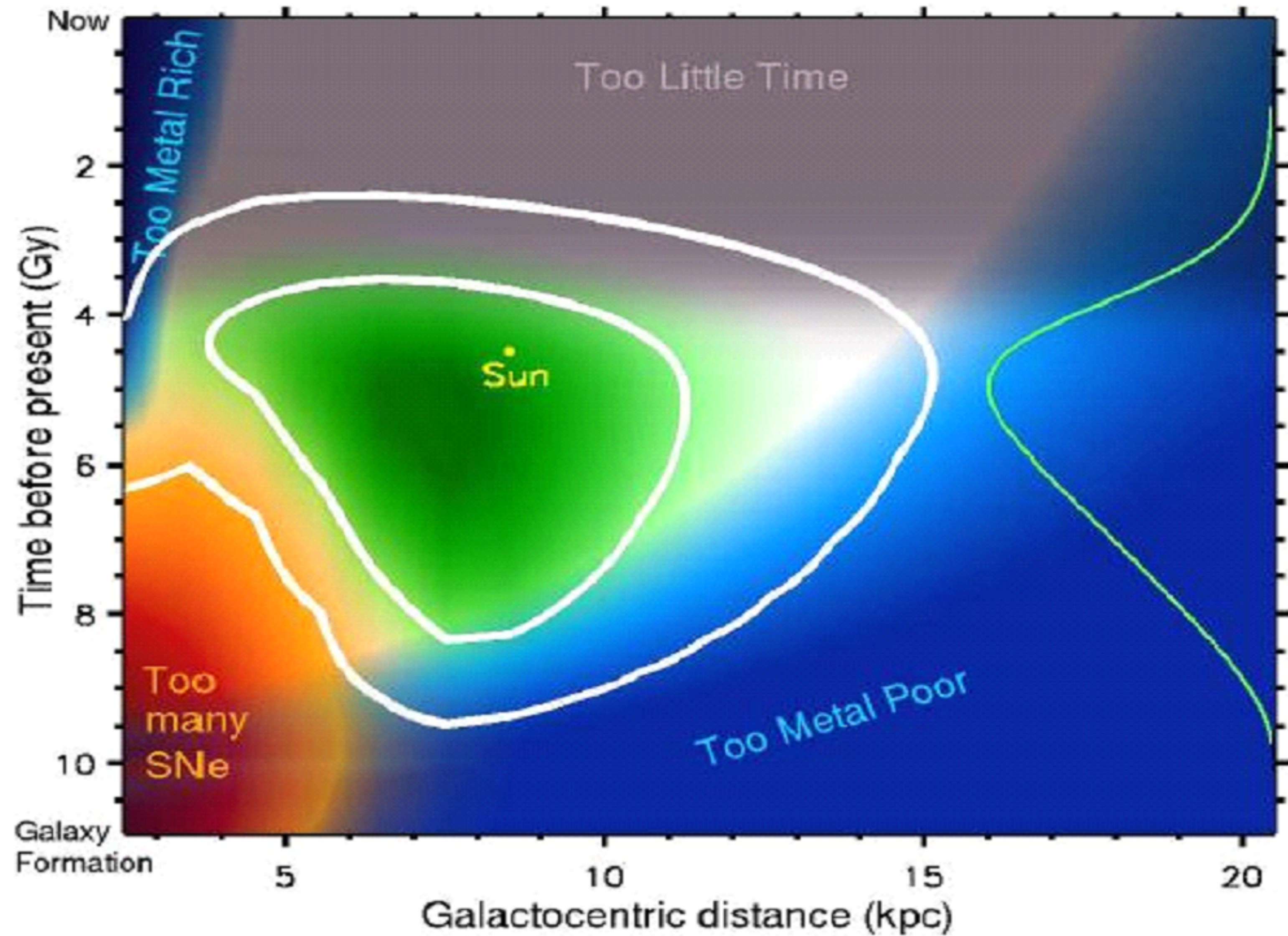
$$\xi(M) = \begin{cases} c_1 M_{Sun}^{-1,3} & 0,08 \leq M_{Sun} < 0,5 \\ c_2 M_{Sun}^{-2,2} & 0,5 \leq M_{Sun} < 1,0 \\ c_2 M_{Sun}^{-2,7} & 1,0 \leq M_{Sun} < \infty \end{cases}$$



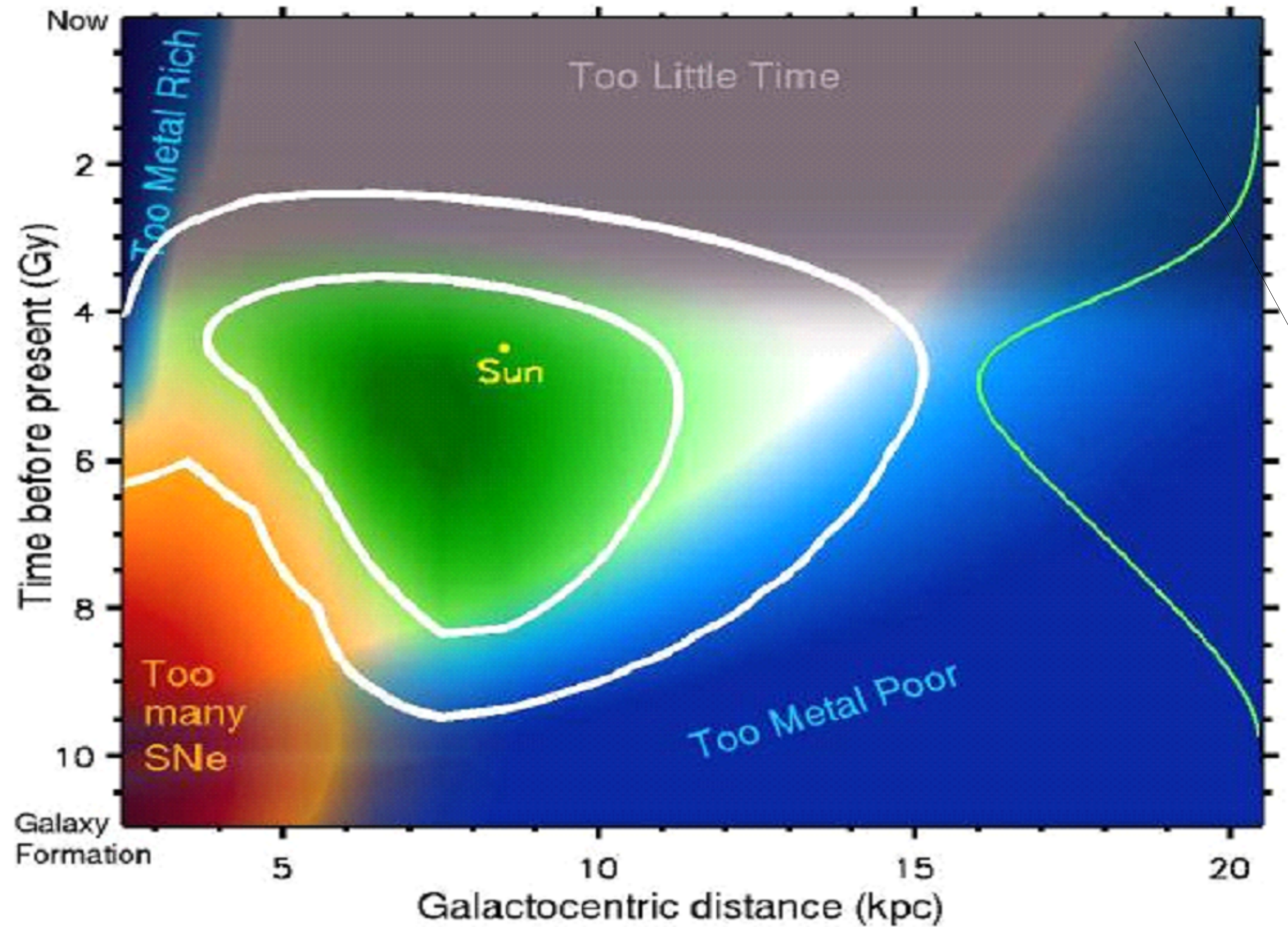


Zona Habitável Galáctica

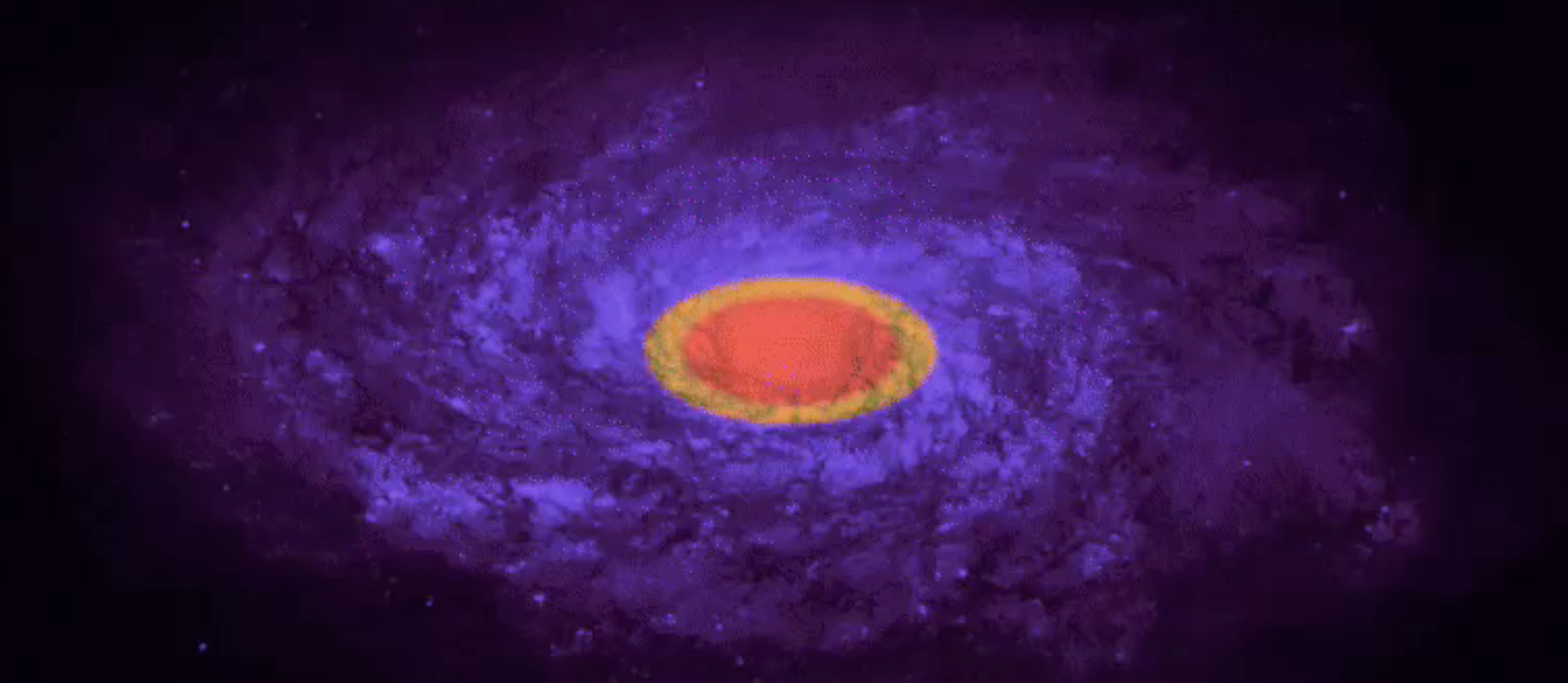
- ☑ RELEMBRANDO A AULA SOBRE COSMOLOGIA E ASTROFÍSICA...
- ☑ Extensão do conceito estelar, inclui
 - ✓ Estrelas na SP
 - ✓ Ausência de radiação ionizante intensa na vizinhança
 - ✓ disponibilidade de elementos necessários para a formação de planetas e da bioquímica da vida)
 - ✓ Locus estelar limitado por efeitos de migração radial
- ☑ Pode, nesse status, ser aplicado a outras galáxias

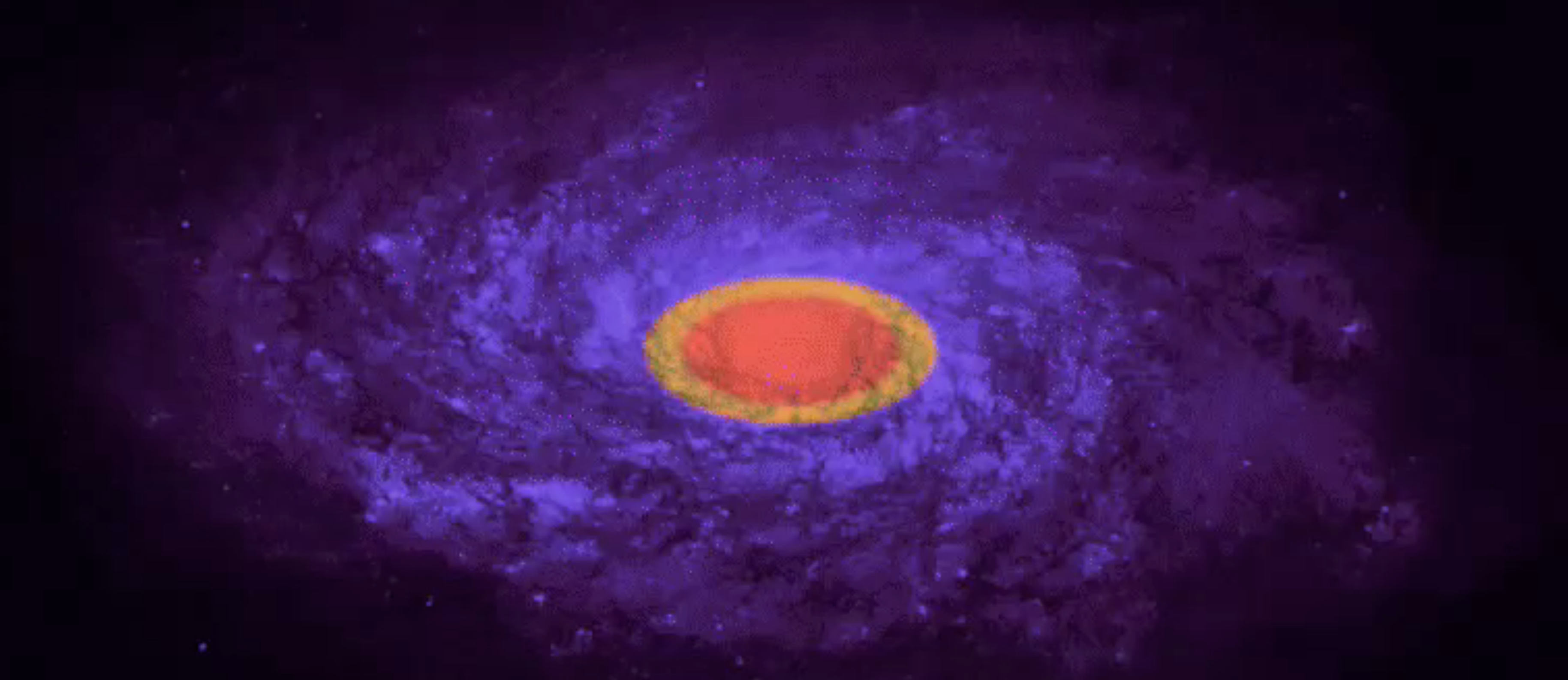


$$P_{ZH} = \int_0^{R_{Gal}} \int_0^{H_{oje}} P(r, t) dr dt$$



$$P_{ZH} = \int_0^{R_{Gal}} \int_0^{H_{oje}} P(r, t) dr dt$$





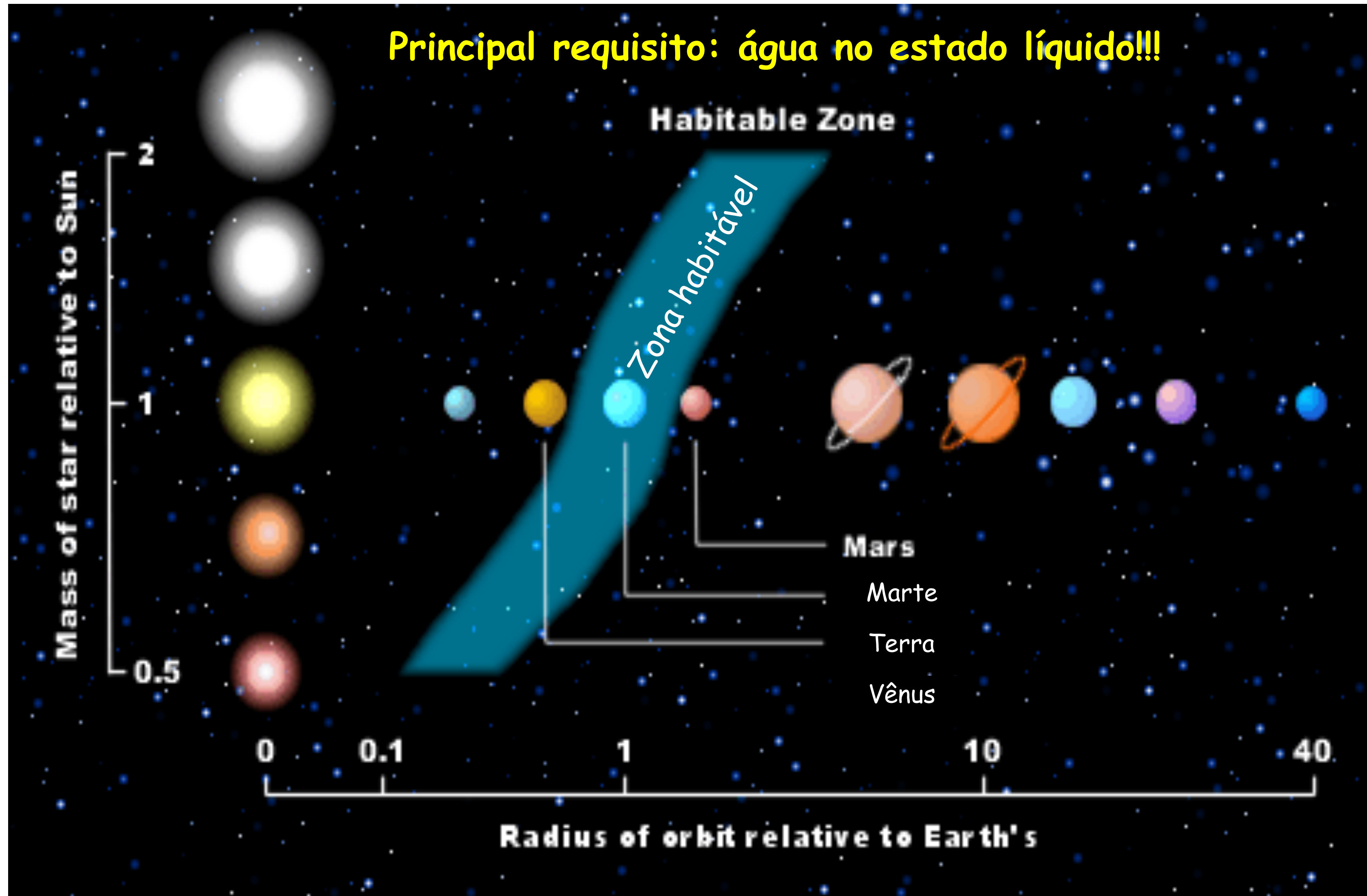


Formação de Galáxias → Habitabilidade

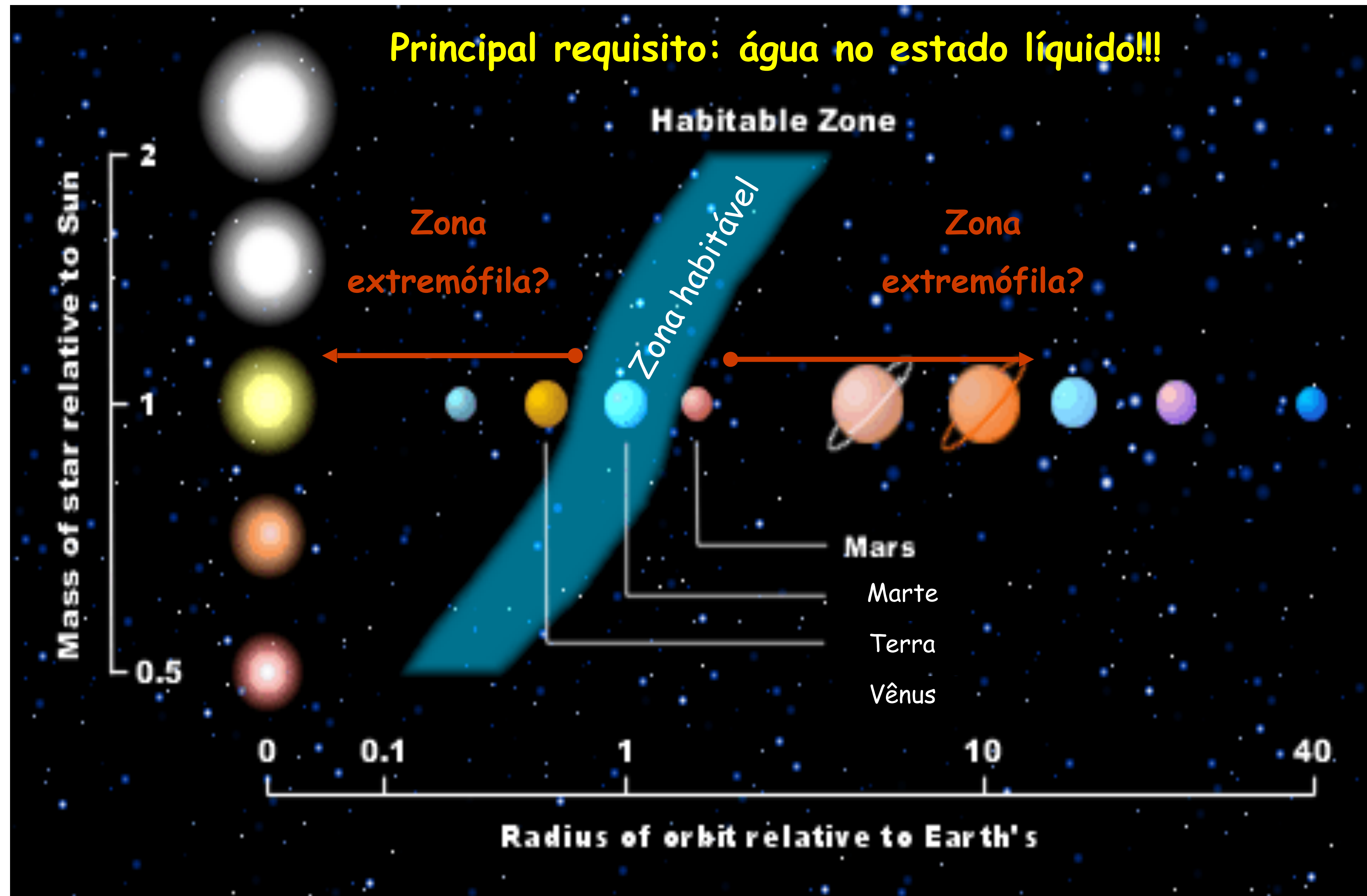
- ☑ Galáxias são “células” naturais, dos quais o Universo é composto
- ☑ Estrelas são criadas em galáxias e são responsáveis pela evolução química galáctica
- ☑ O ambiente galáctico fornece os níveis necessários de abundâncias químicas e radiação necessários para o aparecimento da vida

Zona habitável estelar?

Principal requisito: água no estado líquido!!!



Zona habitável estelar?





Zonas Habitáveis estelares





Zonas Habitáveis estelares





Zonas Habitáveis estelares





Zona Habitável estelar (em geral)

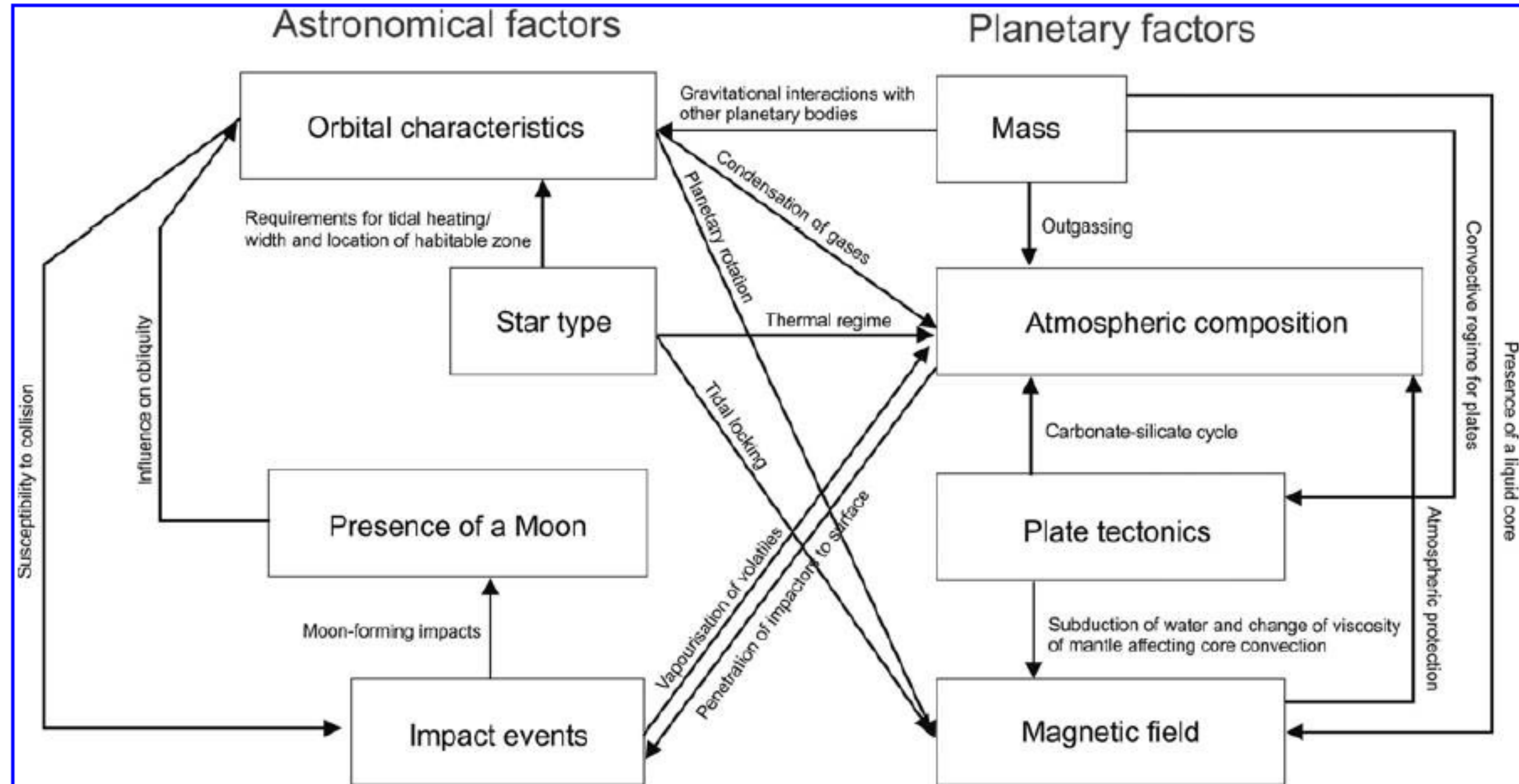
- ☑ Requisito básico: H_2O no estado líquido na superfície (pode ser relaxado)
- ☑ Como definir?
 - ✓ Distância estrela – planeta
 - ✓ Fase evolutiva da estrela
- ☑ Limitações do conceito
 - ✓ Todos os outros corpos do SS potencialmente considerados habitáveis estão fora da ZH estelar para o Sol



Principais aspectos para Habitabilidade Estelar e Planetária

- ☑ Necessidade de água líquida na superfície
 - ✓ Vida superficial → sensoriamento remoto
- ☑ Mudanças no ecossistema terrestre numa escala de tempo de $3,8 \times 10^9$ anos não foram letais
- ☑ “Feedback” de gases auxiliaram a regulação do clima em longas escalas de tempo.
- ☑ Aumento do Oxigênio → complexidade

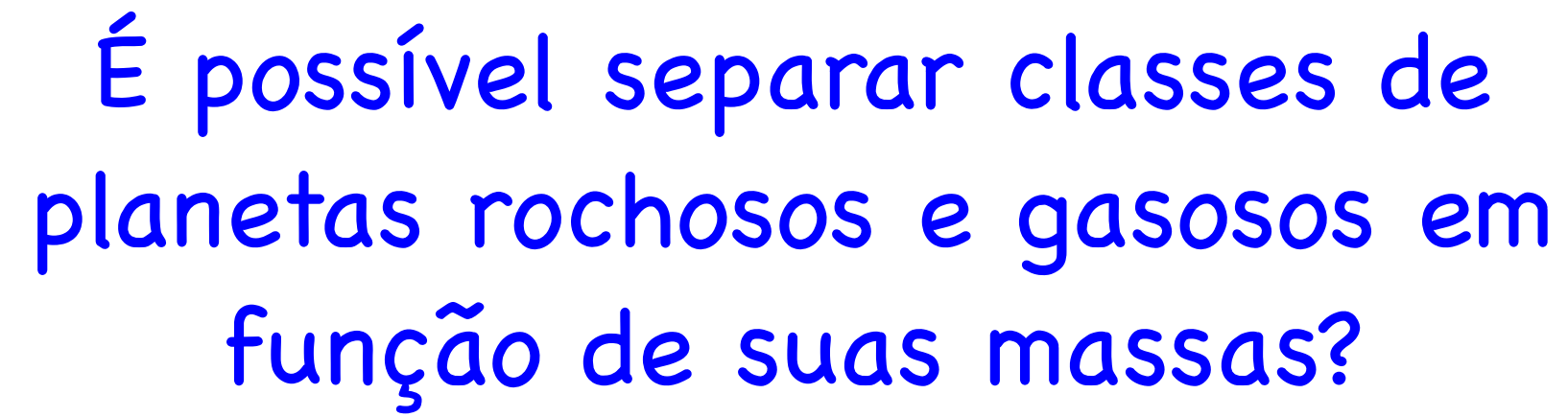
Fatores astronômicos e planetários para a existência de H₂O líquida na superfície





Identificação de planetas rochosos

- ☑ Métodos de detecção mais eficientes:
 - ✓ Trânsito => mede o raio, como fração do raio da estrela hospedeira
 - ✓ Velocidade radial => mede a massa mínima
 - ✓ Com M e $R_{\min}$ conhecido, calcula-se a densidade e estima-se a composição química
- ☑ $M < 10 M_{\text{Terra}}$ ou $R < 2 R_{\text{Terra}}$ são o limite para classificar um planeta como rochoso
- ☑ 105 planetas “pequenos” tem M , R determinados (2022)





Onde procurar planetas rochosos

- ☑ Observações remotas => identificação da composição atmosférica => biotraçadores
- ☑ Biosferas na superfície alteram a composição atmosférica => água superficial é mandatória.
- ☑ Busca baseia-se na hipótese de que a vida em outros planetas deve compartilhar diversos aspectos da química terrestre
- ☑ Descarta solventes diferentes da água, porque se desconhece o efeito de outras "bioquímicas" na superfície de um planeta



Principais aspectos

- ☑ Necessidade de água líquida na superfície
 - ✓ Vida superficial → sensoriamento remoto
- ☑ Variações do ecossistema terrestre em $\sim 3,8 \cdot 10^9$ anos não foram letais
- ☑ “Feedback” de gases auxiliaram a regulação do clima em longas escalas de tempo.
- ☑ Aumento do Oxigênio → complexidade

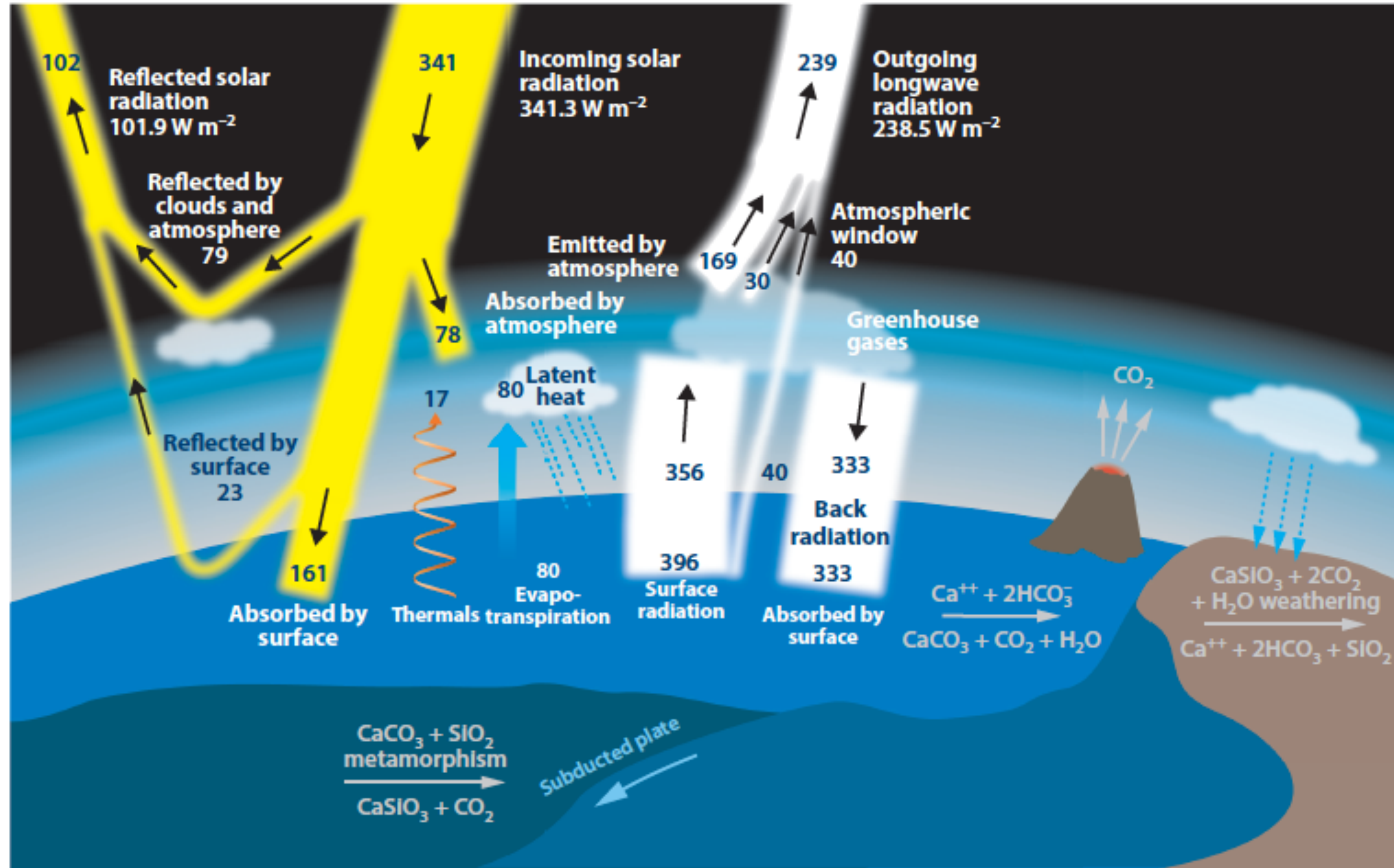
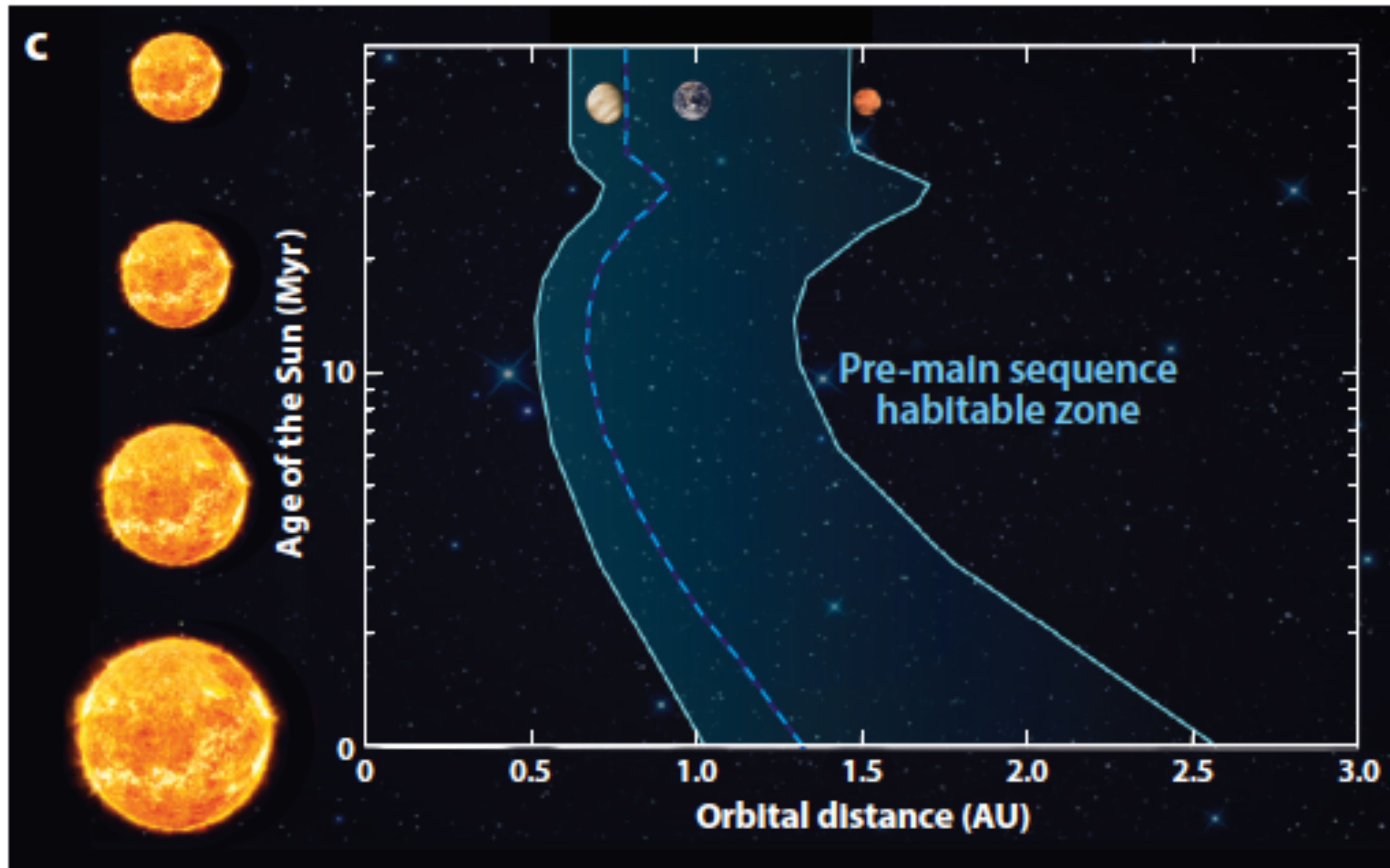


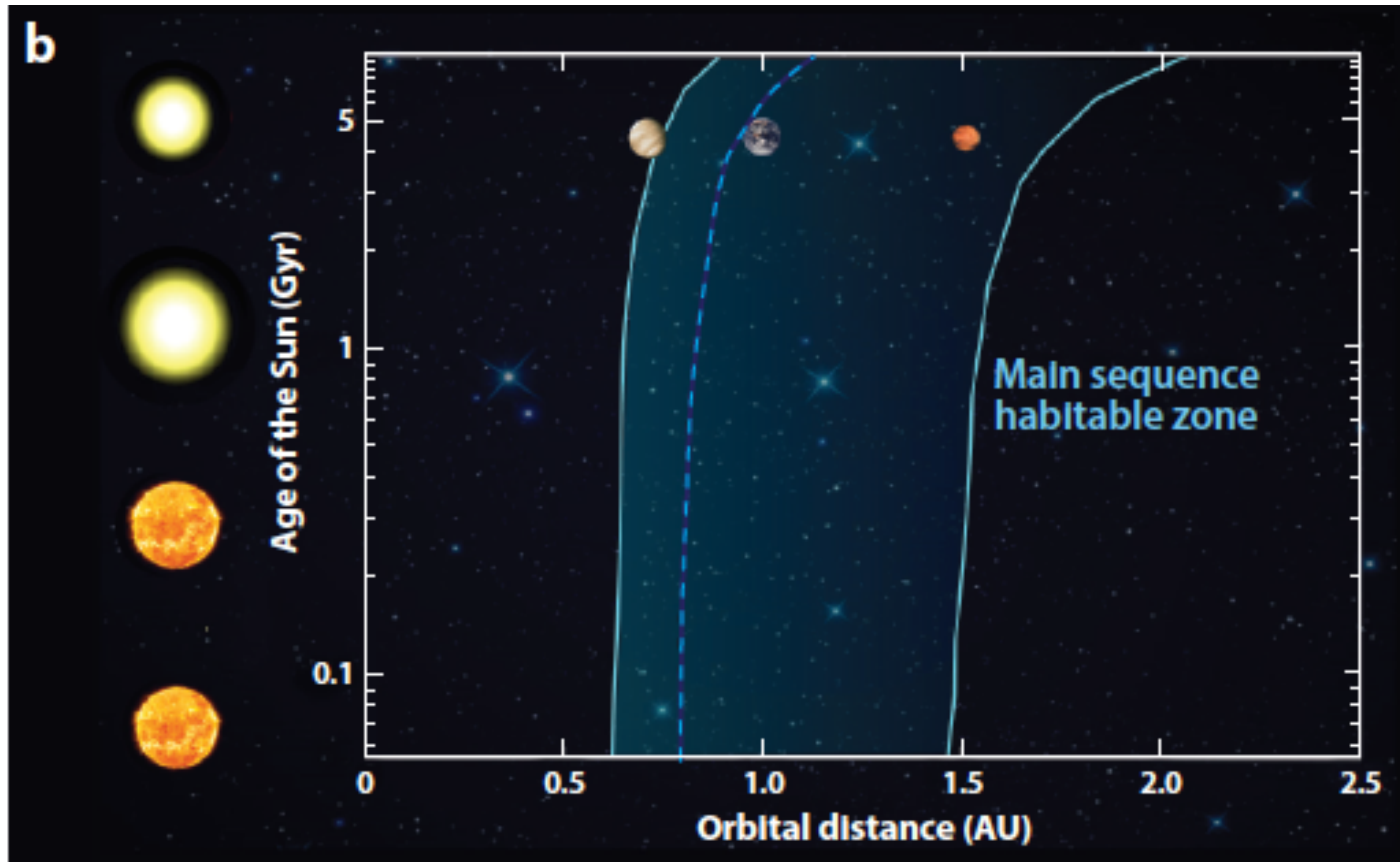
Figure 2

Estimate of Earth's annual and global mean energy balance, and sketch of the modern carbonate-silicate cycle. Data from Trenbeth et al. (2009) and Kasting & Catling (2003).

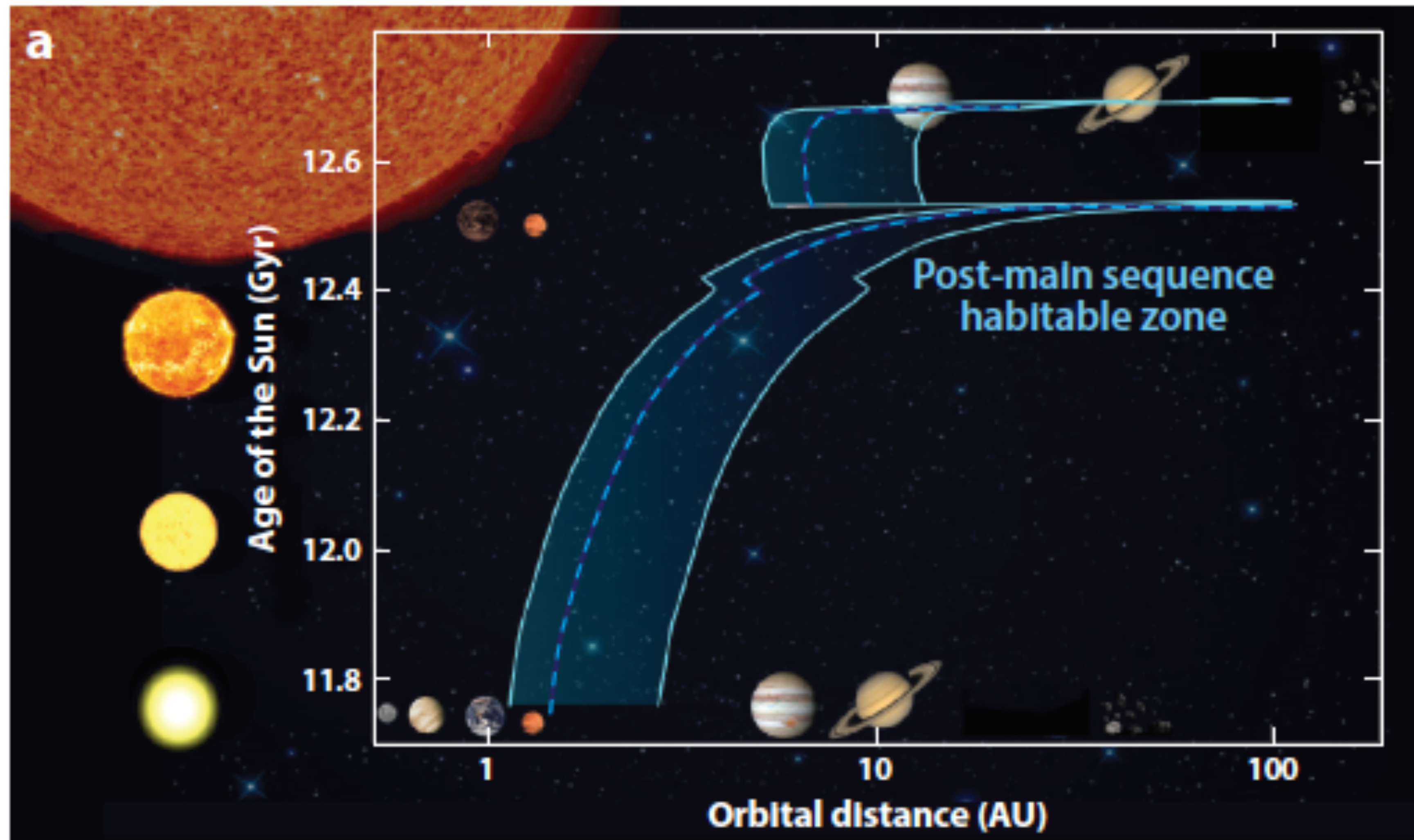
ZH pré SP



ZH na SP



ZH pós SP





Os limites da ZH

- ☑ Gases estufa podem alterar a borda ou mover a ZH no sistema estelar
- ☑ H₂ e outros ciclos gasosos dominam a termodinâmica e os ciclos gasosos de estabilidade climática de longo prazo, alterando as condições para permanência de água líquida na superfície e movimentando a ZH

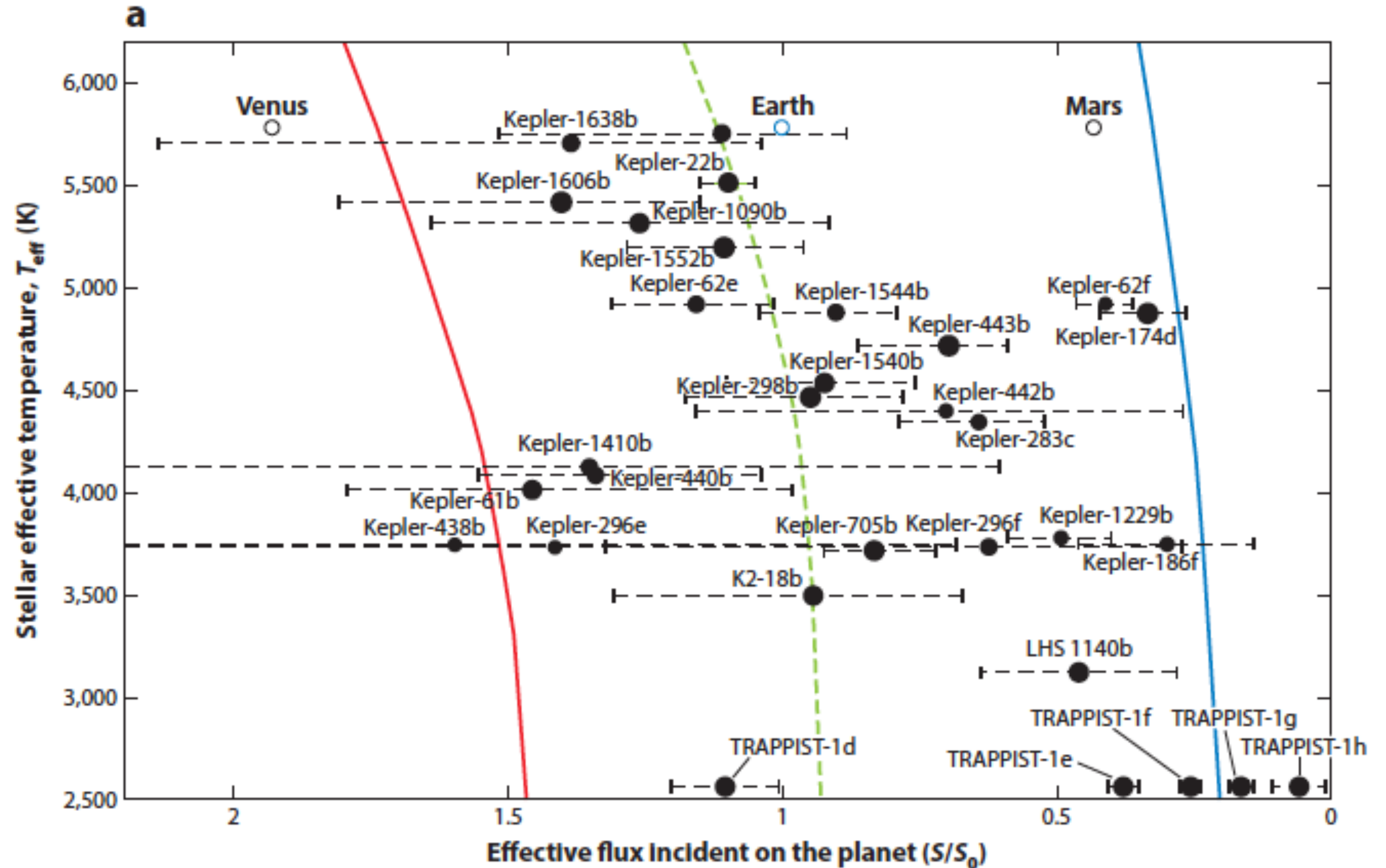
Constant	Recent Venus limit: inner edge	Three-dimensional model limit: inner edge	Early Mars limit: outer edge
$S_{\odot}$	1.7665	1.1066	0.324
A	1.3351×10^{-4}	1.2181×10^{-4}	5.3221×10^{-5}
B	3.1515×10^{-9}	1.534×10^{-8}	1.4288×10^{-9}
C	-3.3488×10^{-12}	-1.5018×10^{-12}	-1.1049×10^{-12}

COLOCAR EQUAÇÃO

Planetas detectados na ZH

Detecção por trânsito
(massas de 0 a 1; 1 a 1,5; 1,5 a 2 M_T)

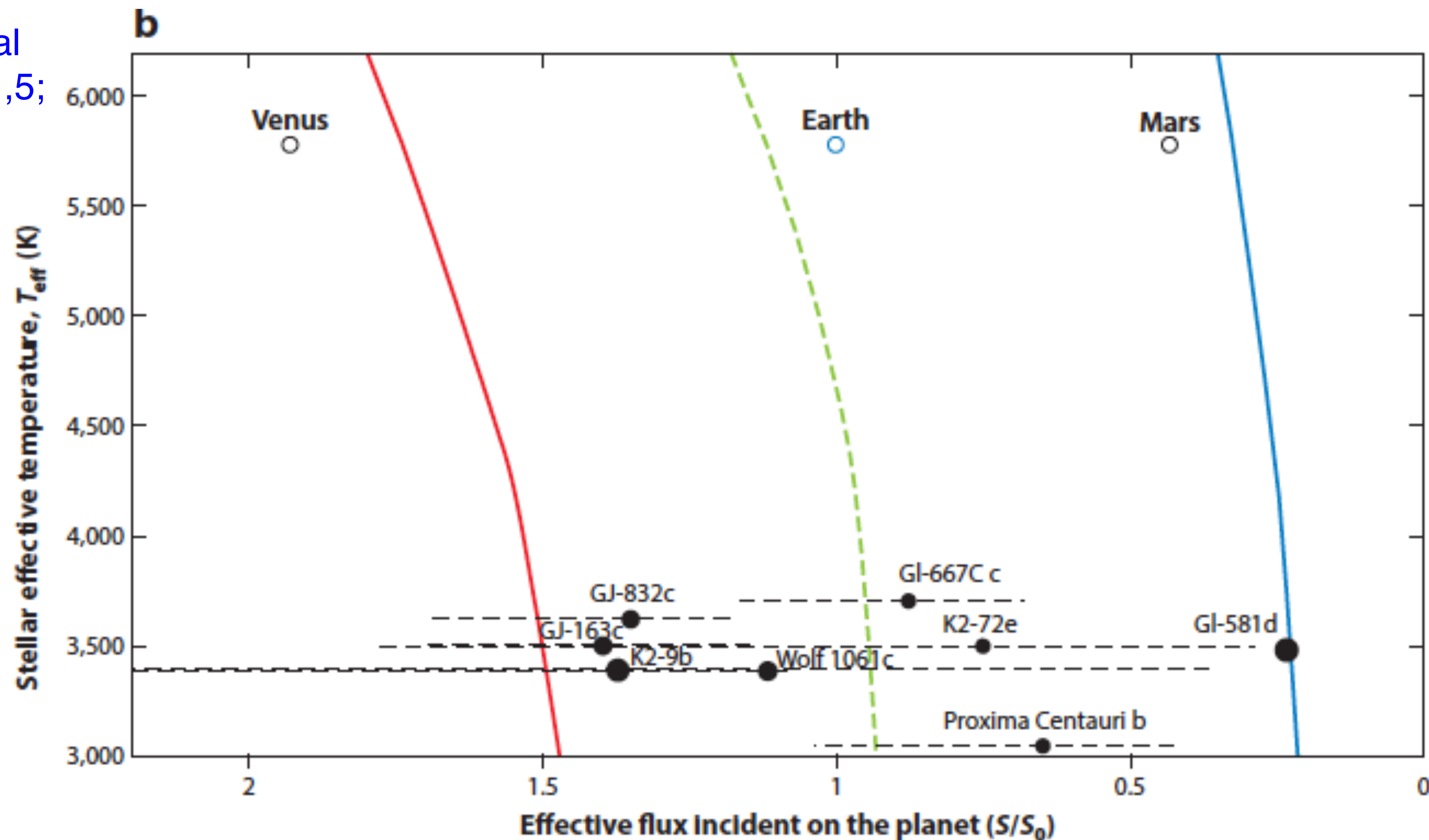
**DISCUTIR E
EXPLICAR AS
POSIÇÕES**



Planetas detectados na ZH

Detecção por vel. Radial
(massas de 0 a 1; 1 a 1,5;
1,5 a 2 M_T)

DISCUTIR E
EXPLICAR AS
POSIÇÕES



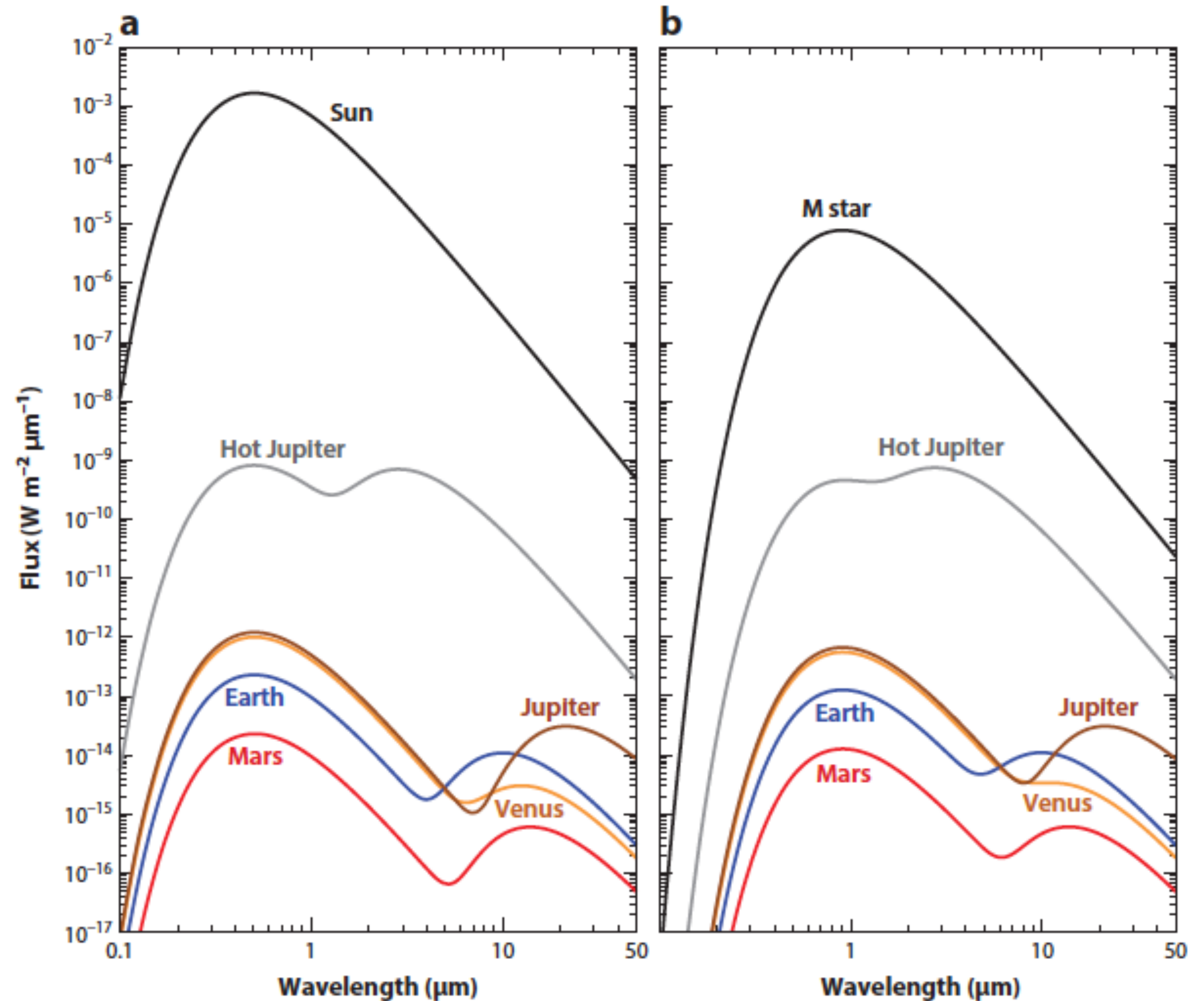


Caracterização de um sistema habitável

- ☑ Passo 1: Planetologia comparada + diagrama cor-cor de exoplanetas “candidatos”
- ☑ Passo 2: variações no fluxo observado nas curvas de luz durante uma órbita podem ajudar a distinguir planetas com e sem atmosfera

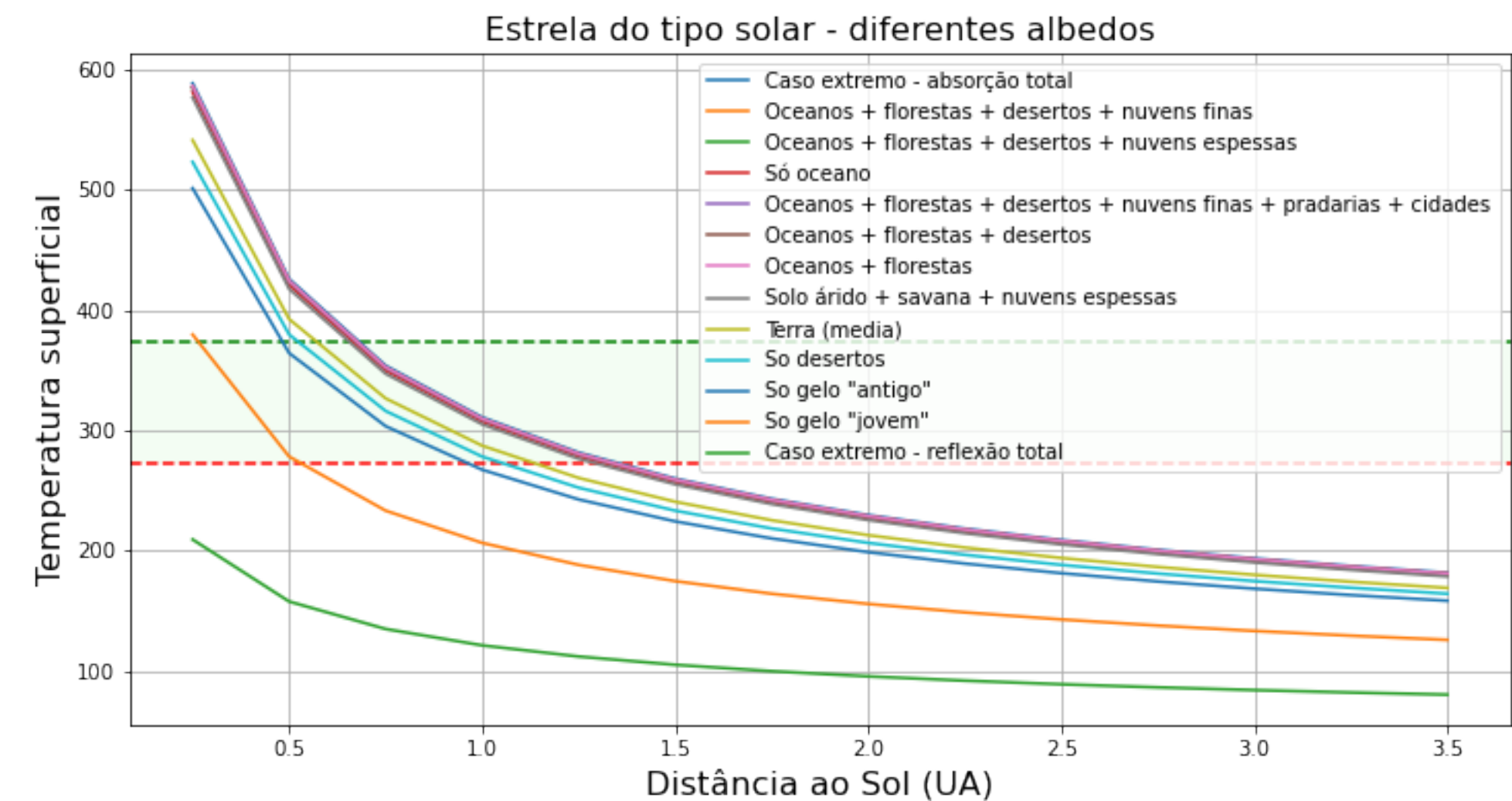
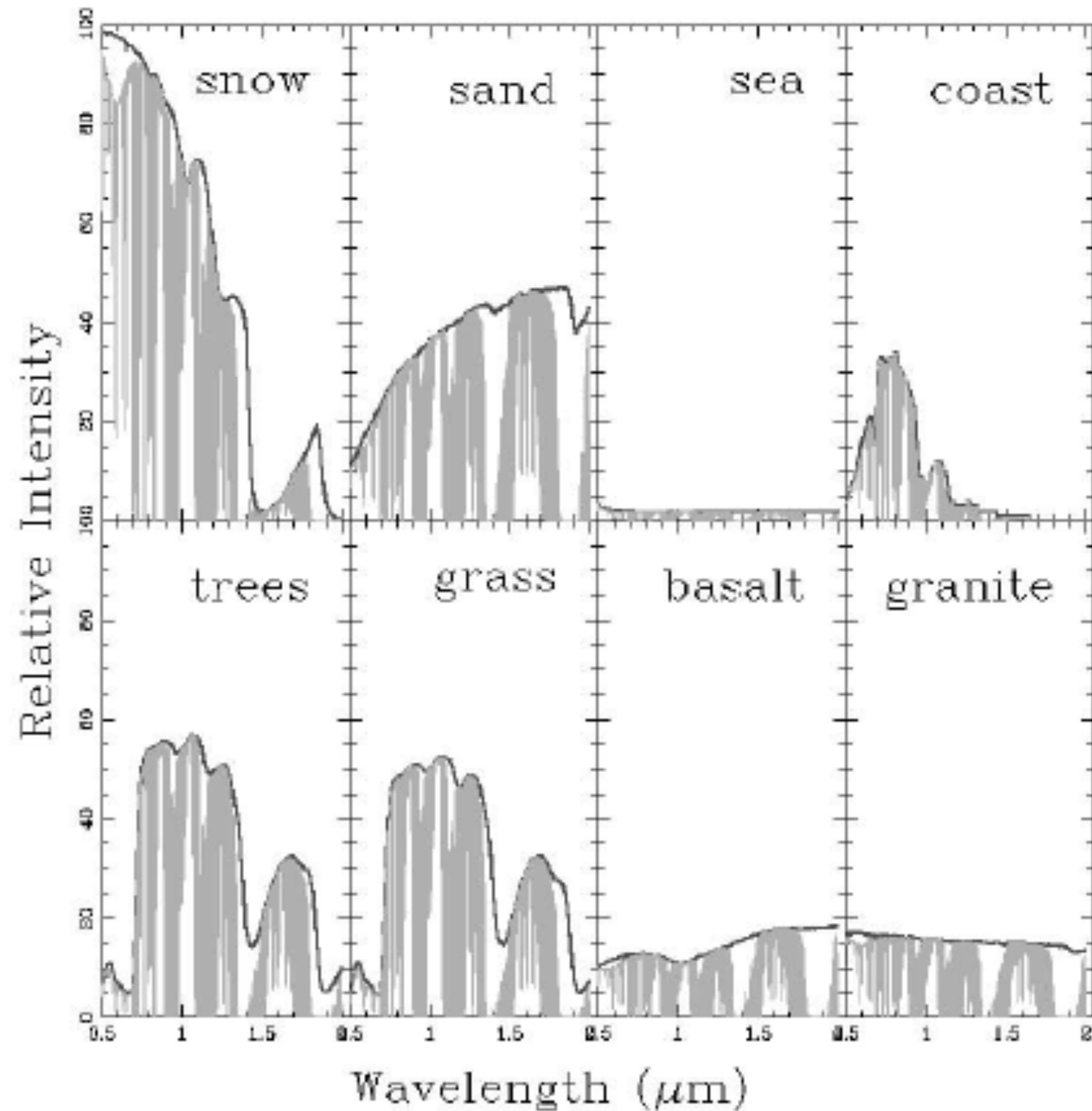
Caracterização de um sistema habitável

Considerando planetas emitindo como um corpo negro, espectros de planetas extrasolares podem ajudar a estimar seu raio, em função de T_{eff}



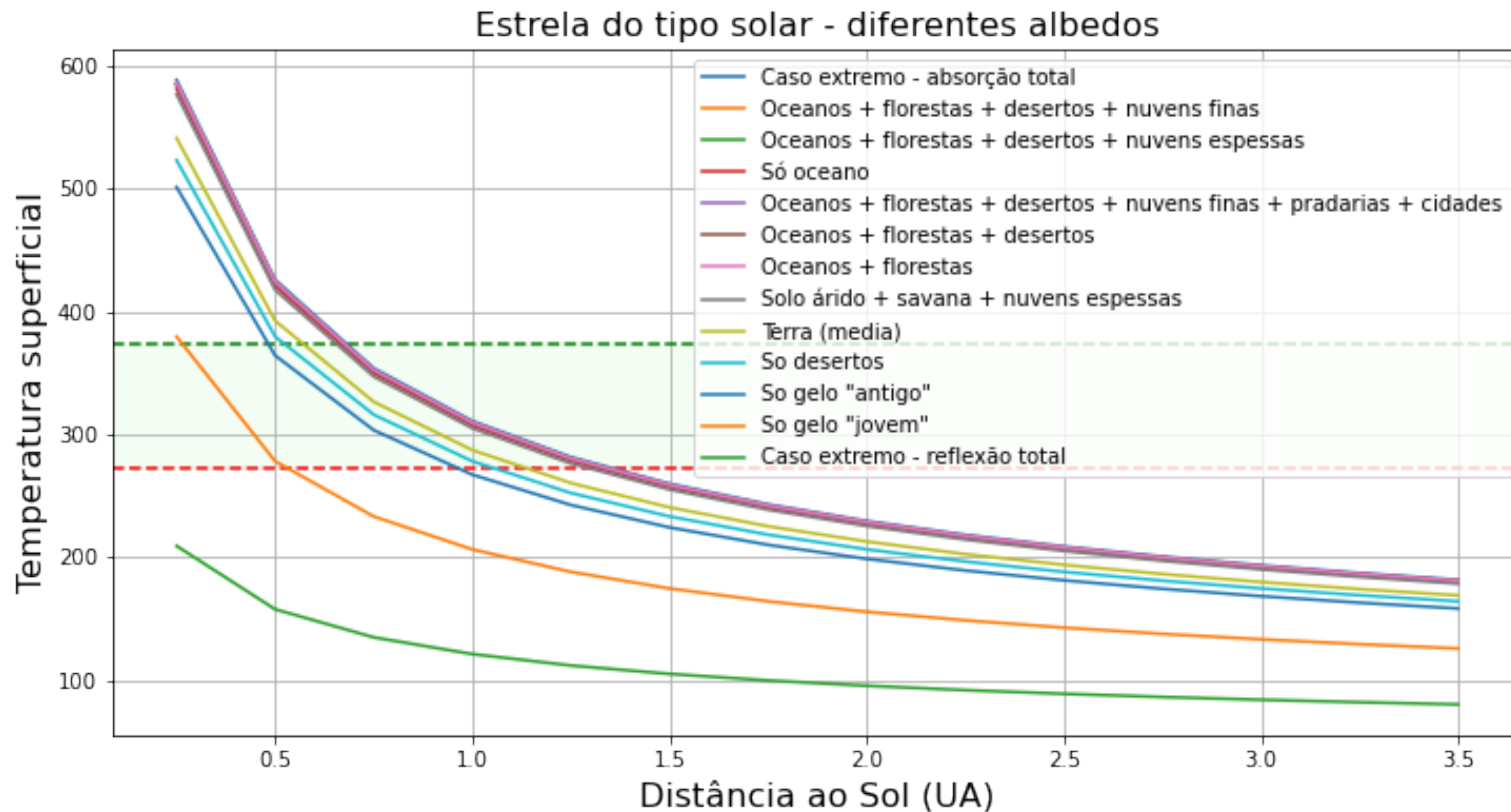
O efeito da presença de nuvens no espectro

Albedos diferentes alteram a detecção



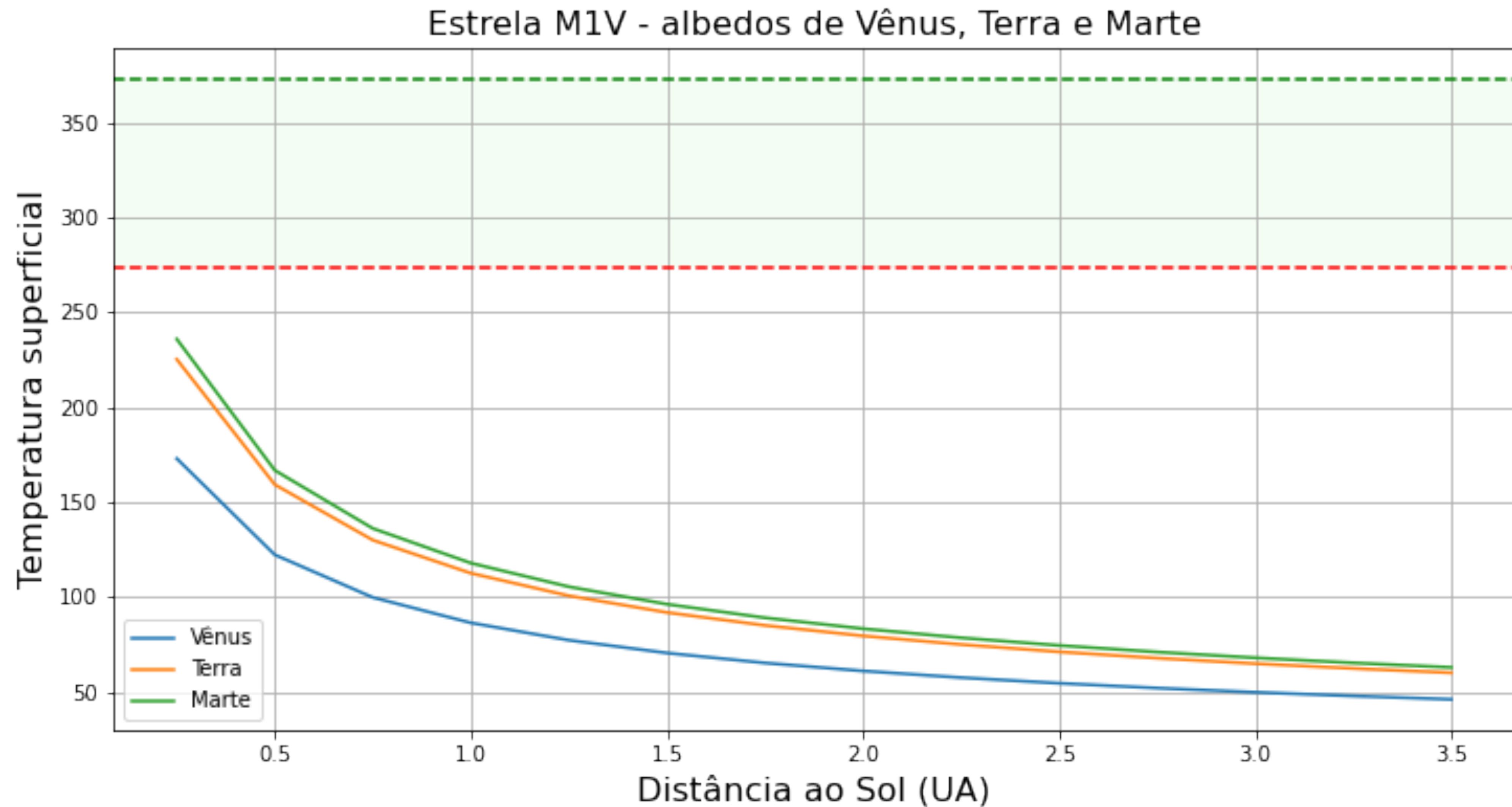
O efeito do albedo na temperatura superficial

Albedos diferentes alteram a temperatura superficial

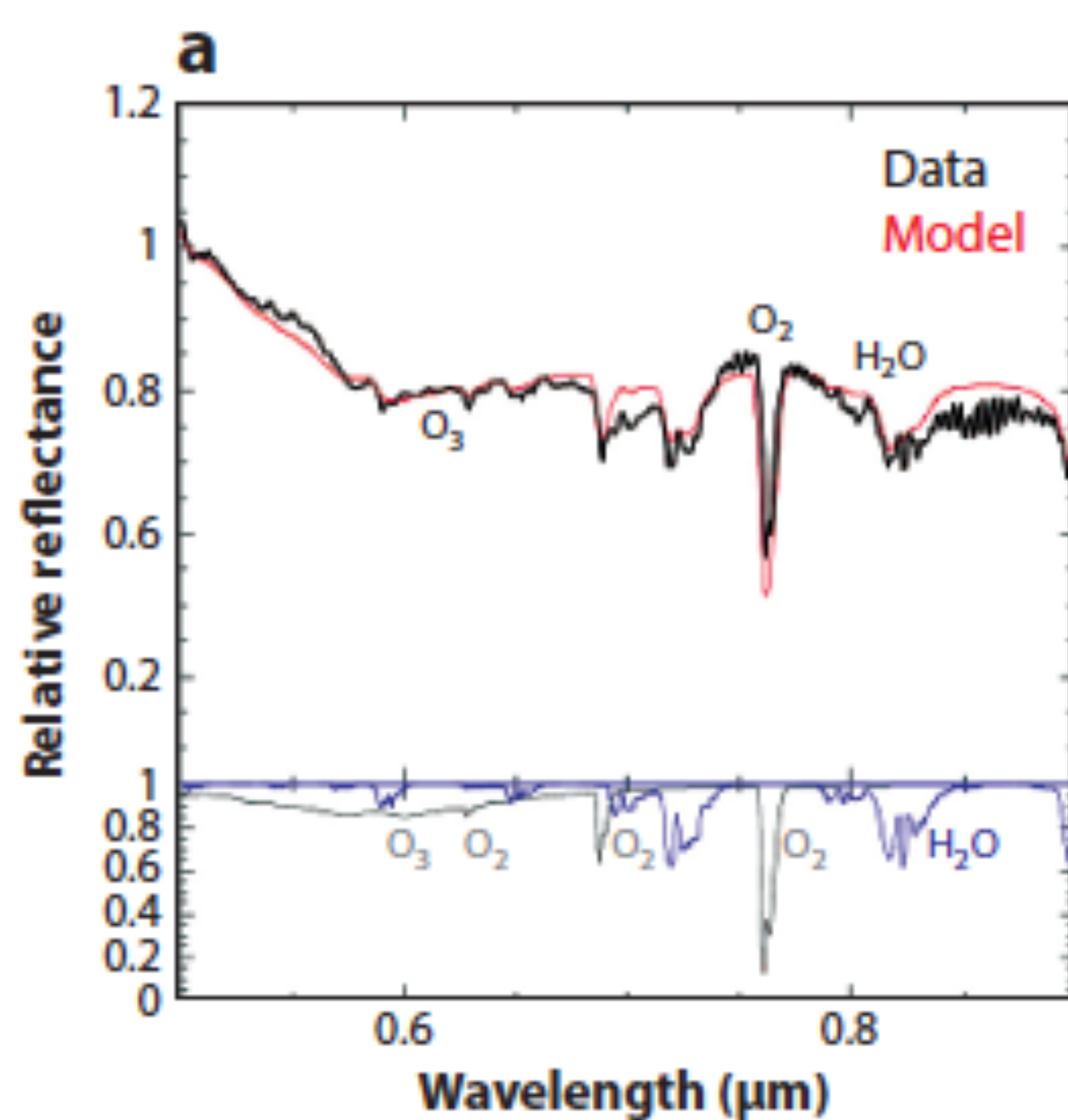


O efeito do albedo na temperatura superficial

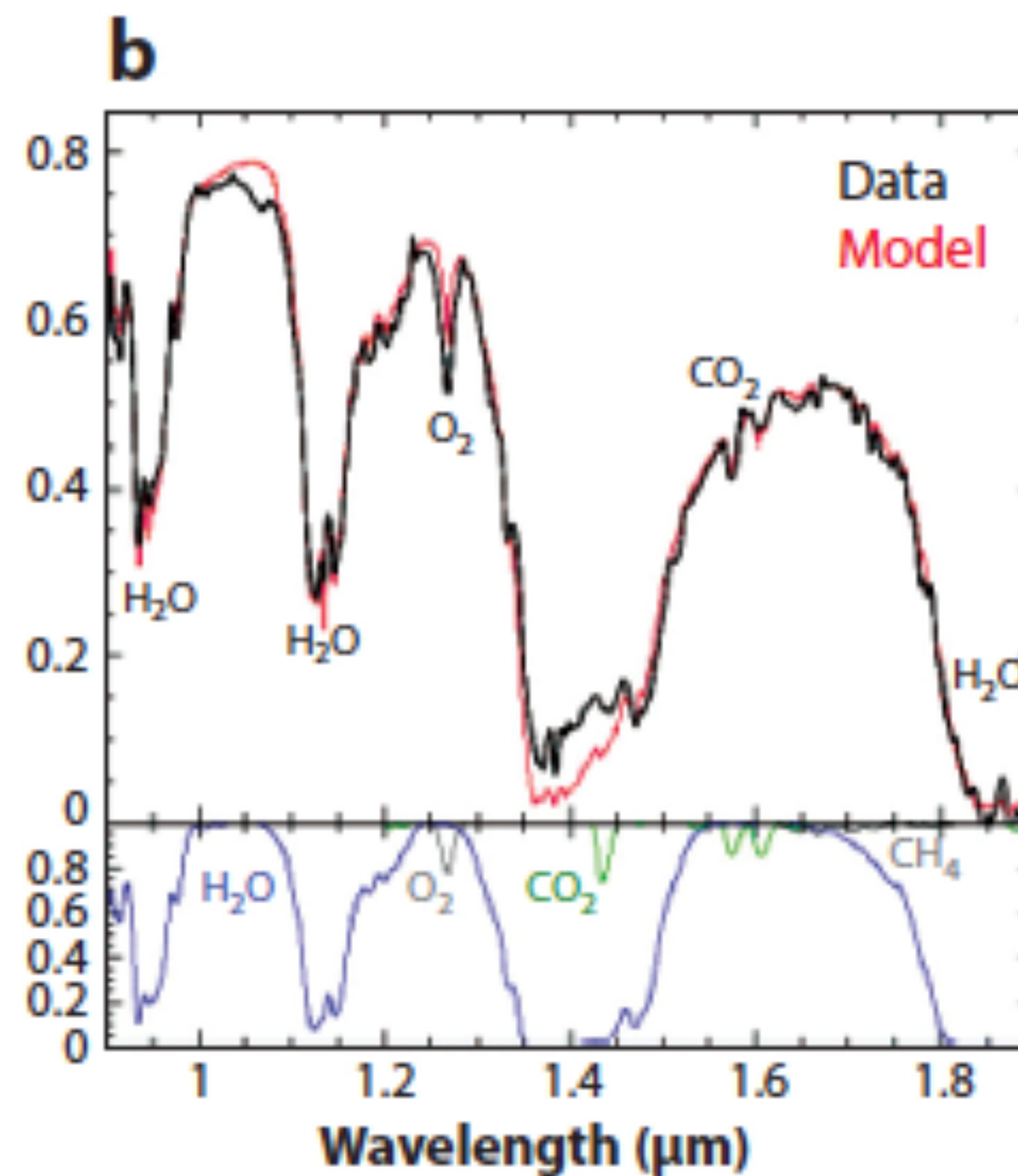
Albedos diferentes alteram a temperatura superficial



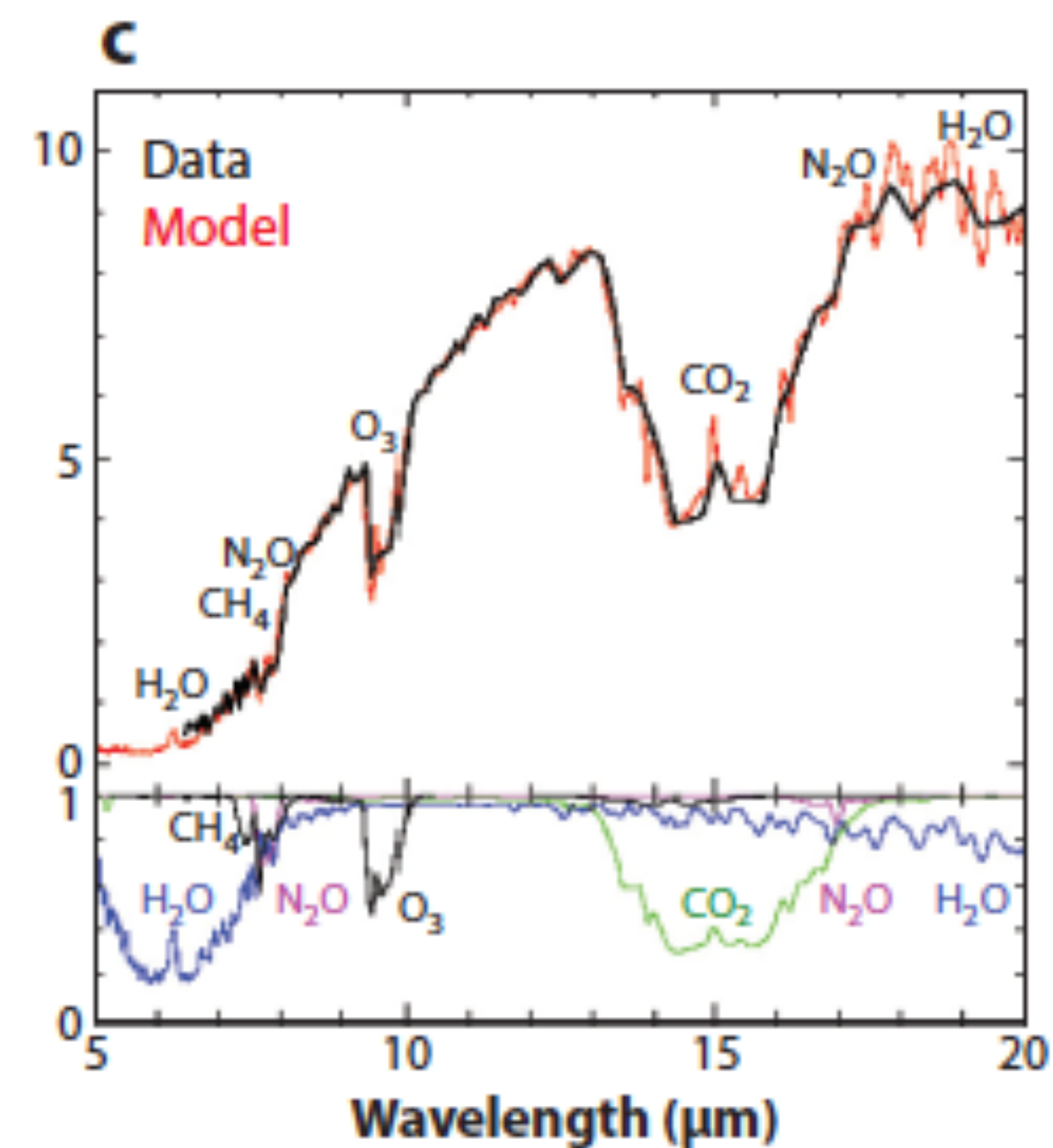
Visibilidade da atmosfera vista do espaço



Visível



Refletividade
(IV próximo)



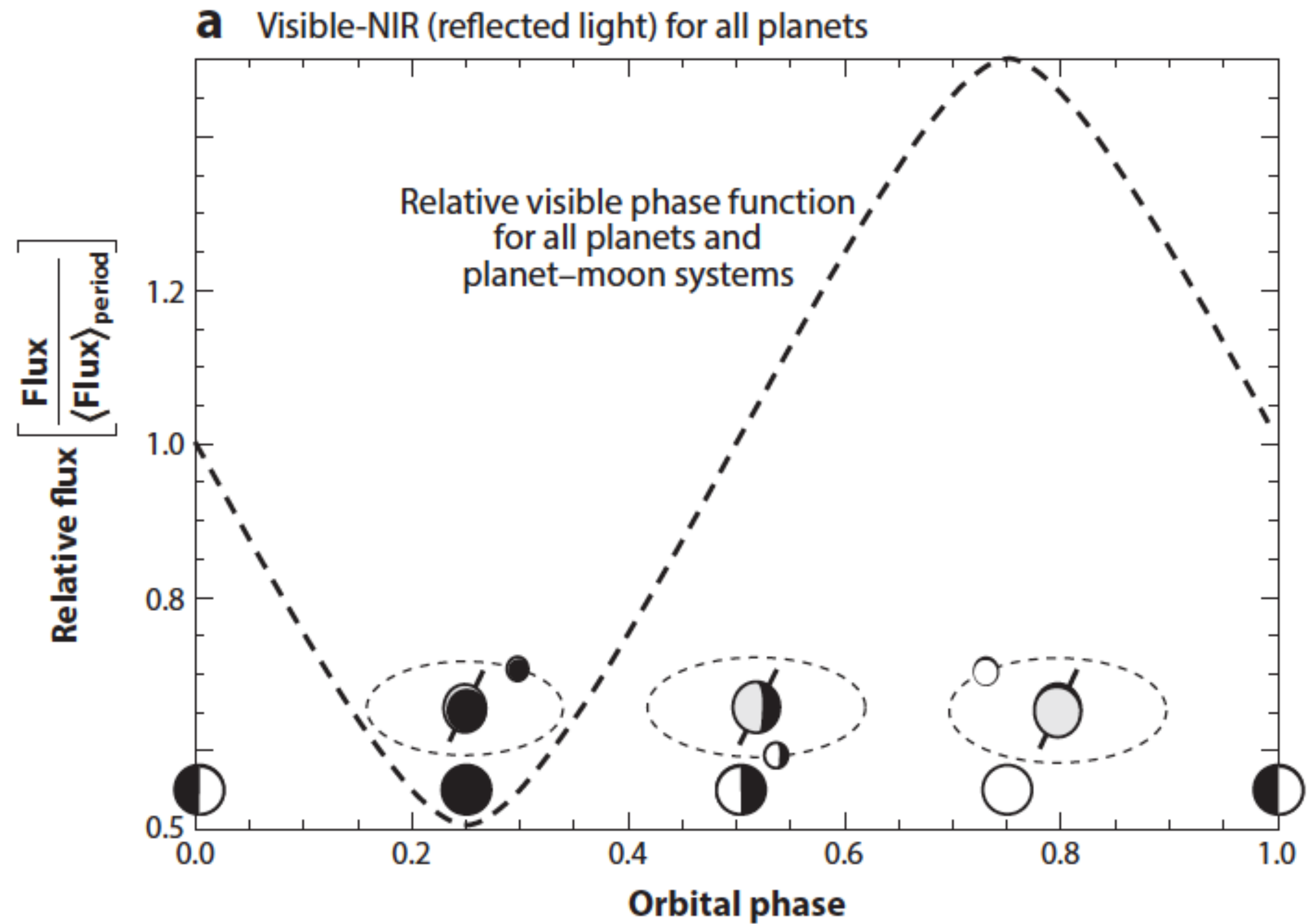
IV



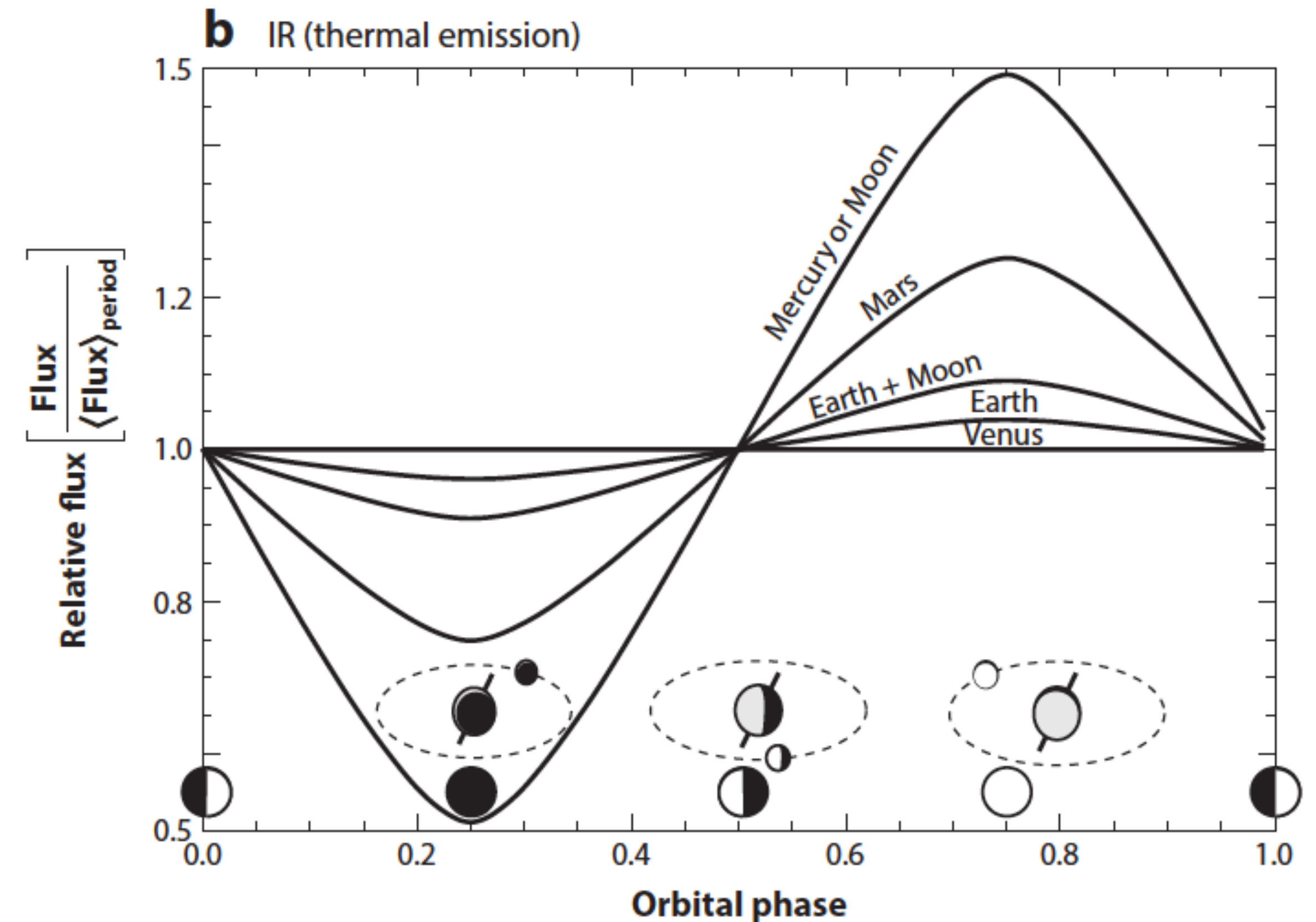
Caracterização de um sistema habitável

- ☑ Após a detecção, o cálculo da energia incidente sobre o planeta define sua posição dentro ou fora da ZH. Dois aspectos são essenciais para caracterização:
 - ✓ Espectros de baixa resolução serão provavelmente o primeiro observável. Diagramas cor-cor são uma primeira classificação. Entretanto, a comparação ainda é incipiente, devido a poucos planetas caracterizados até agora (comparação inicial é válida e útil)
 - ✓ Variações orbitais do fluxo de luz refletido permite distinguir corpos com e sem atmosfera.

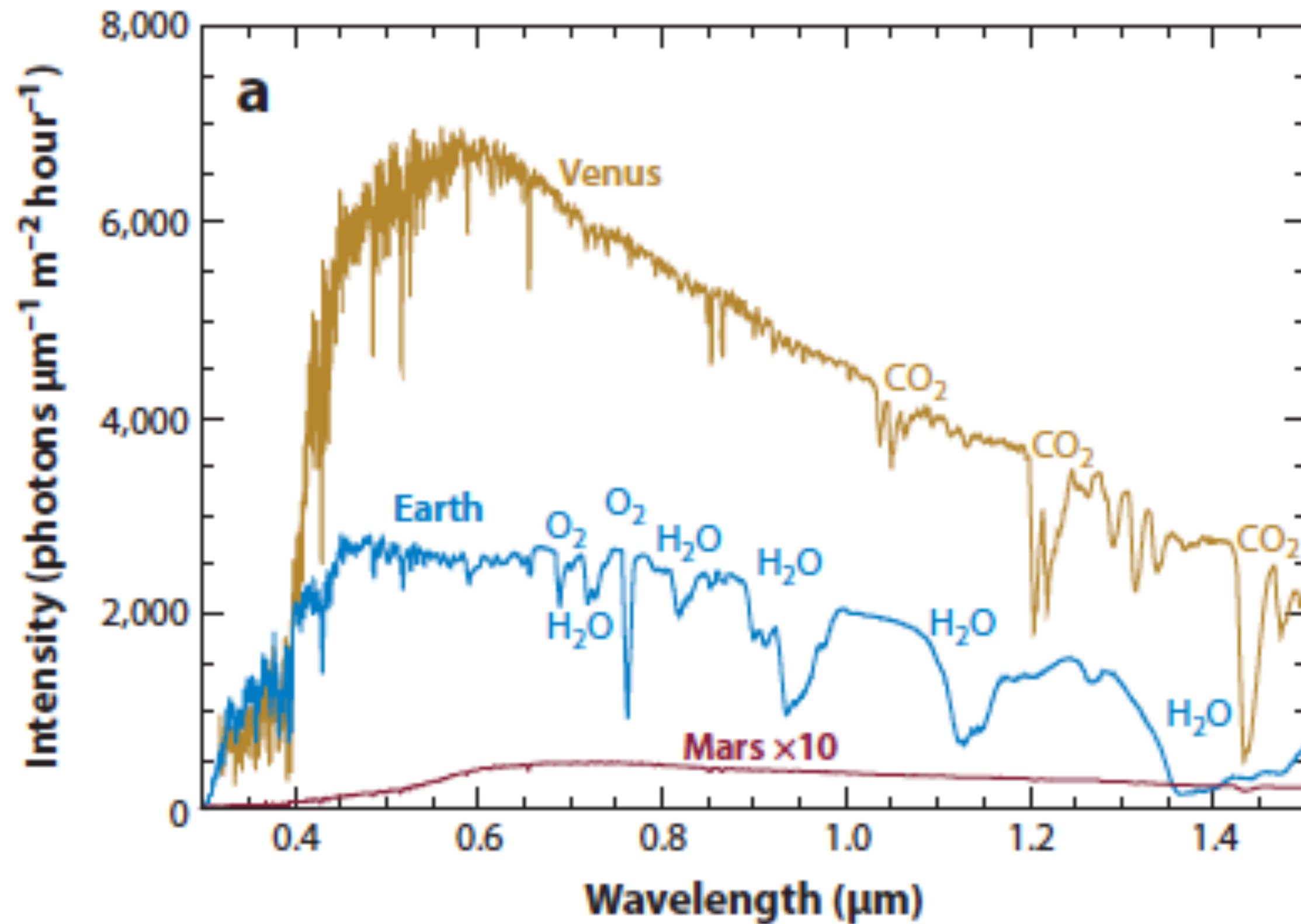
Caracterização de um sistema habitável



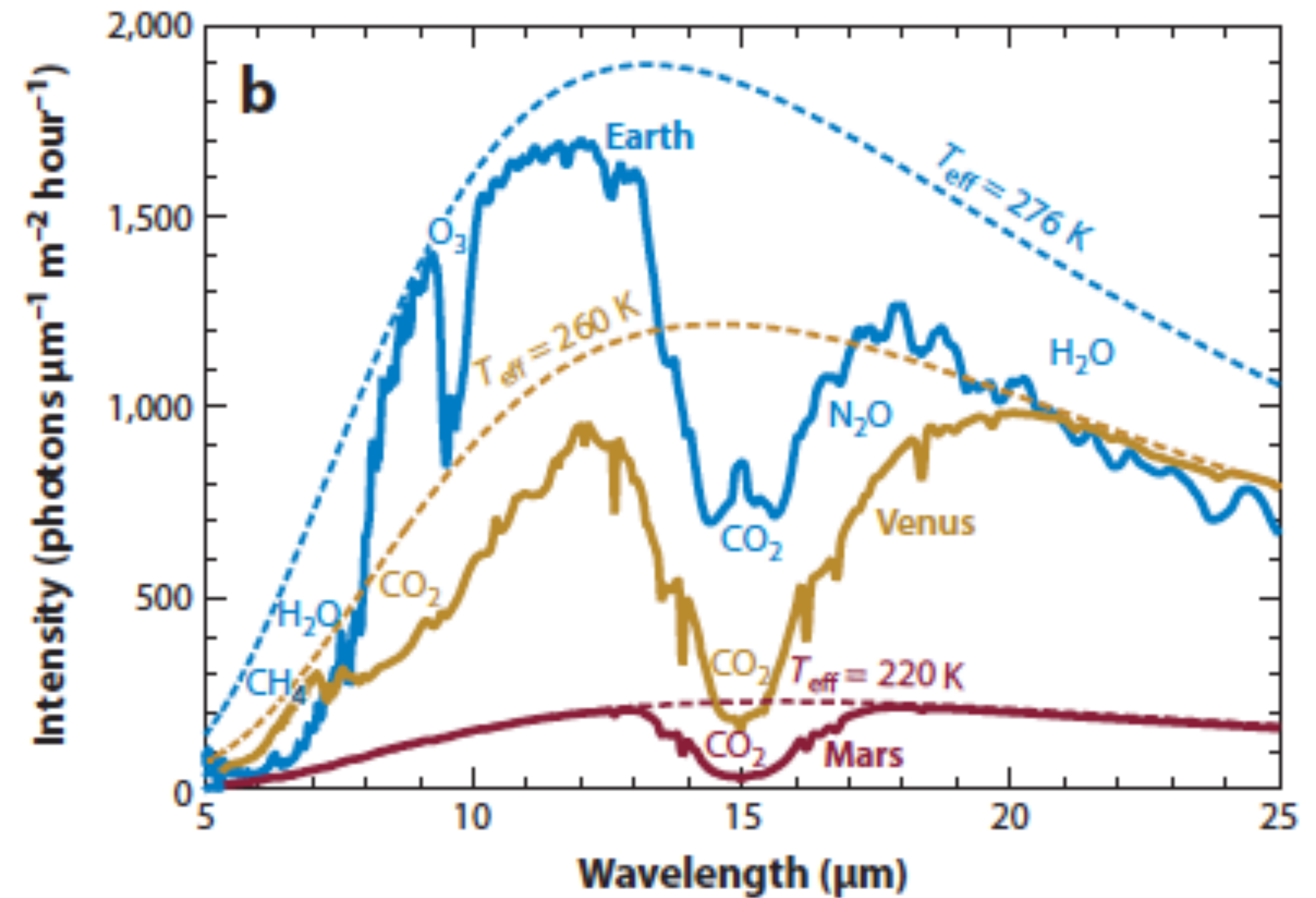
DISCUTIR E EXPLICAR AS POSIÇÕES



Caracterização de um sistema habitável



DISCUTIR E EXPLICAR AS POSIÇÕES





Bioassinaturas em outros mundos

- ☑ Atmosfera: gases em outros mundos?
- ☑ Onde procurar?
- ☑ Bioassinaturas e falsos positivos:
 - ✓ O_2 sozinho é sinal de vida?
 - ✓ CH_4 e N_2O são sinais de vida?
 - ✓ Desequilíbrio termodinâmico extremo é sinal de vida?
- ☑ Bioassinaturas superficiais
- ☑ Nuvens
- ☑ Evolução geológica dos biomarcadores

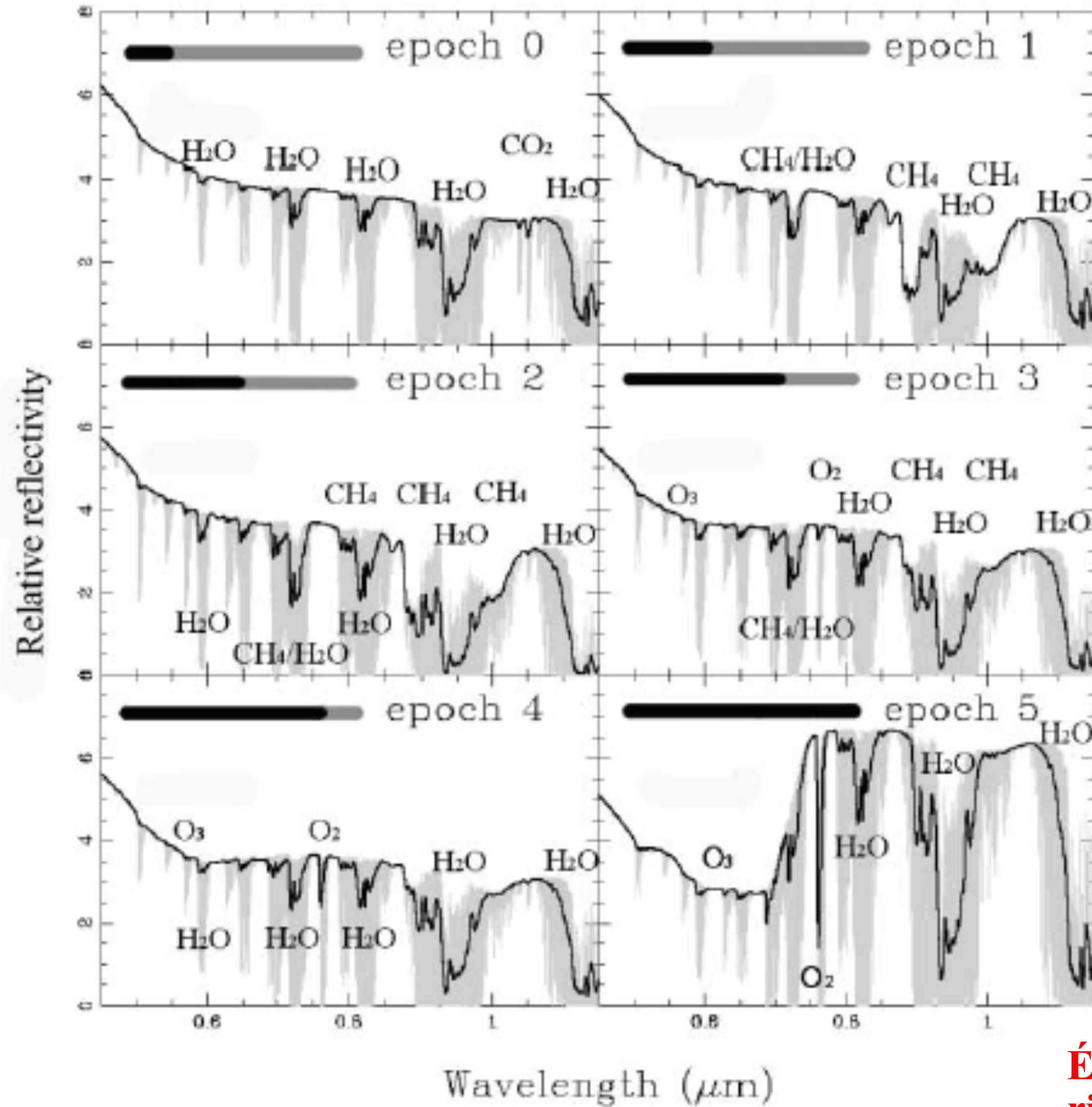
Modelo de evolução da atmosfera terrestre (visível e IV próximo)

Época 0: 3,9 Ganos, rica em CO₂

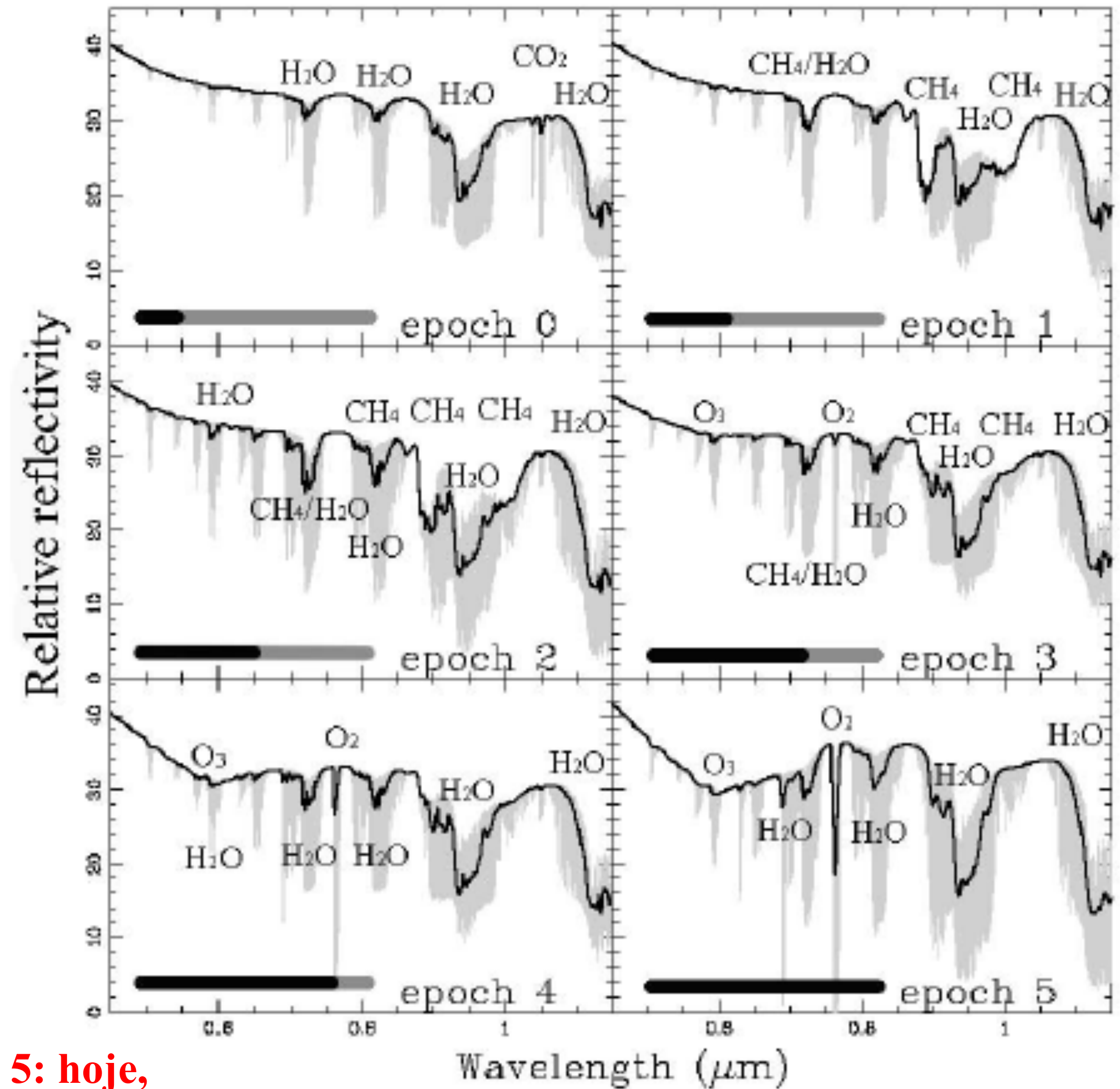
Sem nuvens

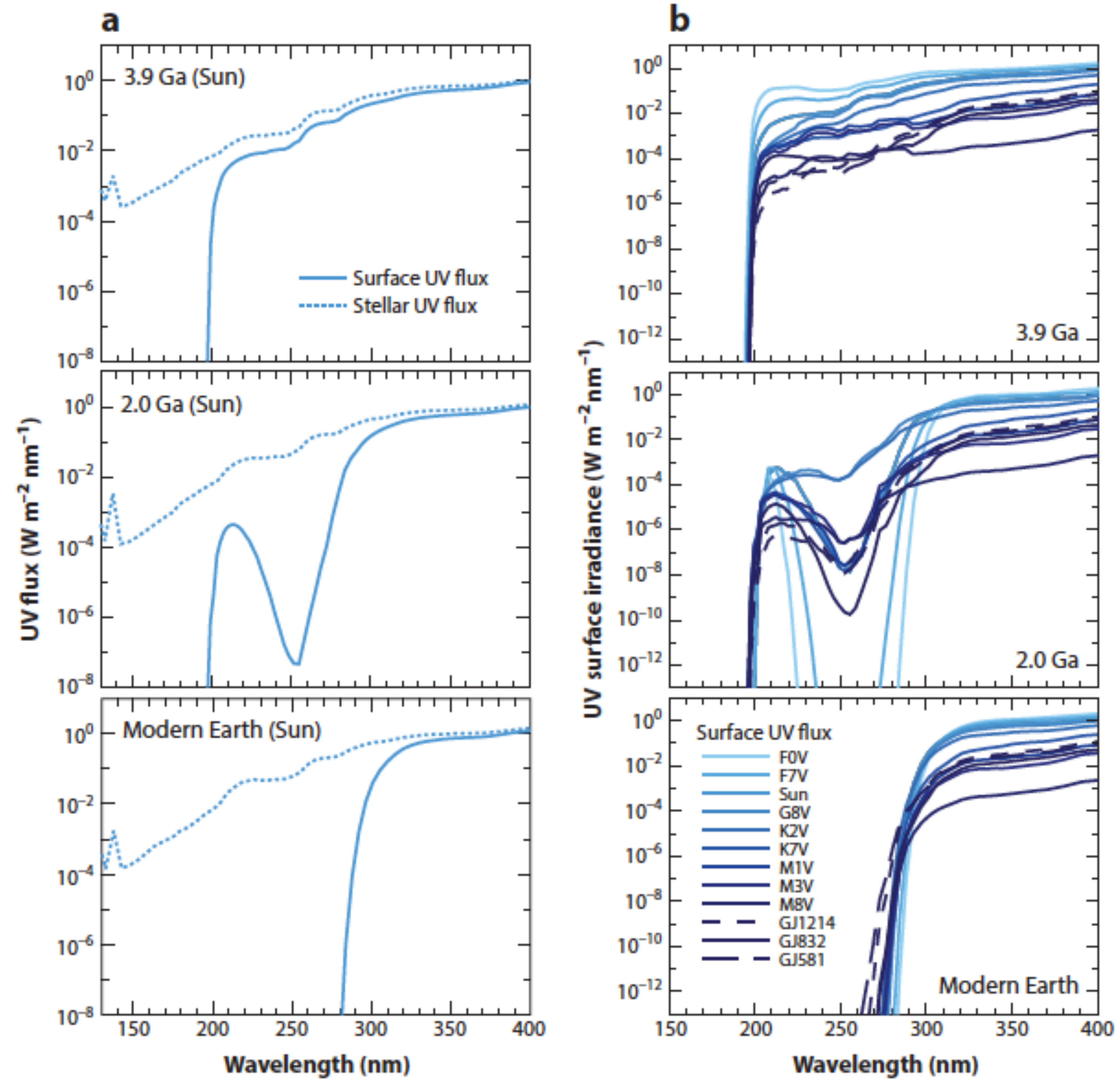
Com nuvens

Época 3: ~ 2 Ganos, rica em CO₂/CH₄

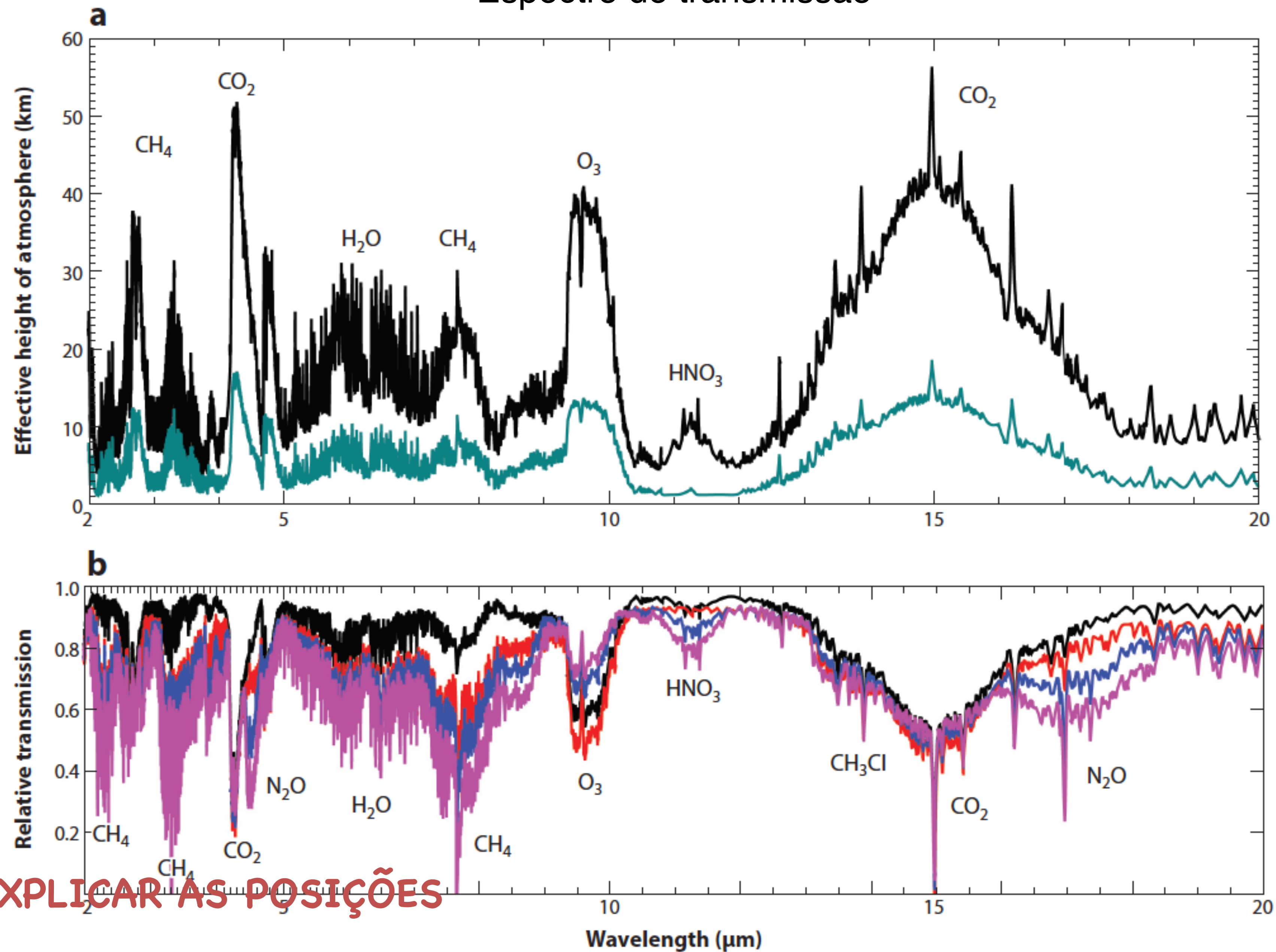


Época 5: hoje,
rica em O₂





Espectro de transmissão



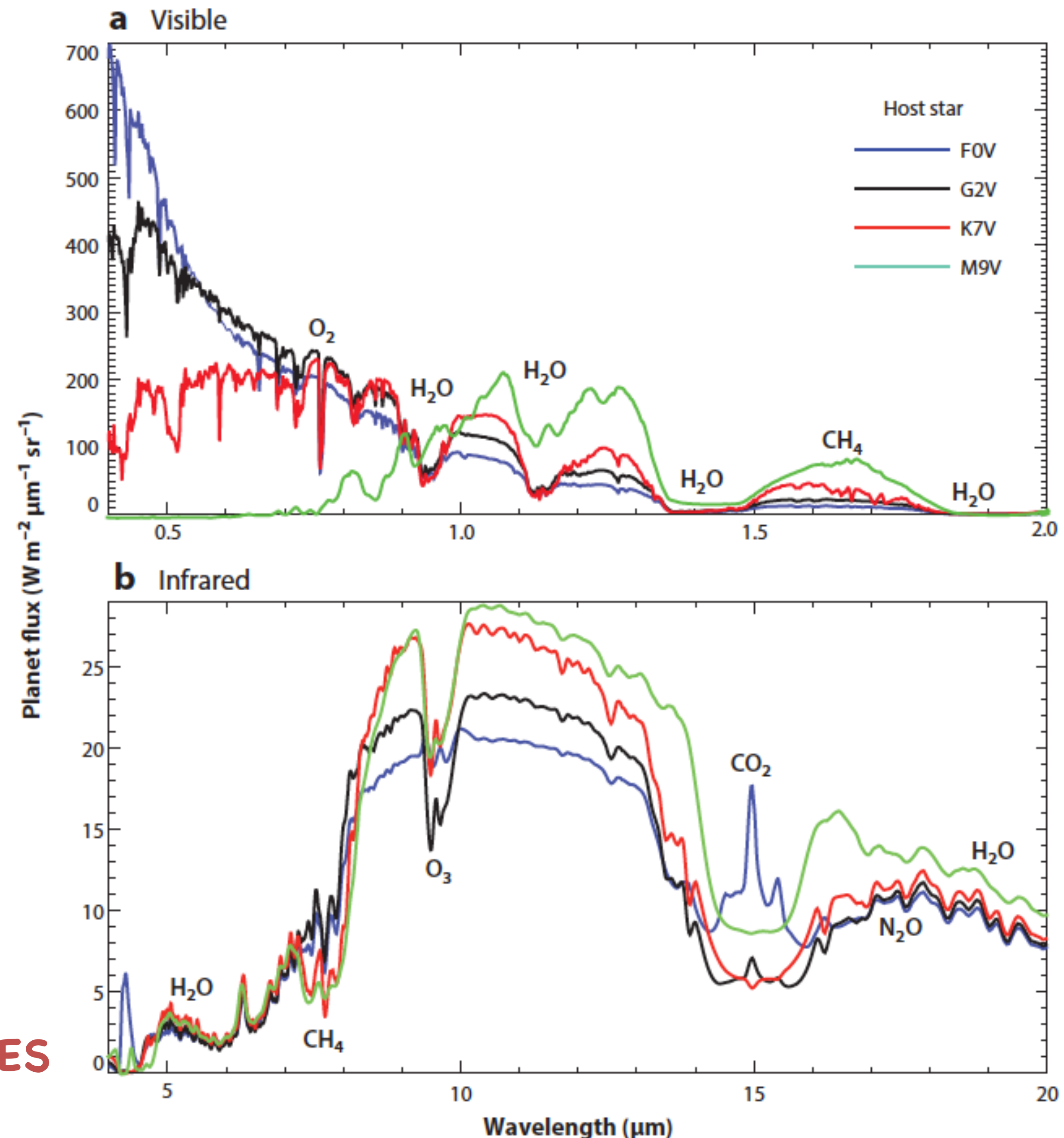
DISCUTIR E EXPLICAR AS POSIÇÕES

Espectro de absorção

A intensidade das características de absorção atmosférica varia significativamente entre planetas orbitando diferentes estrelas hospedeiras

A SED (Spectral Energy Distribution) da hospedeira influencia a composição química da atmosfera do planeta terrestre

DISCUTIR E EXPLICAR AS POSIÇÕES





CONDIÇÕES EXTREMAS DE HABITABILIDADE



Alguns aspectos

- ☑ Estrelas do tipo G, K e M conseguem permanecer na seq. principal por dezenas a centenas de milhões de anos (aporte constante de energia)
- ☑ Enriquecimento químico e leis da física e da química permitem a evolução química e o enriquecimento desde as primeiras centenas de milhões de anos
- ☑ Entretanto, outros valores das constantes físicas tornariam o Universo “biofóbico”?
- ☑ Trabalhos de Fred Adams (2008, 2015, 2016) apontam que nosso Universo não é o mais otimizado para o surgimento da vida



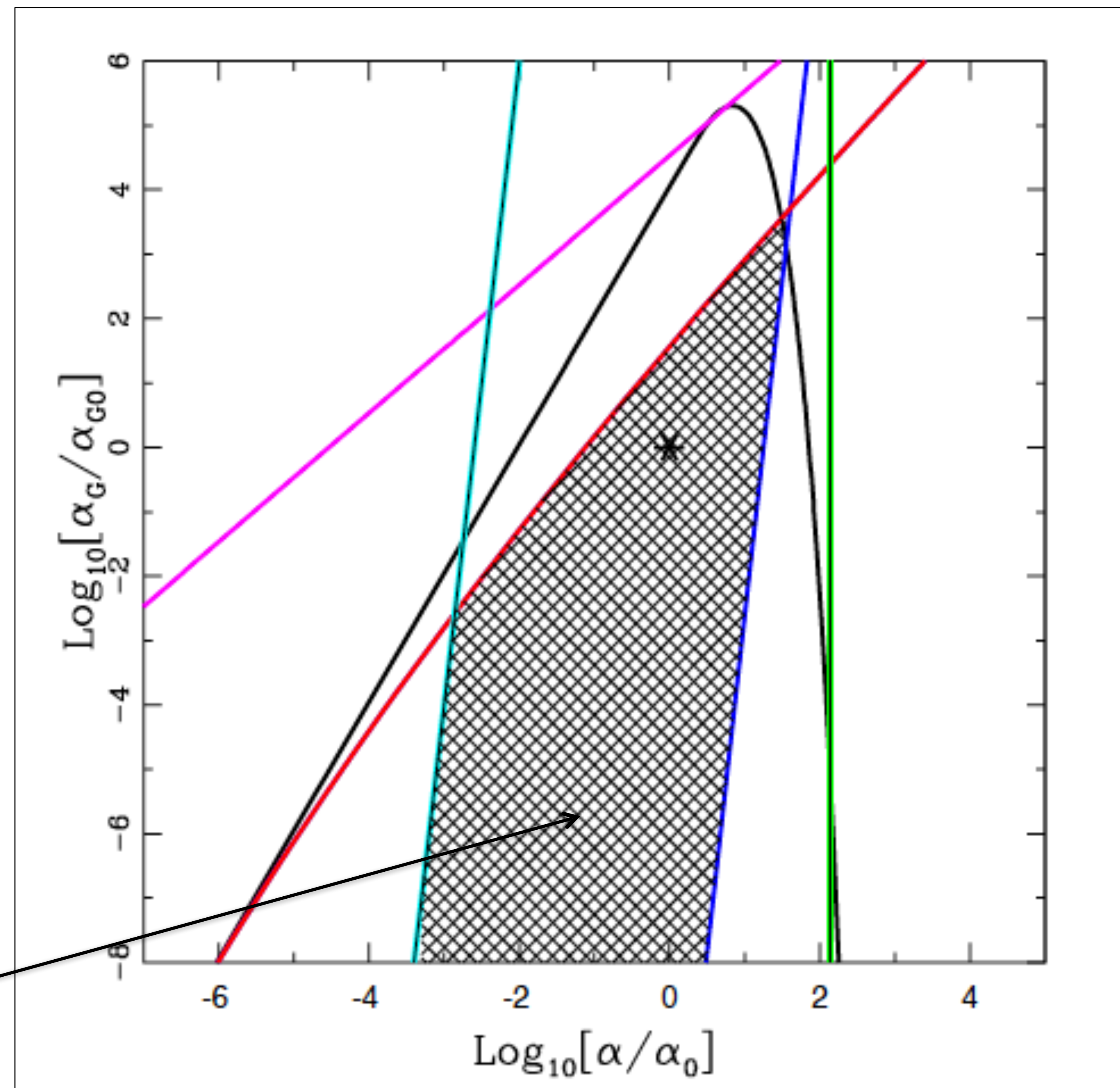
Estrelas e planetas habitáveis com outras constantes físicas?

- ☑ Outras formas das leis físicas conhecidas poderiam existir em outros Universos? Estrelas e planetas poderiam se formar lá? Que vínculos é possível colocar nessa pergunta?
- ✓ Estrelas com longo tempo de vida (> 13 bilhões de anos) realizando reações nucleares existem
- ✓ Temperaturas planetárias na superfície são quentes o suficiente para permitir reações químicas
- ✓ Tempo de vida estelares são longos o suficiente para permitir evolução biológica
- ✓ Planetas tem massa suficiente para manter atmosferas
- ✓ Planetas tem massa pequena o suficiente para manter a matéria ordinária
- ✓ Planetas tem massa grande o suficiente para permitir biosferas complexas
- ✓ Planetas são menores em massa que suas estrelas hospedeiras
- ✓ Estrelas são menores em massa que suas galáxias hospedeiras

Plano α - α_G que satisfaz os requisitos do slide anterior.

- Universos com estrelas funcionais e planetas habitáveis são viáveis dentro uma margem grande (algumas ordens de grandeza) do espaço de parâmetros.
- Limites superiores para a razão $\alpha/\alpha_G < 10^{-34}$ indicam que universos habitáveis permite uma hierarquia grande entre as intensidades da força gravitacional e da força eletromagnética

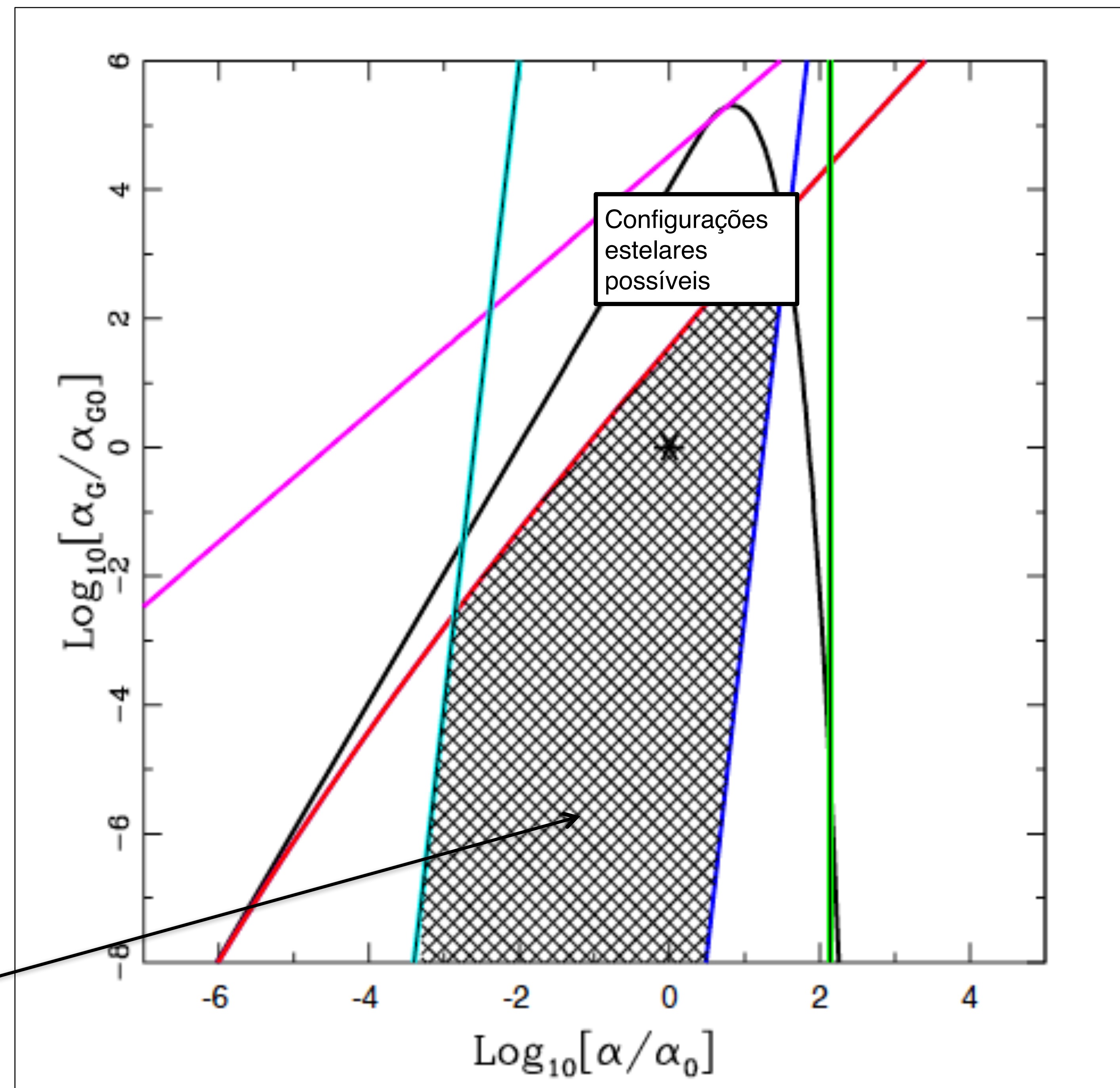
Região permitida



Plano α - α_G que satisfaz os requisitos do slide anterior.

- Universos com estrelas funcionais e planetas habitáveis são viáveis dentro uma margem grande (algumas ordens de grandeza) do espaço de parâmetros.
- Limites superiores para a razão $\alpha/\alpha_G < 10^{-34}$ indicam que universos habitáveis permite uma hierarquia grande entre as intensidades da força gravitacional e da força eletromagnética

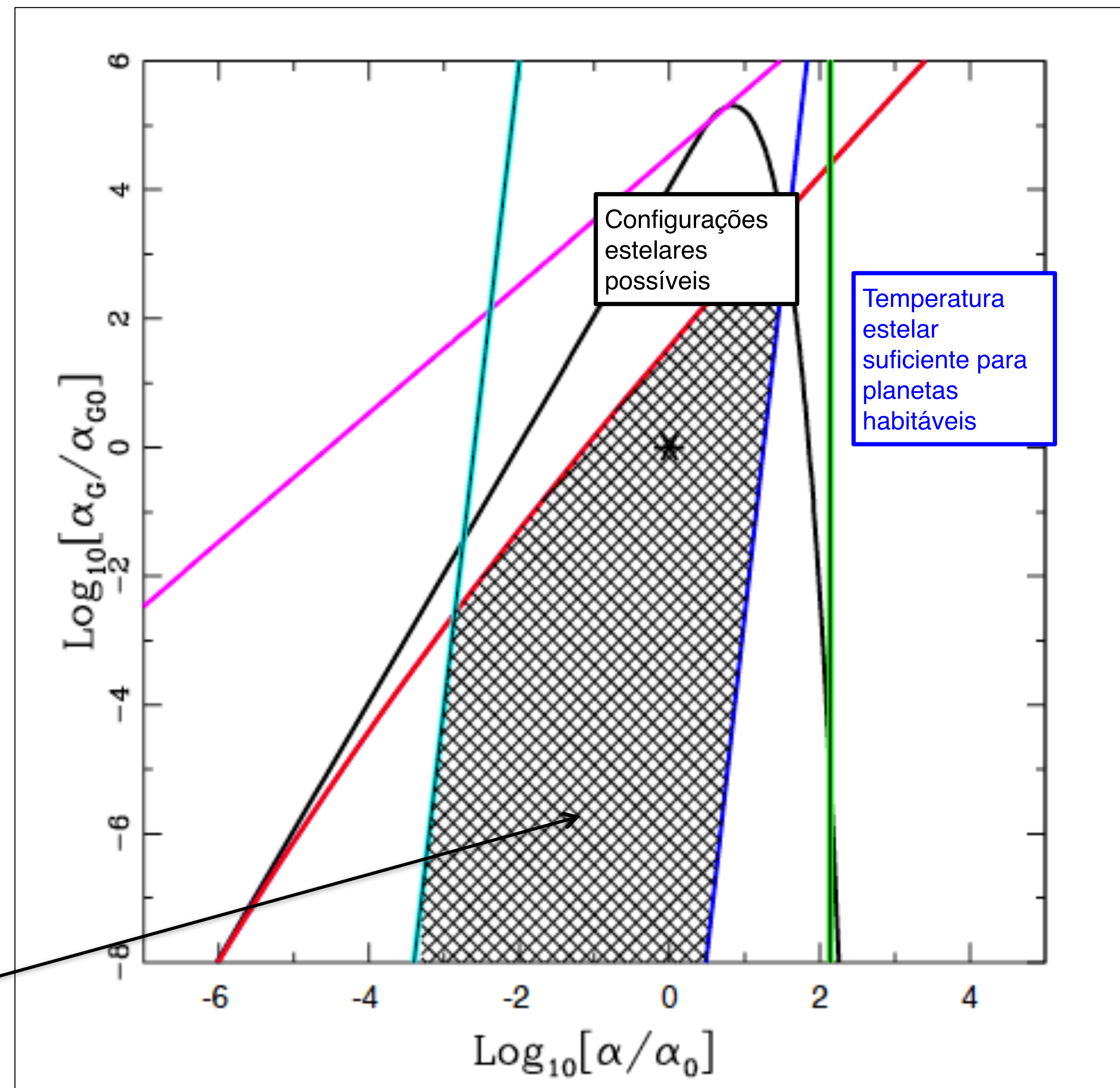
Região permitida



Plano α - α_G que satisfaz os requisitos do slide anterior.

- Universos com estrelas funcionais e planetas habitáveis são viáveis dentro uma margem grande (algumas ordens de grandeza) do espaço de parâmetros.
- Limites superiores para a razão $\alpha/\alpha_G < 10^{-34}$ indicam que universos habitáveis permite uma hierarquia grande entre as intensidades da força gravitacional e da força eletromagnética

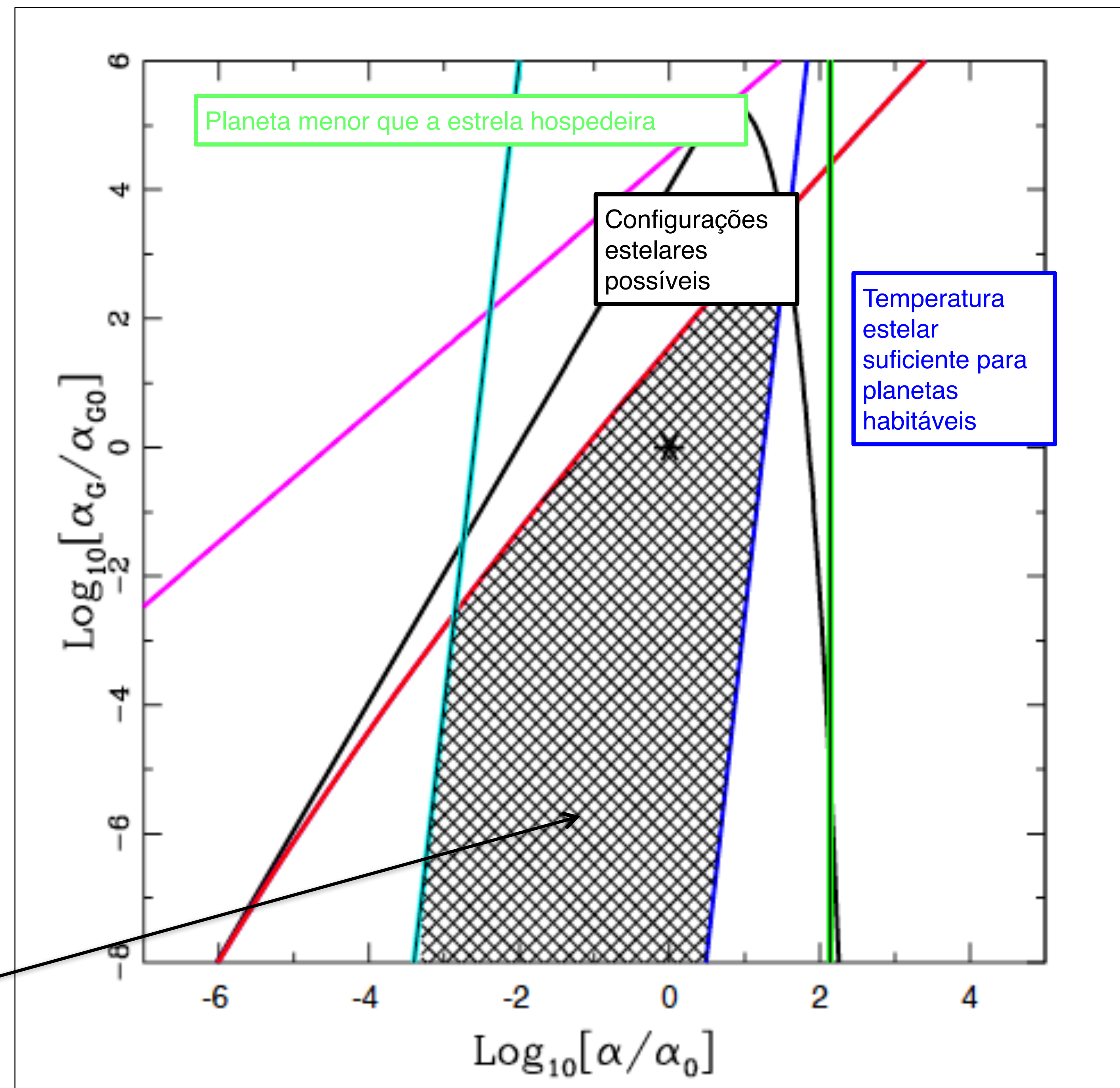
Região permitida



Plano α - α_G que satisfaz os requisitos do slide anterior.

- Universos com estrelas funcionais e planetas habitáveis são viáveis dentro uma margem grande (algumas ordens de grandeza) do espaço de parâmetros.
- Limites superiores para a razão $\alpha/\alpha_G < 10^{-34}$ indicam que universos habitáveis permite uma hierarquia grande entre as intensidades da força gravitacional e da força eletromagnética

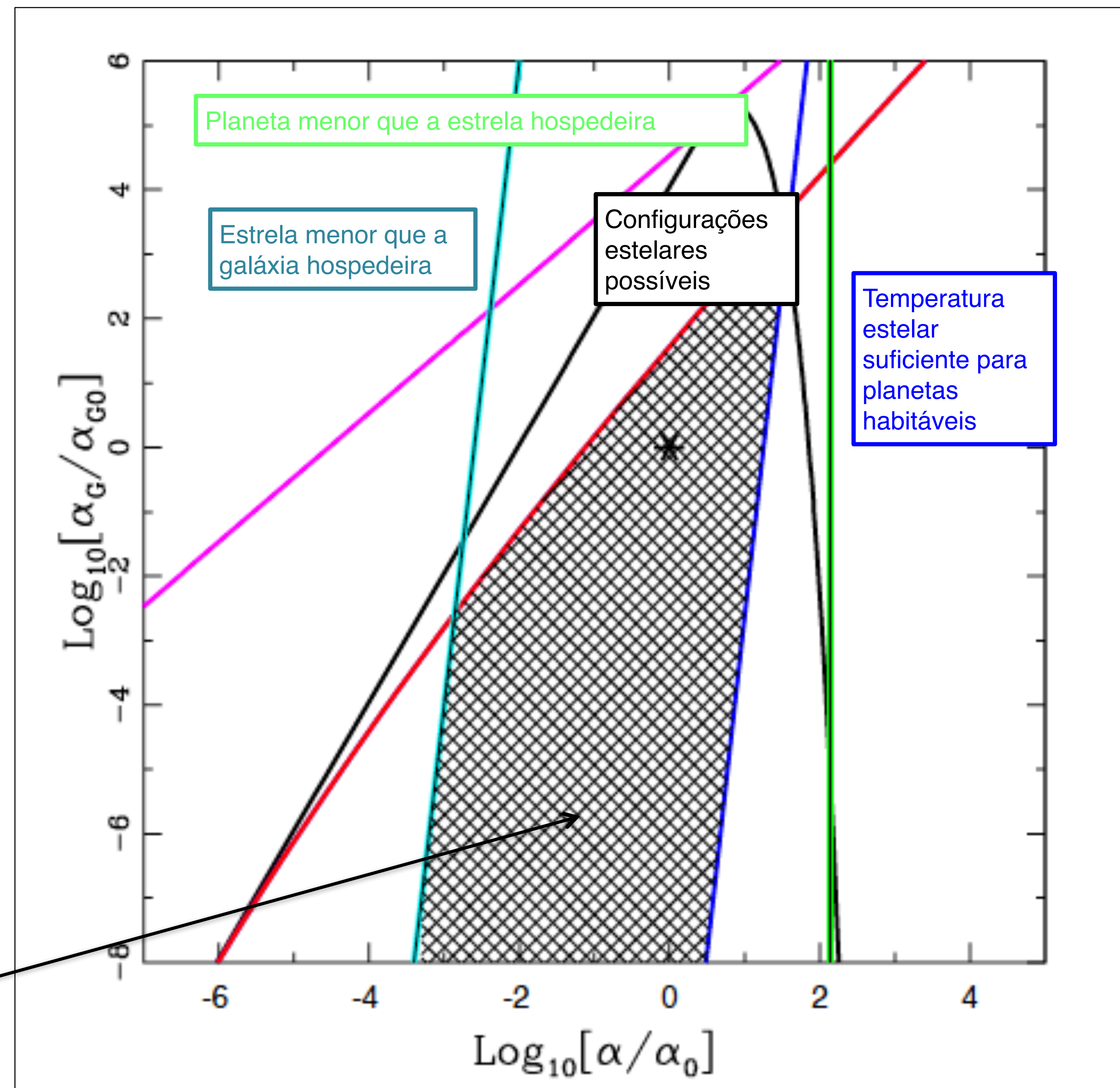
Região permitida



Plano α - α_G que satisfaz os requisitos do slide anterior.

- Universos com estrelas funcionais e planetas habitáveis são viáveis dentro uma margem grande (algumas ordens de grandeza) do espaço de parâmetros.
- Limites superiores para a razão $\alpha/\alpha_G < 10^{-34}$ indicam que universos habitáveis permite uma hierarquia grande entre as intensidades da força gravitacional e da força eletromagnética

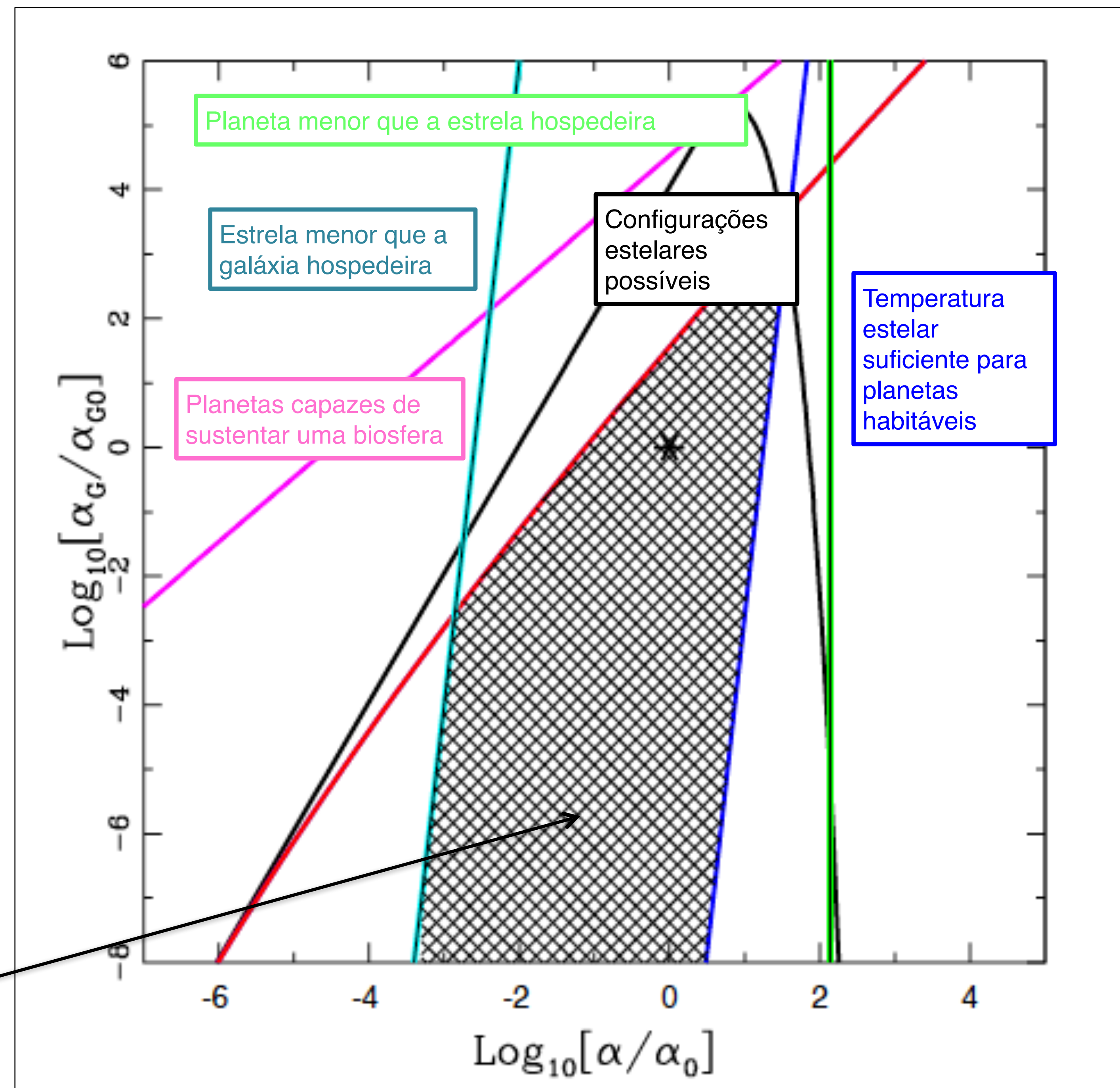
Região permitida



Plano α - α_G que satisfaz os requisitos do slide anterior.

- Universos com estrelas funcionais e planetas habitáveis são viáveis dentro uma margem grande (algumas ordens de grandeza) do espaço de parâmetros.
- Limites superiores para a razão $\alpha/\alpha_G < 10^{-34}$ indicam que universos habitáveis permite uma hierarquia grande entre as intensidades da força gravitacional e da força eletromagnética

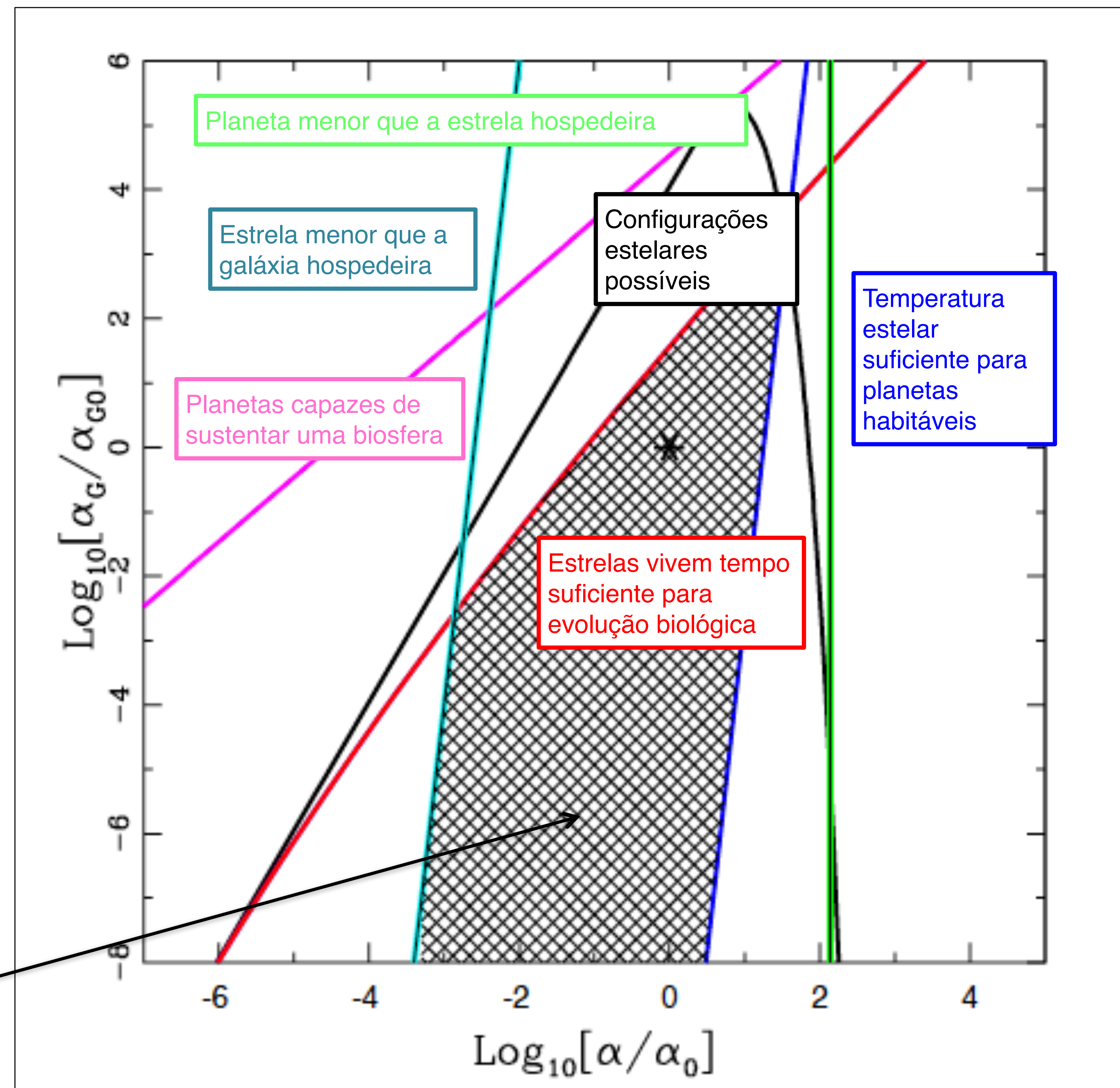
Região permitida



Plano α - α_G que satisfaz os requisitos do slide anterior.

- Universos com estrelas funcionais e planetas habitáveis são viáveis dentro uma margem grande (algumas ordens de grandeza) do espaço de parâmetros.
- Limites superiores para a razão $\alpha/\alpha_G < 10^{-34}$ indicam que universos habitáveis permite uma hierarquia grande entre as intensidades da força gravitacional e da força eletromagnética

Região permitida



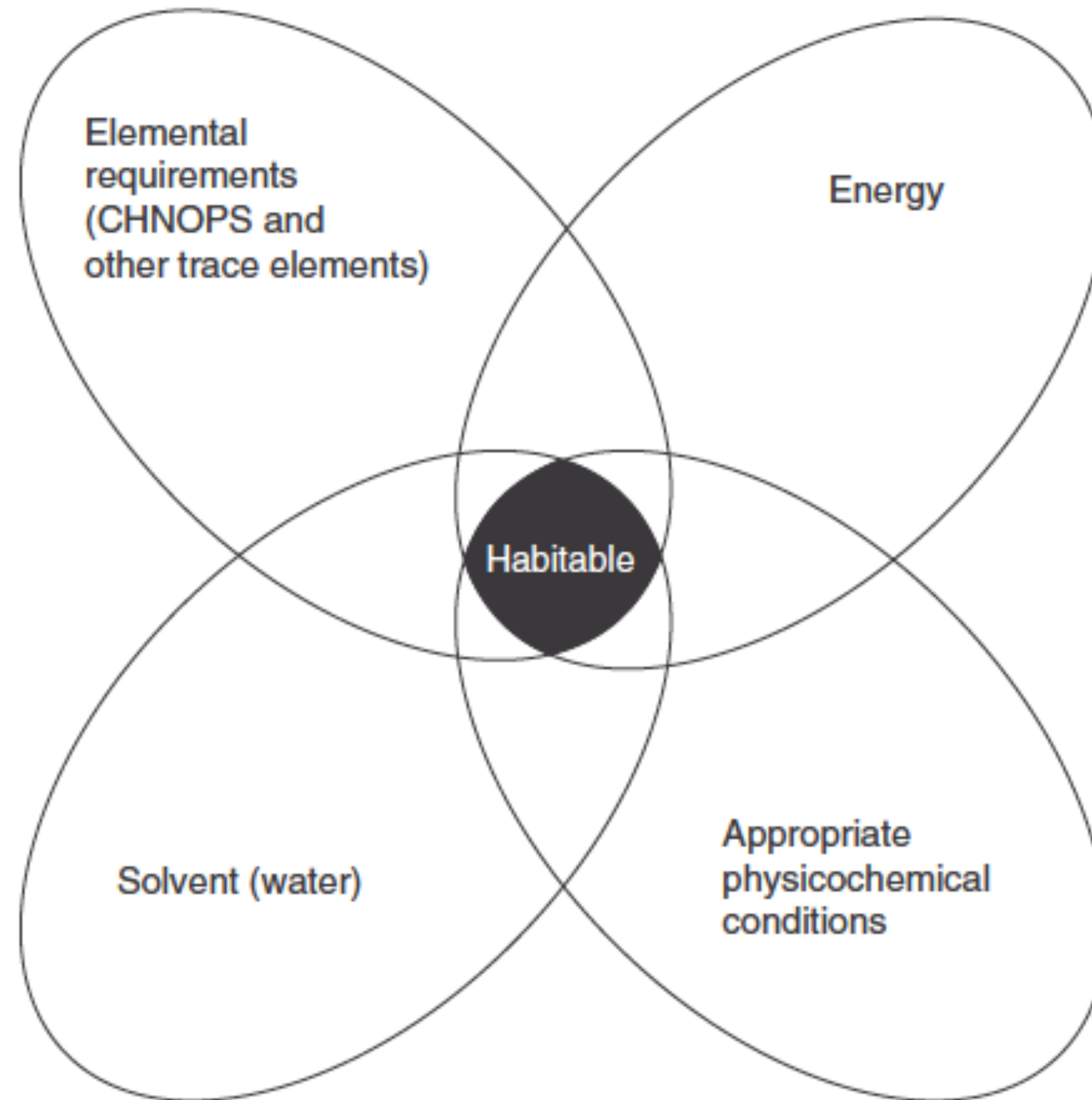


Habitabilidade – comentários finais

- ☑ Para uma abordagem mais geral sobre habitabilidade no Universo, alguns pontos para reflexão são importantes:
- ✓ Compreensão da formação e evolução de sistemas planetários e planetas habitáveis
- ✓ Busca das origens dos “tijolos da vida”
- ✓ Compreensão da origem e evolução da vida na Terra, bem como de seus limites
- ✓ Detecção de vida em outros planetas e satélites
- ✓ Marte, Europa e Titã: bancos de testes...



Resumo dos ingredientes para habitabilidade instantânea





FIM DA AULA 5