

FUNDAMENTOS DE ASTROBIOLOGIA

AST-416-3

Aula 2

Cosmologia e Astrofísica

C.A.Wuensche

INPE - Divisão de Astrofísica

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



Papel da Cosmologia, Astrofísica na construção dos “tijolos da vida” como a conhecemos

☑ Leitura:

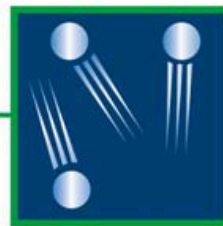
- ✓ Caps. 2 e 3 do Livro Astrobiology (Charles Cockel)
- ✓ Cap. 3 do livro “Astrobiologia: uma ciência emergente”
- ✓ artigo “The Astrobiology Primer 2.0”, cap. 3 (Domagal-Goldman & Wright, Eds., 2016)
- ✓ artigo “On the Habitability of our Universe” (A. Loeb, 2016)

COMPOSITION OF THE COSMOS

Buracos negros supermassivos (0,04%)



Heavy Elements:
0.03%

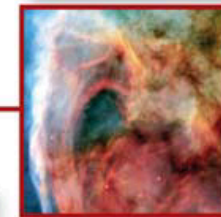


Neutrinos:
0.3%

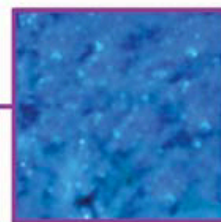
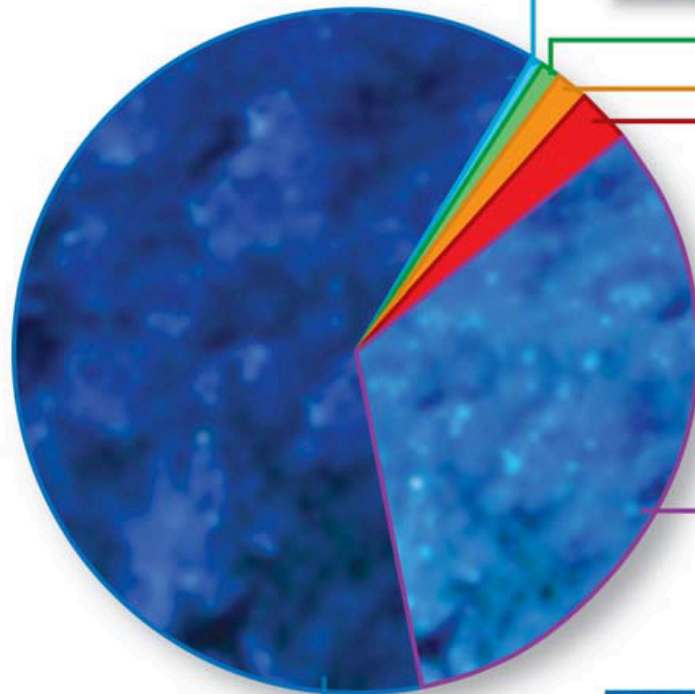
Os constituintes da vida vêm daqui!!!



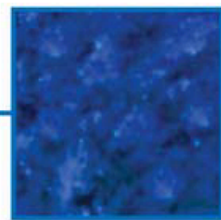
Stars:
0.5%



Free Hydrogen
and Helium:
4%

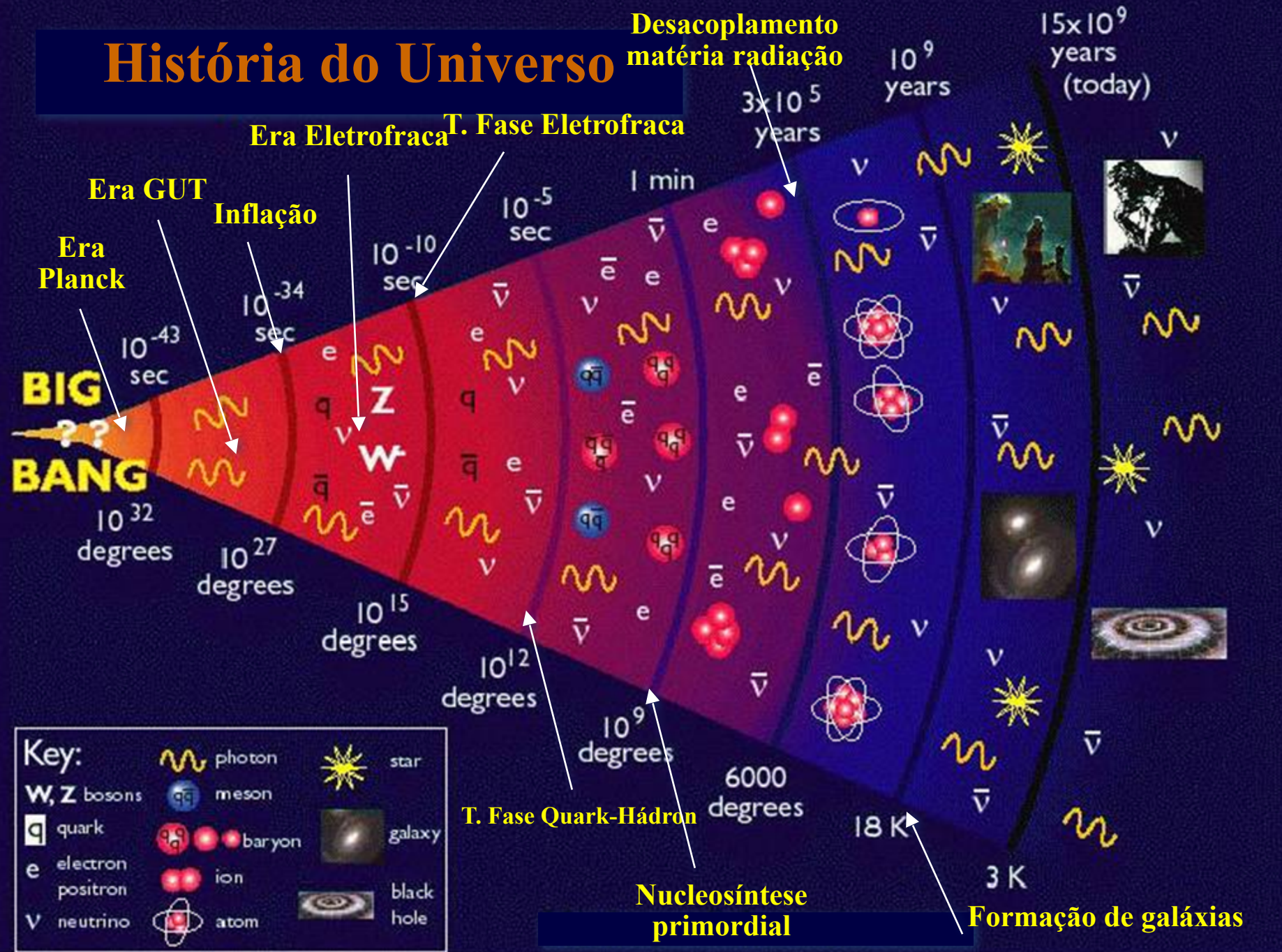


Dark Matter:
25%



Dark Energy:
70%

História do Universo





As forças conhecidas

- ☑ Gravitacional \Rightarrow somente atrativa (grávitons), atua em todas as escalas de tamanho
- ☑ Eletromagnética \Rightarrow atrativa/repulsiva (fótons), atua de escalas atômicas a escalas galácticas
- ☑ Forças nucleares \Rightarrow mantêm o núcleo estável e sua intensidade decai exponencialmente para $r > r_{\text{núcleo}}$ (glúons e bósons massivos)

Física \Rightarrow Química \Rightarrow Biologia???



As forças conhecidas

- ☑ Gravitacional \Rightarrow somente atrativa (grávitons), atua em todas as escalas de tamanho
- ☑ Eletromagnética \Rightarrow atrativa/repulsiva (fótons), atua de escalas atômicas a escalas galácticas
- ☑ Forças nucleares \Rightarrow mantêm o núcleo estável e sua intensidade decai exponencialmente para $r > r_{\text{núcleo}}$ (glúons e bósons massivos)

Física \Rightarrow Química \Rightarrow Biologia???

Sugestão de leitura: os 4 artigos da revista *Physics World*, julho de 2009 (“How Physics is changing Biology”)



O modelo cosmológico padrão - MCP

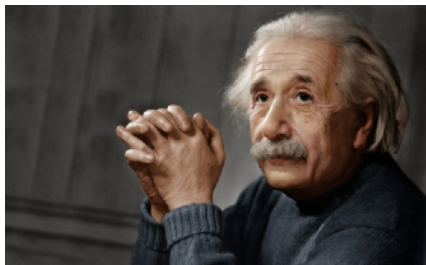
- ✓ Idade do Universo: ~ 14 bilhões de anos
- ✓ Composição: matéria bariônica, matéria escura, energia escura
- ✓ Dinâmica descrita pela Teoria Geral da Relatividade e Métrica de Robertson-Walker



Alexander
Friedman

- ✓ Suporte observacional
 - ✓ Expansão do Universo
 - ✓ Composição do Universo (nucleossíntese primordial)
 - ✓ Existência da Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (em inglês, CMB ou CMBR)
 - ✓ Aceleração da expansão do Universo

Albert Einstein

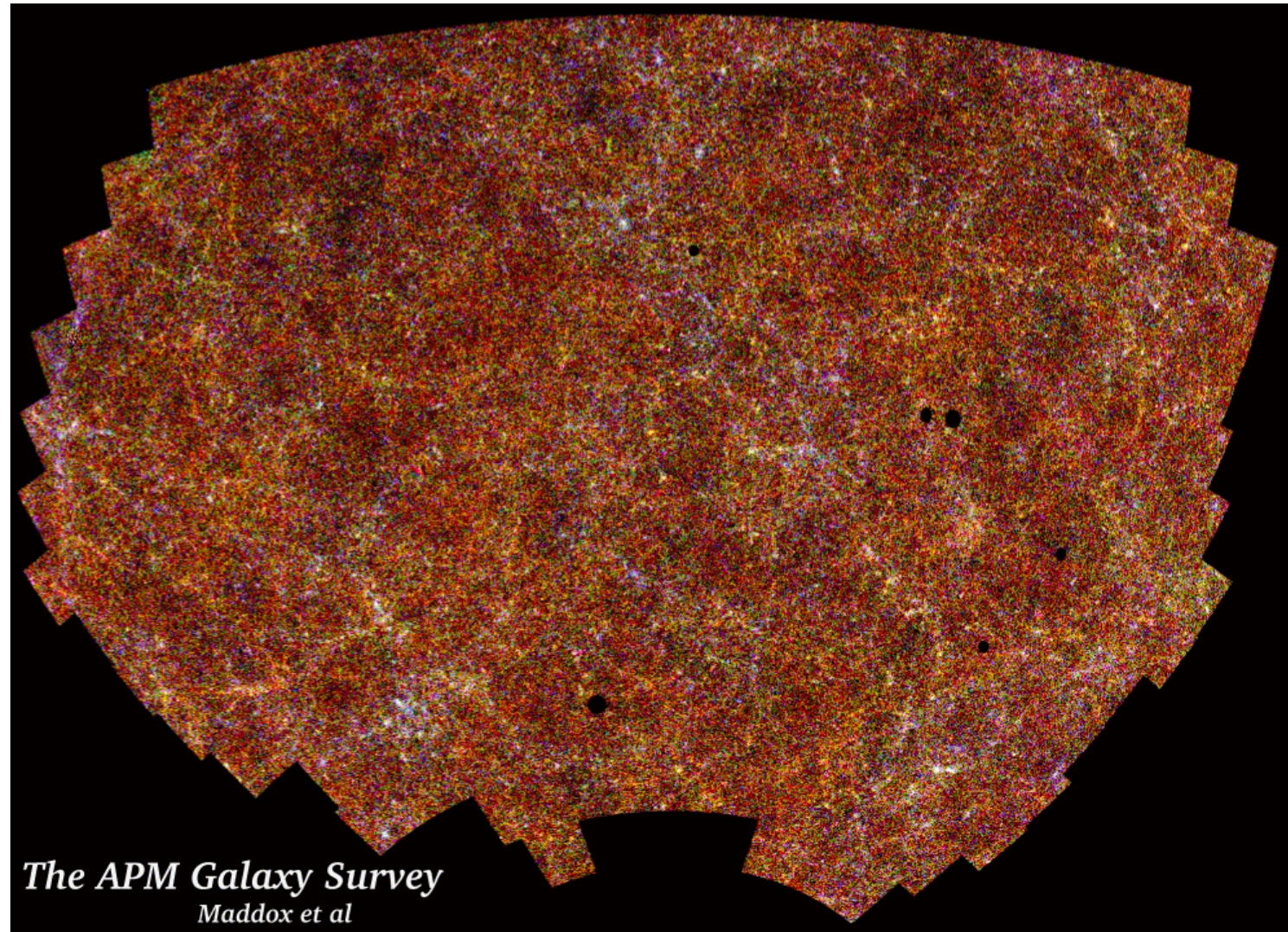




O modelo cosmológico padrão - MCP

- ☑ A cosmologia moderna parte de algumas hipóteses de trabalho.
 - ✓ As leis da física válidas no sistema solar valem também para o resto do Universo.
 - ✓ As leis da física podem também ser extrapoladas para o passado.
- ☑ Princípio de Copérnico: não ocupamos um lugar privilegiado - somos observadores comuns..
- ☑ Princípio Cosmológico: o Universo é espacialmente homogêneo e isotrópico.
 - ✓ isotropia local + homogeneidade = isotropia global
- ☑ Gravitação é dominante em grandes escalas: alcance das interações fraca e forte $\sim 10^{-13}$ cm.
- ☑ Embora $e^2/GM_p^2 \gg 1$, os grandes agregados são eletricamente neutros.

Uma visão do Universo no fim do séc. XX



APM survey, contendo 3 milhões de galáxias e cerca de 10 milhões de estrelas, cobrindo cerca de 7.000 graus quadrados

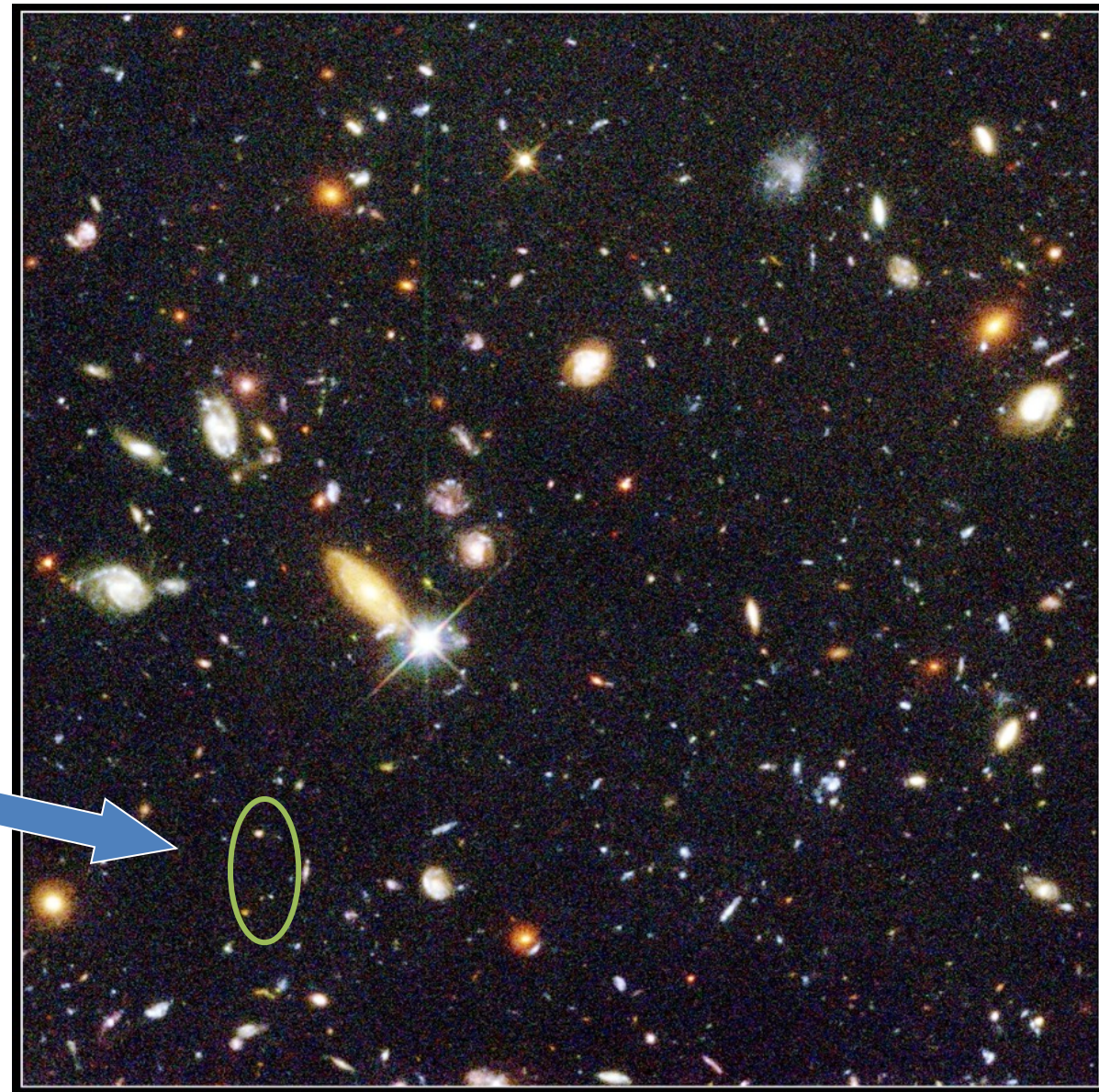


Uma visão do Universo no séc. XXI

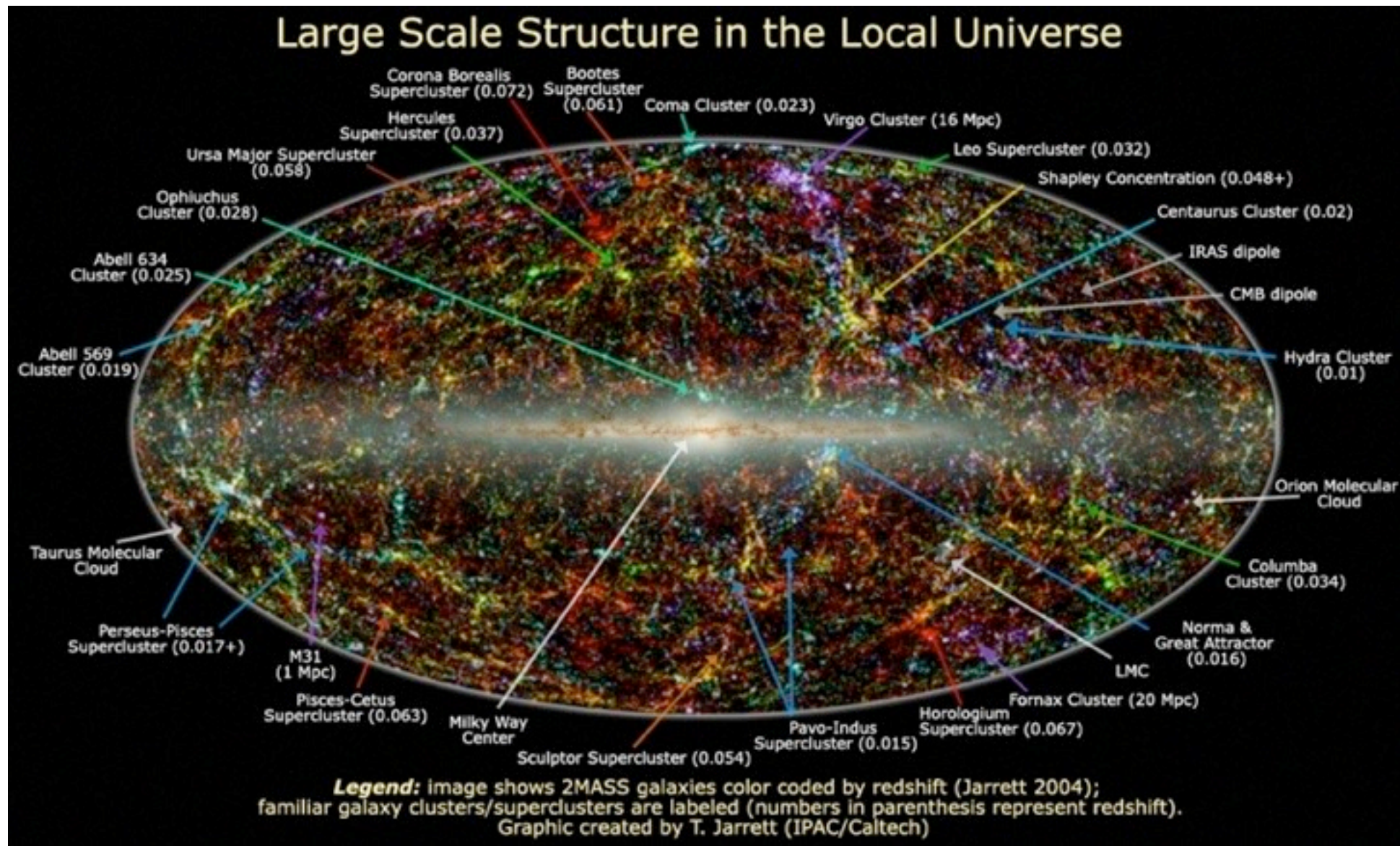
Hubble Deep Field (www.nasa.gov)

Cerca de 30.000 galáxias aqui

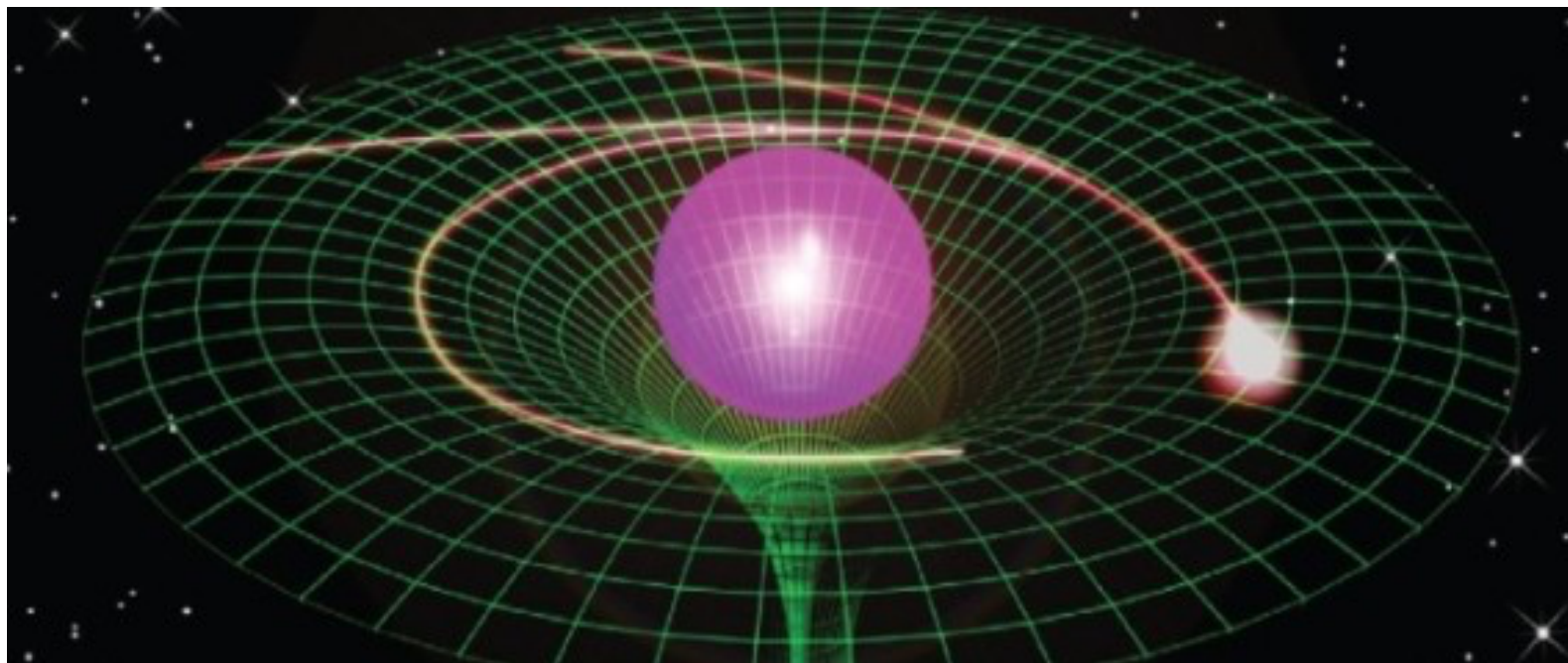
100 bilhões em todo o céu



Uma visão do Universo no séc. XXI



O arcabouço teórico

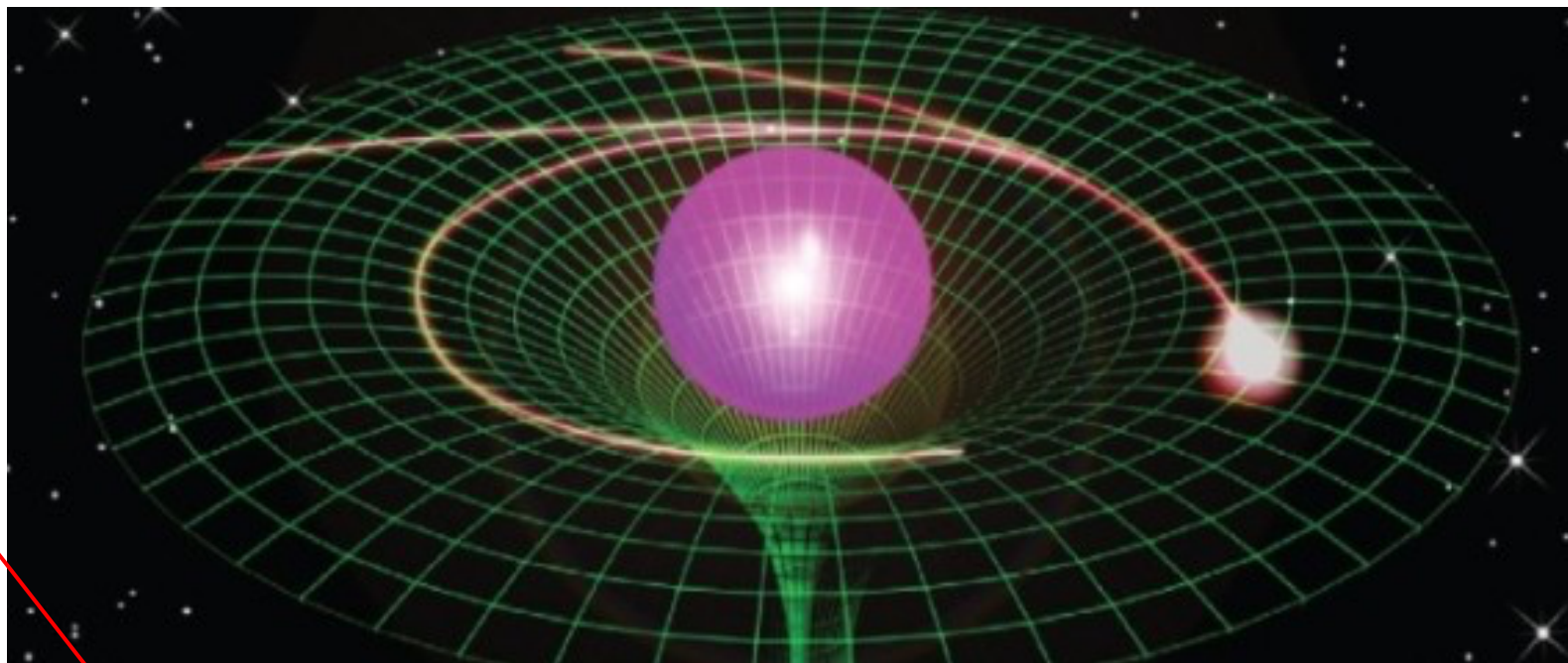


- Relações que descrevem a distância ds entre dois pontos no espaço são chamadas de métricas – um Universo homogêneo e isotrópico deve obedecer à chamada métrica de Robertson-Walker

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \text{sen}^2 \theta d\phi^2 \right]$$

O arcabouço teórico

Fator de escala,
define a expansão
do Universo



- Relações que descrevem a distância ds entre dois pontos no espaço são chamadas de métricas – um Universo homogêneo e isotrópico deve obedecer à chamada métrica de Robertson-Walker

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \text{sen}^2 \theta d\phi^2 \right]$$

O arcabouço teórico



Fator de escala,
define a expansão
do Universo

- Relações que descrevem a distância ds entre dois pontos no espaço são chamadas de métricas – um Universo homogêneo e isotrópico deve obedecer à chamada métrica de Robertson-Walker

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \text{sen}^2 \theta d\phi^2 \right]$$

O arcabouço teórico

Qualquer semelhança com coordenadas esféricas “comuns” NÃO É mera coincidência



Fator de escala,
define a expansão
do Universo

- Relações que descrevem a distância ds entre dois pontos no espaço são chamadas de métricas – um Universo homogêneo e isotrópico deve obedecer à chamada métrica de Robertson-Walker

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \text{sen}^2 \theta d\phi^2 \right]$$



O arcabouço teórico

- ☑ Uma particularização das equações de Einstein leva às chamadas equações de Friedmann-Lemaitre

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



Equações de Friedmann-Lemaitre

$$\frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$



Equações de Friedmann-Lemaitre

ρ - densidade de matéria

p - pressão do fluido

Λ - constante cosmológica

G - constante gravitacional

a - fator de escala

c - velocidade da luz

$$\frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$



Equações de Friedmann-Lemaitre

Termo cinético, em que R é o fator de expansão do Universo (equivalente à energia cinética).

ρ - densidade de matéria

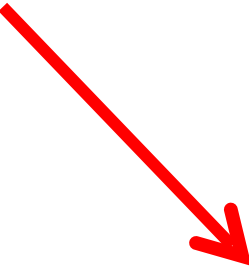
p - pressão do fluido

Λ - constante cosmológica

G - constante gravitacional

a - fator de escala

c - velocidade da luz


$$\frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$



Equações de Friedmann-Lemaitre

Termo cinético, em que R é o fator de expansão do Universo (equivalente à energia cinética).

ρ - densidade de matéria

p - pressão do fluido

Λ - constante cosmológica

G - constante gravitacional

a - fator de escala

c - velocidade da luz

Termo de fontes, descreve os causadores da mudança dinâmica do Universo (equivalente à energia potencial gravitacional).

$$\frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$



Equações de Friedmann-Lemaitre

Termo cinético, em que R é o fator de expansão do Universo (equivalente à energia cinética).

ρ - densidade de matéria

p - pressão do fluido

Λ - constante cosmológica

G - constante gravitacional

a - fator de escala

c - velocidade da luz

Termo de fontes, descreve os causadores da mudança dinâmica do Universo (equivalente à energia potencial gravitacional).

$$\frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

Termo dinâmico, envolve uma aceleração



Equações de Friedmann-Lemaitre

Termo cinético, em que R é o fator de expansão do Universo (equivalente à energia cinética).

ρ - densidade de matéria

p - pressão do fluido

Λ - constante cosmológica

G - constante gravitacional

a - fator de escala

c - velocidade da luz

Termo de fontes, descreve os causadores da mudança dinâmica do Universo (equivalente à energia potencial gravitacional).

$$\frac{\dot{a}^2 + kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G\rho + \Lambda c^2}{3}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

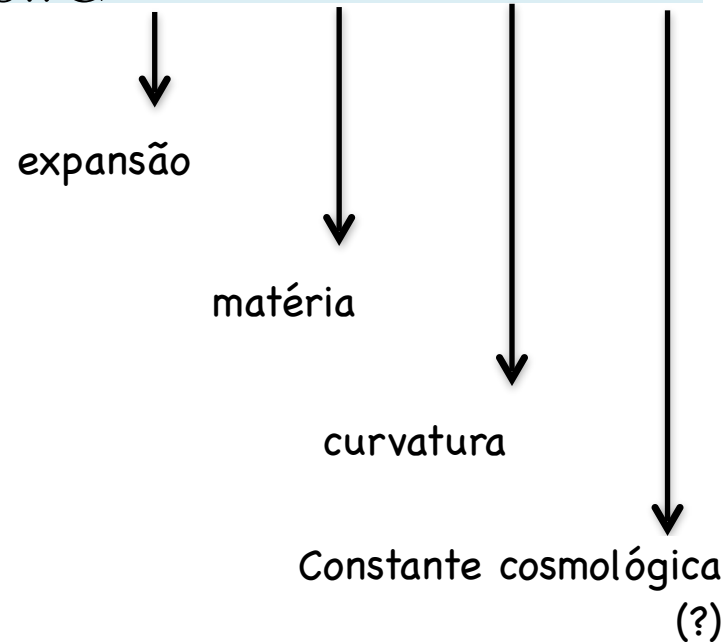
Termo dinâmico, envolve uma aceleração

Termo de fontes

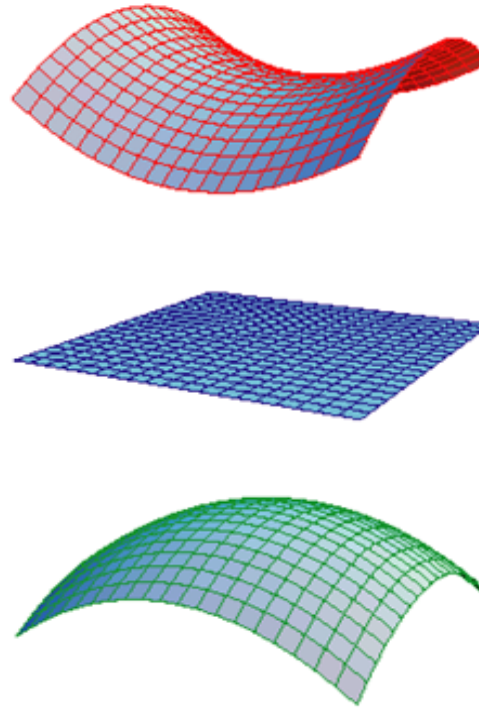
Evolução Cósmica

Relatividade Geral

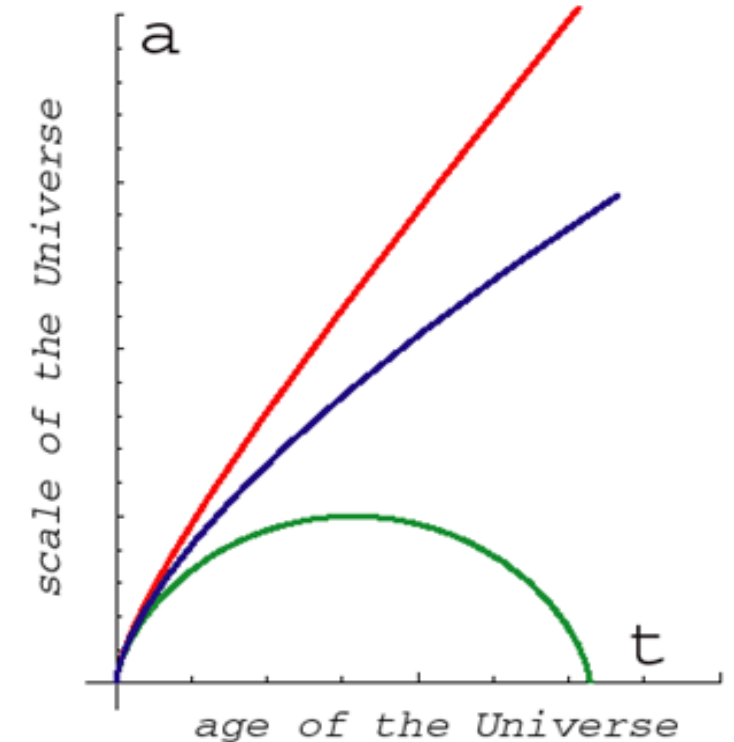
$$\frac{3c^2}{8\pi G} H^2 = \rho_m - \rho_k + \rho_\Lambda$$



Geometry



Cosmology






Considerações fundamentais...

- ☑ Do ponto de vista da cosmologia e da astrofísica, temos que lembrar o seguinte:
 - ✓ A taxa de expansão do Universo é importante!
 - ✓ Muito rápido: tempo insuficiente para o mecanismo de colapso gravitacional agir de forma eficiente
 - ✓ Muito lento: privilegia formação de buracos negros supermassivos e menos galáxias
 - ✓ Os valores das constantes físicas devem ser CONSTANTES MESMO!
 - h variável : a tabela periódica como a conhecemos precisaria ser revista
 - ✓ c variável: propagação de informação astronômica precisaria ser revisto
 - ✓ G variável: o conceito de movimento sob força central precisaria ser revisto

M. Livio, astro-ph:0301615 (2003), C. Lineweaver, astro-ph:0401024, A. Loeb, astro-ph:1606.08926v1 (2016)



Considerações fundamentais...

- ☑ Do ponto de vista da cosmologia e da astrofísica, temos que lembrar o seguinte:
 - ✓ Os elementos químicos necessários para a formação da vida estão disponíveis desde que o Universo tinha somente 150 – 180 milhões de anos (hoje tem quase 14 BILHÕES...)
 - ✓ Idade das estrelas “hospedeiras de vida” pode ser ~ idade do Sol, mas estrelas de $0,1 M_{\text{sol}}$, ricas em C e pobres em metal também são boas candidatas (CEMP stars)  possível existência de planetas de C, SiC, não de silicatos.

M. Livio, astro-ph:0301615 (2003), C. Lineweaver, astro-ph:0401024, A. Loeb, astro-ph:1606.08926v1 (2016)



O Universo jovem

- ☑ A RCFM permitiu que o Universo como um todo fosse uma “Zona Habitável” entre $100 < z < 137$, cerca de 10 – 17 milhões de anos após o BB
- ☑ Estrelas massivas com $L \approx 1,3 \times 10^{40}$ erg/s vivem por cerca de 3 milhões de anos, permitindo o primeiro enriquecimento químico do Universo
- ☑ **Se empurrarmos os limites da física conservadora....**
 - ✓ Desvios da condição gaussiana das perturbações iniciais ($8,5 \sigma$) podem ter permitido a formação de estrelas massivas, com produção de elementos pesados em um intervalo $\approx 6 \times 10^6$ anos (**idéia bastante ousada**)
 - ✓ Primeiros planetas rochosos podem ter se formado $\approx 20 \times 10^6$ anos (**idem**)

A. Loeb, astro-ph:1606.08926v1 (2016)

Carlos Alexandre Wuensche (2022)



Probabilidade relativa do aparecimento de vida em função do tempo cósmico

- ☑ A probabilidade de existência de planetas habitáveis no passado e no futuro distante deve ser considerada
- ☑ Variáveis: história da formação estelar no Universo, função de massa estelar, tempo de vida estelar em função de sua massa, probabilidade de existência de planetas terrestres na zona habitável
- ☑ Probabilidade definida para um volume co-móvel com número fixo de bárions
- ☑ Probabilidade futura: extrapolação da taxa de formação estelar até a depleção completa do reservatório de gás



Equação de Probabilidade

$$\frac{dP}{dt}(t) = \frac{1}{N} \int_0^t dt' \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} dm' \xi(m') \dot{\rho}_*(t', m') \eta_{\text{Earth}}(m') p(\text{life}|\text{HZ}) g(t - t', m'),$$

- $g(t - t', m')$: window function
- $\xi(m')$: distribuição de massas estelares
- $\rho_*(t', m')$: taxa de formação estelar
- $\eta_{\text{Earth}}(m')$: probabilidade de formar planetas rochosos na ZH
- $P(\text{life} | \text{Hz})$: probabilidade de existência de vida na zona habitável, de fato
- N: fator de normalização
- Massas no intervalo viável de estrelas hospedeiras para planetas na ZH ($0,1 - 2 M_{\text{sol}}$)
- Probabilidade do aparecimento da vida, como a conhecemos, em um planeta habitável por unidade de tempo dentro de um volume co-móvel do Universo



Os parâmetros

Função de massa de Chabrier

$$\xi(m) \propto \begin{cases} \left(\frac{m}{M_{\odot}}\right)^{-2.3} & m > 1 M_{\odot} \\ a \exp\left(-\frac{\ln(m/m_c)^2}{2\sigma^2}\right) \frac{M_{\odot}}{m} & m \leq 1 M_{\odot} \end{cases}$$

$$a = 790, \sigma = 0.69, \text{ and } m_c = 0.08M_{\odot}$$

Tempo de vida estelar

$$3 \times 10^7 < t < 1 \times 10^{13} \text{ anos}$$

$$\tau_{*}(m) = \begin{cases} 1.0 \times 10^{10} \text{ yr} \left(\frac{m}{M_{\odot}}\right)^{-2.5} & 0.75M_{\odot} < m < 3M_{\odot} \\ 7.6 \times 10^9 \text{ yr} \left(\frac{m}{M_{\odot}}\right)^{-3.5} & 0.25M_{\odot} < m \leq 0.75M_{\odot} \\ 5.3 \times 10^{10} \text{ yr} \left(\frac{m}{M_{\odot}}\right)^{-2.1} & 0.08M_{\odot} \leq m \leq 0.25M_{\odot} \end{cases}$$



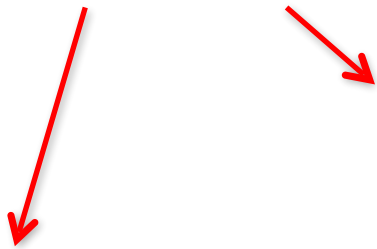
Os parâmetros

Taxa de formação estelar

$$\dot{\rho}_*(z) = 0.015 \frac{(1+z)^{2.7}}{1 + [(1+z)/2.9]^{5.6}} M_{\odot} \text{yr}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$$

Probabilidade de existência de vida na Zona Habitável

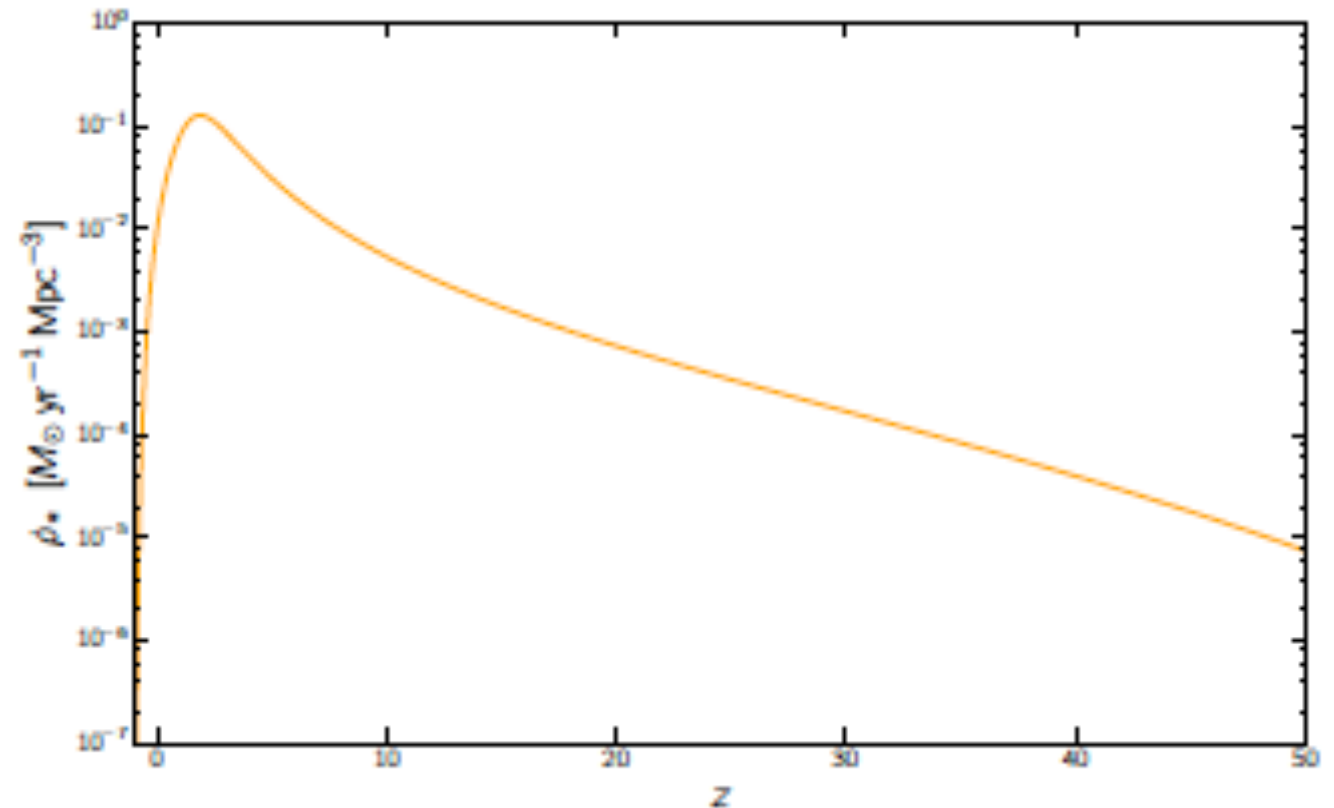
$P(\eta, \text{HZ})$

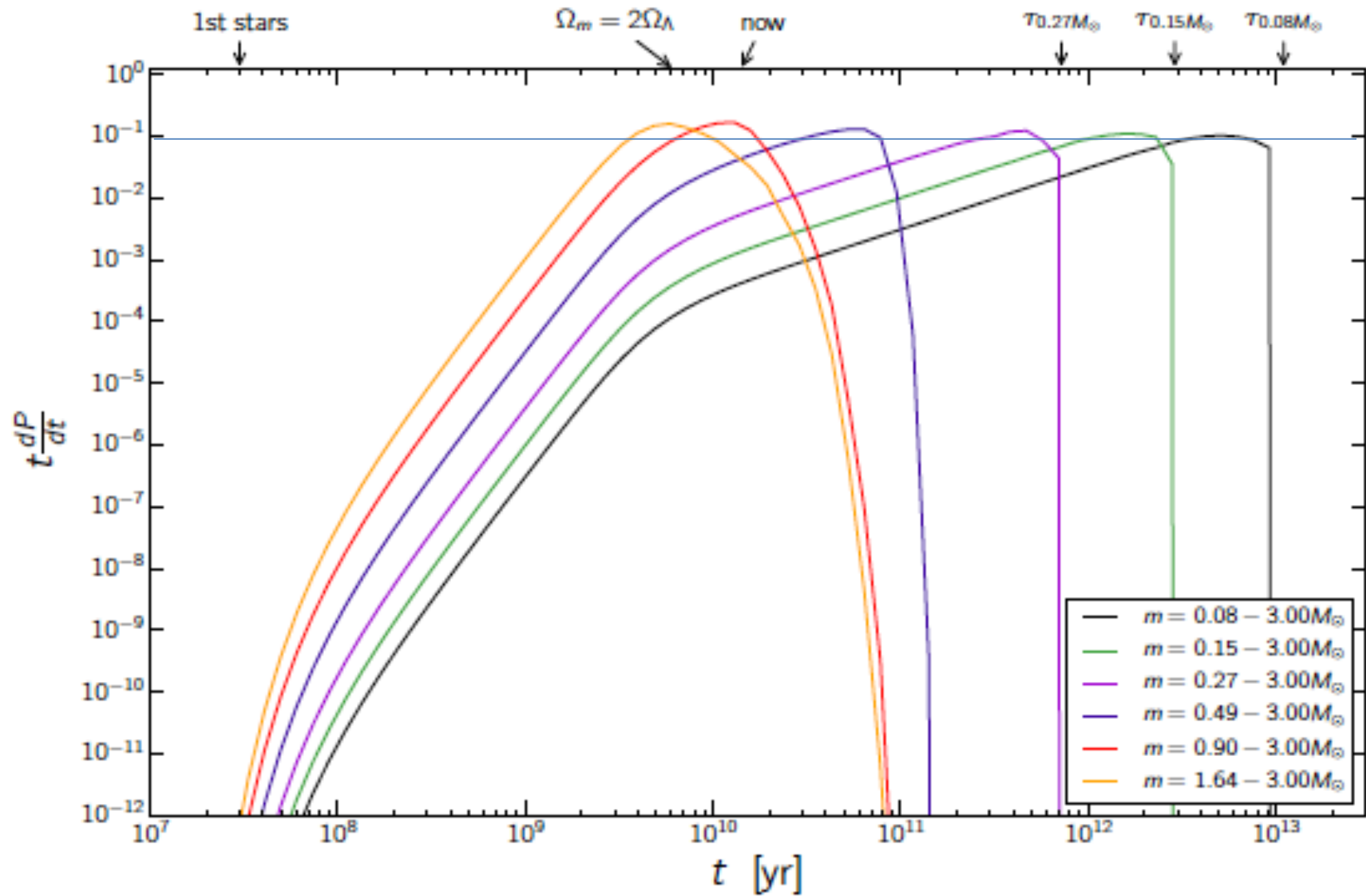


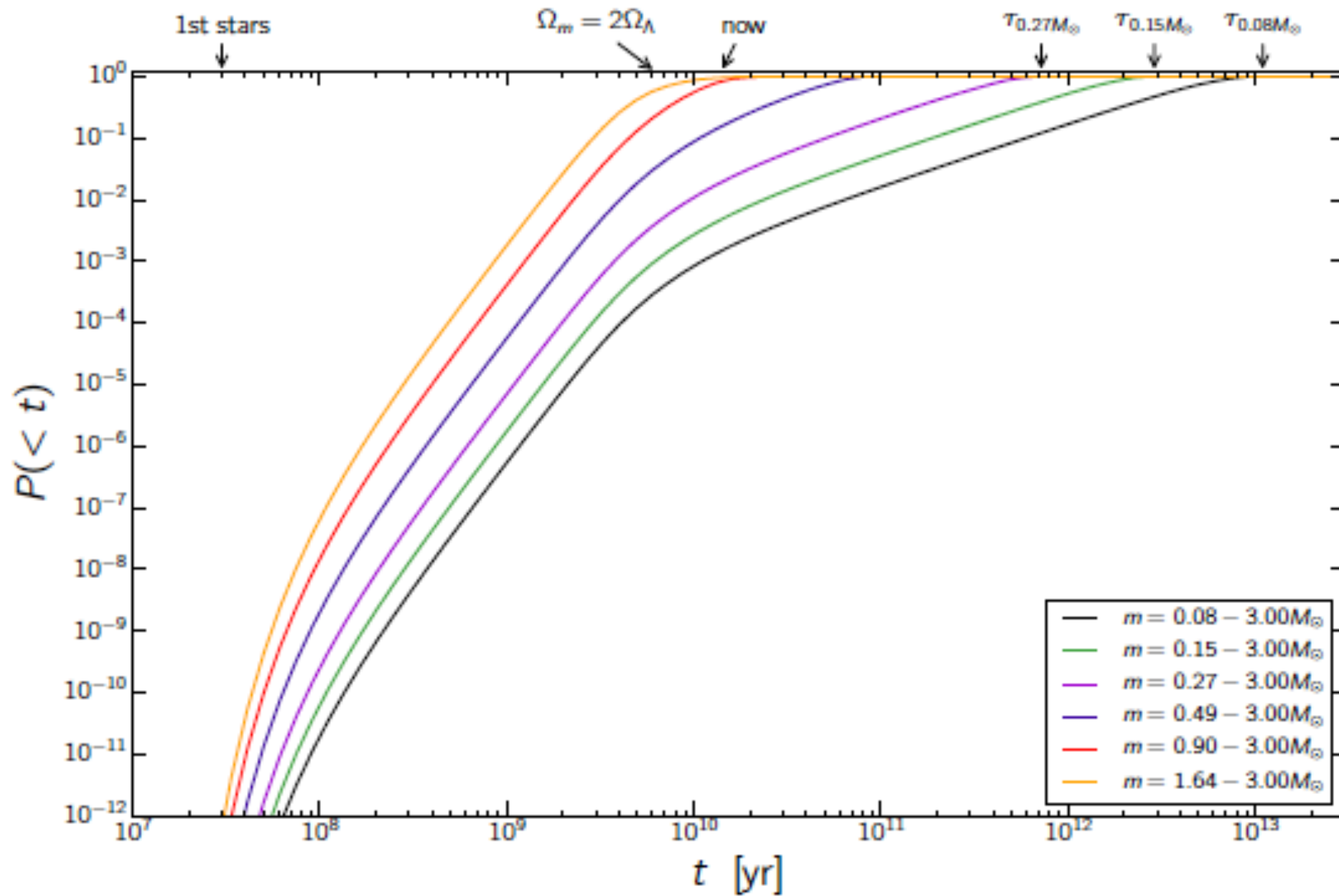
?????

$6.4^{+3.4}_{-1.1} \% (1 M_{\text{sol}})$

$24^{+18}_{-8} \% (\text{Anã M} - 0,08 M_{\text{sol}})$









Habitabilidade

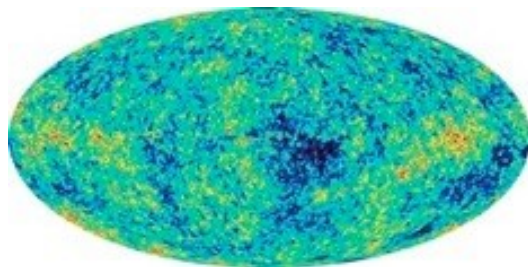
- ☑ Condições para o surgimento da vida: desenvolvimento da complexidade
 - ✓ química complexa
 - ✓ longos períodos de tempo
 - ✓ massa prebiótica crítica.
- ☑ Condições de sobrevivência a catástrofes de origem geológica ou astronômica.



A busca astronômica das origens

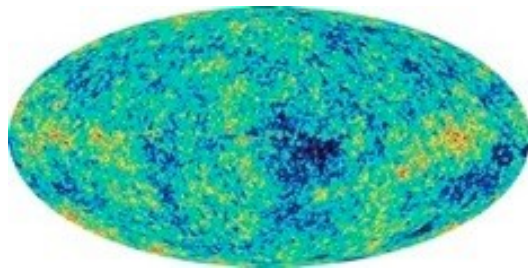


A busca astronômica das origens



Big Bang

A busca astronômica das origens



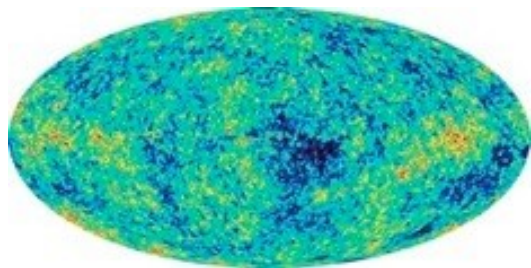
Big Bang



Primeiras galáxias
se formam



A busca astronômica das origens



Big Bang



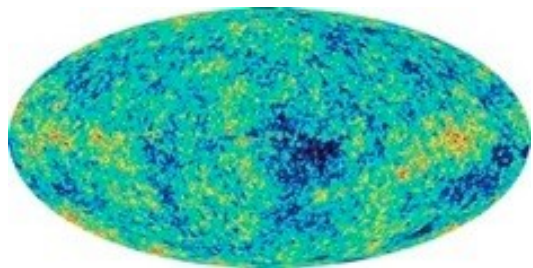
Primeiras galáxias se formam



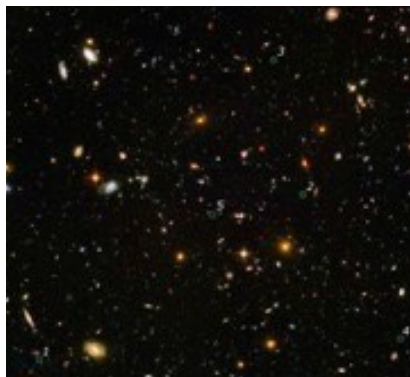
Estrelas se formam



A busca astronômica das origens



Big Bang



Primeiras galáxias se formam

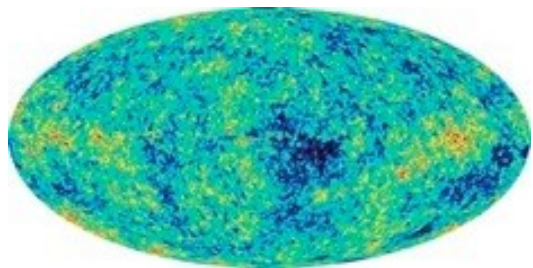


Estrelas se formam



Galáxias evoluem

A busca astronômica das origens



Big Bang



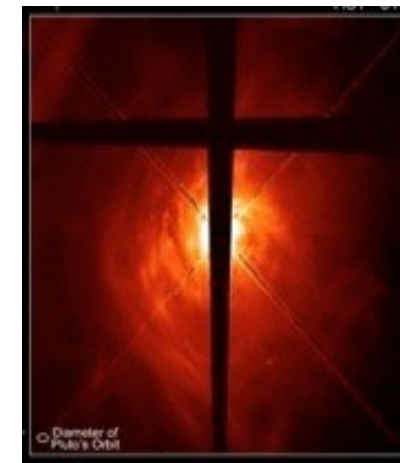
Primeiras galáxias se formam



Estrelas se formam

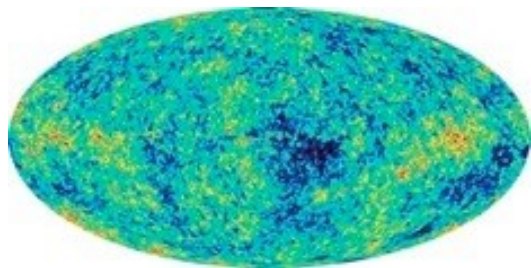


Galáxias evoluem



Planetas se formam

A busca astronômica das origens

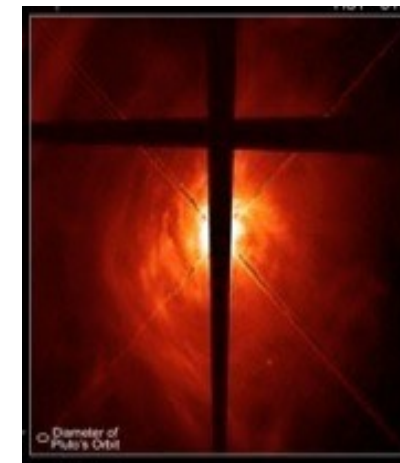


Big Bang

Planetas hoje



Planetas se formam



Primeiras galáxias se formam



Estrelas se formam



Galáxias evoluem

VIDA



Carlos Alexandre⁷ Wuensche (2022)

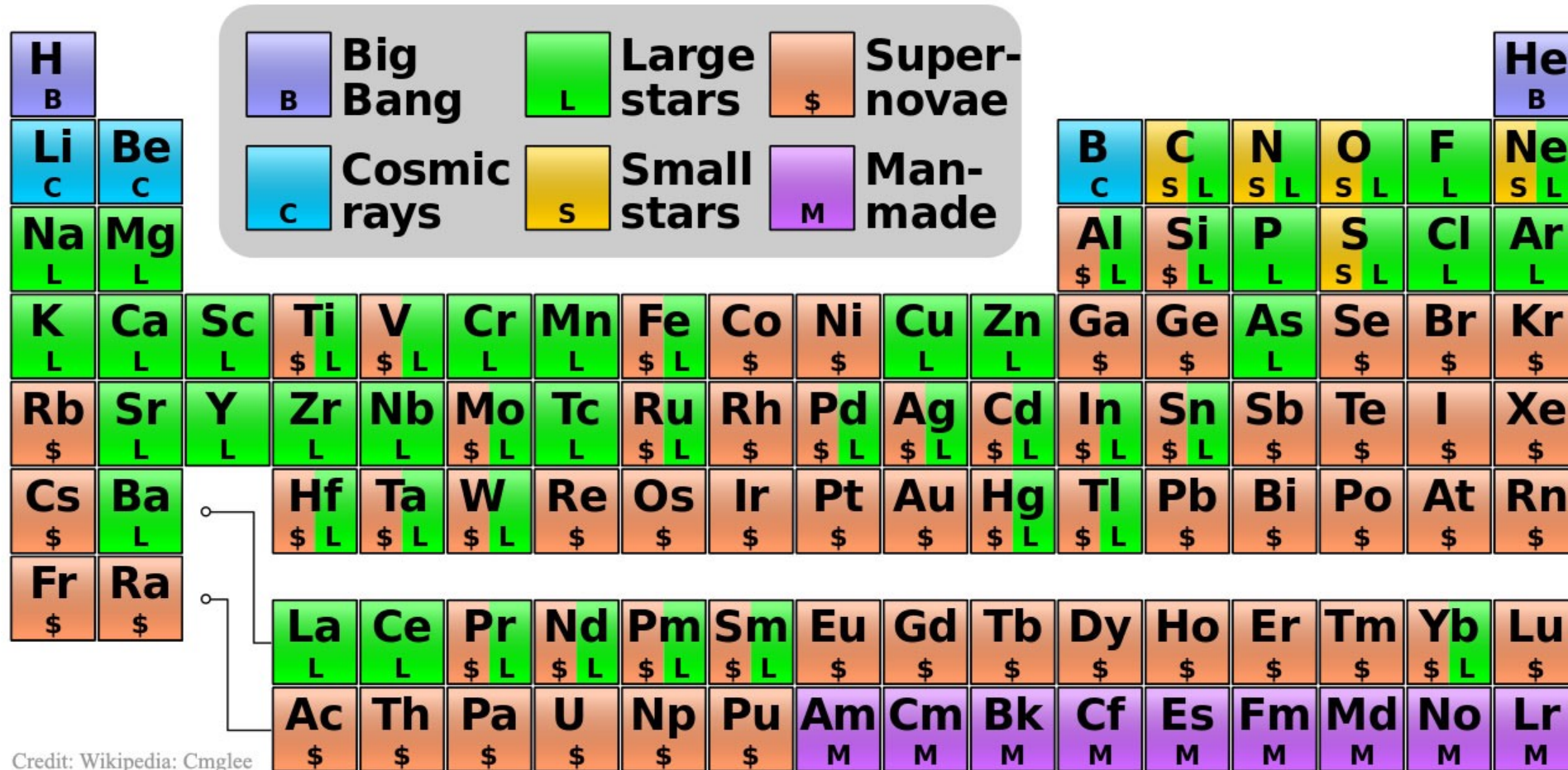
VIDA

Não necessariamente inteligente...





A origem da Tabela Periódica



Credit: Wikipedia: Cmglee



The Astronomer's Periodic Table

(Ben McCall)



□
Mg

□
C

□
N

□
O

□
Ne

·
Si

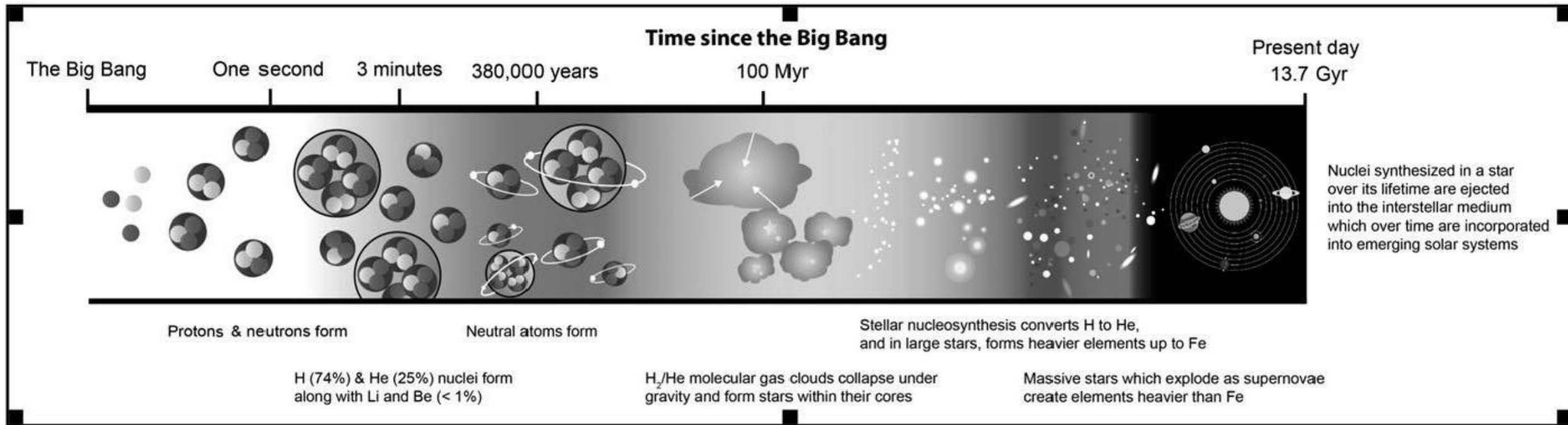
·
S

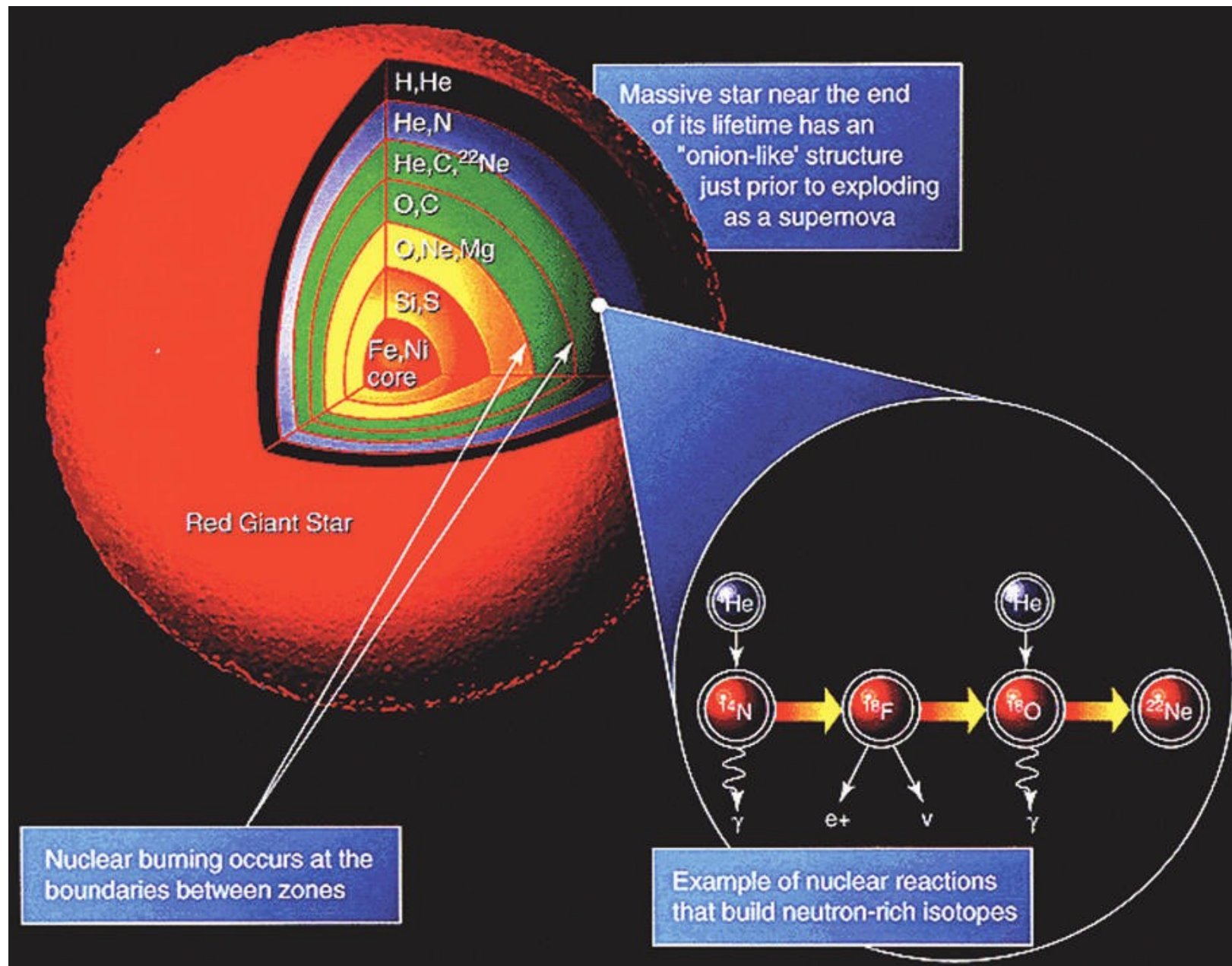
·
Ar

□
Fe

Courtesy Ben Mc Call

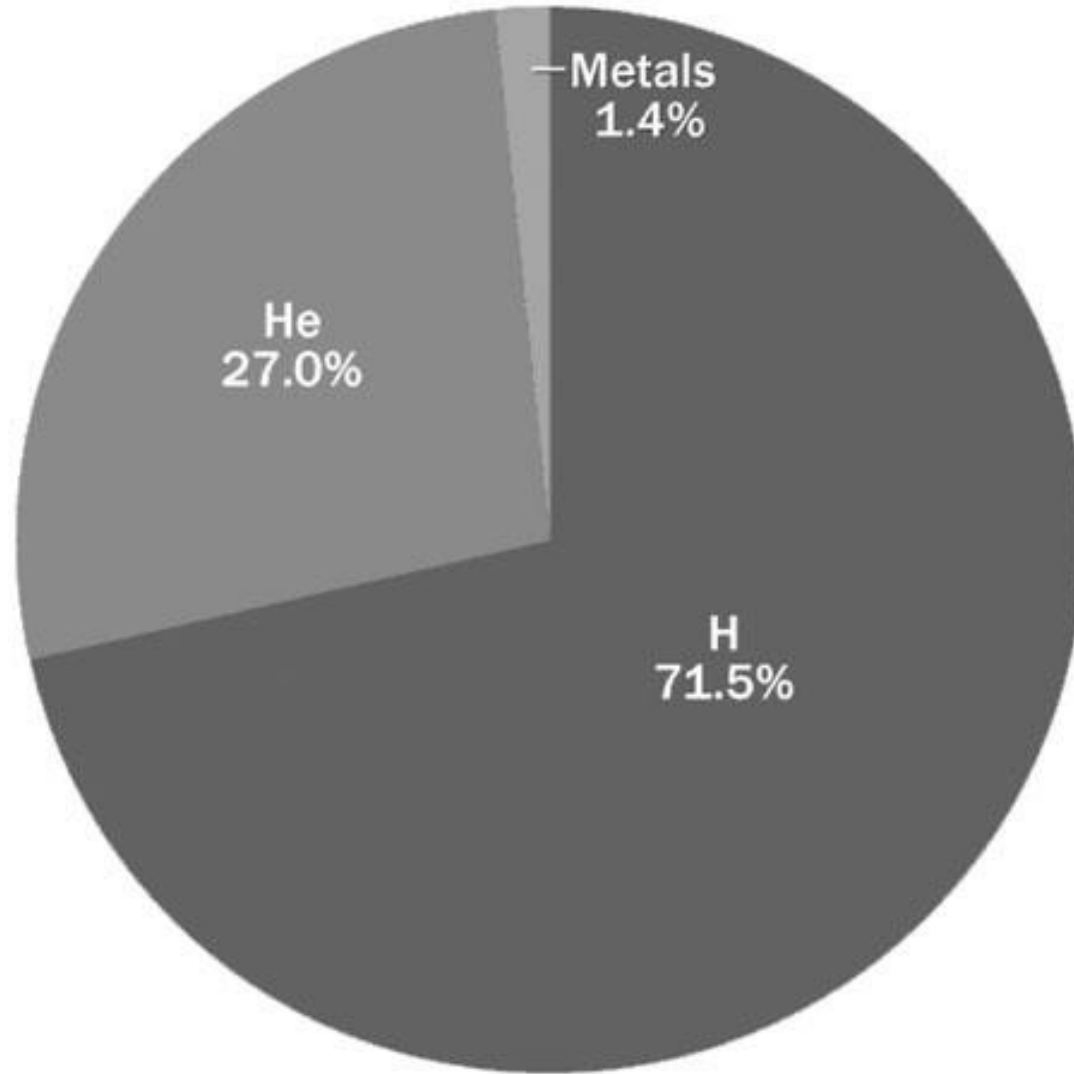
A cronologia do enriquecimento químico do Universo



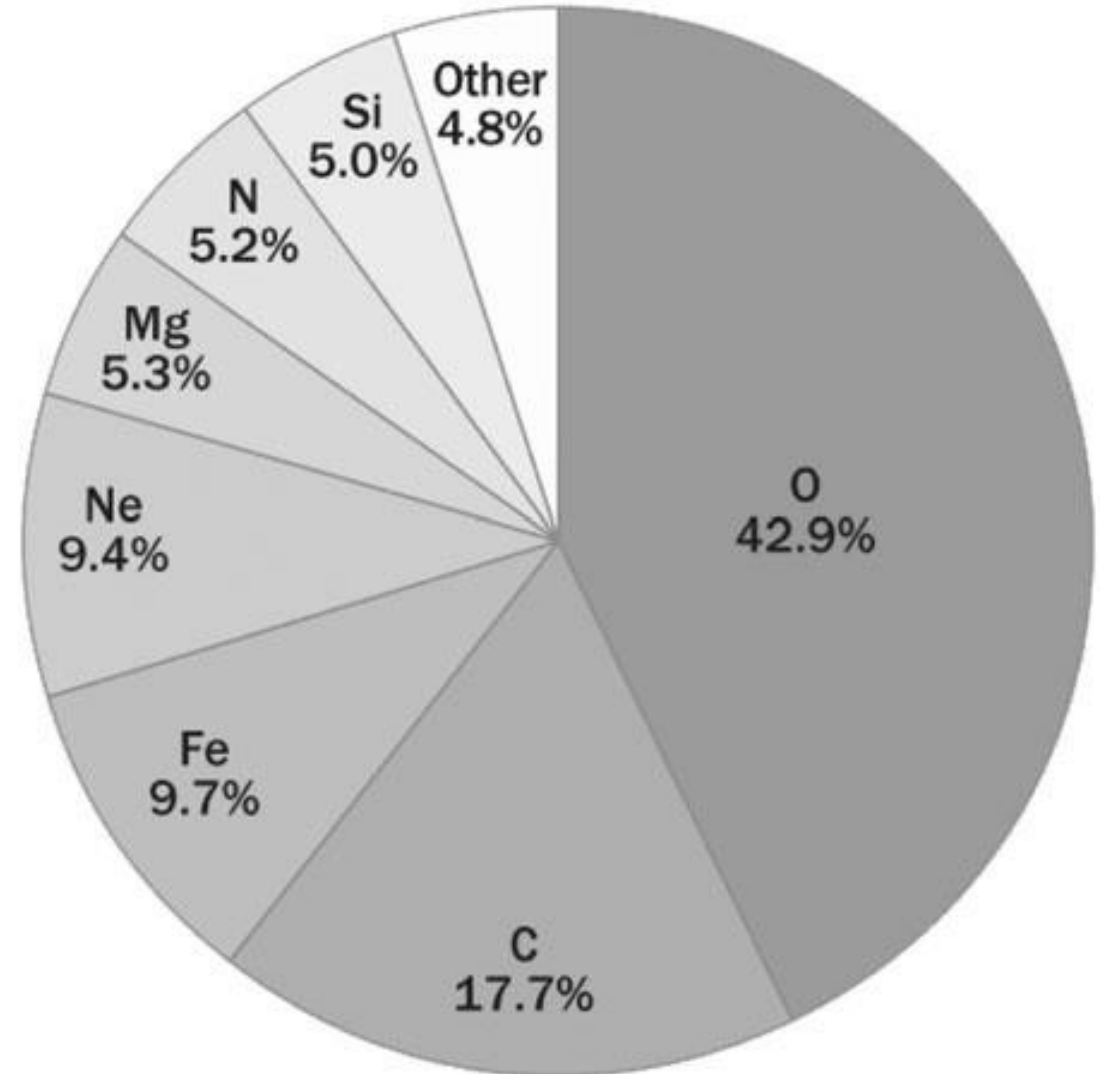




Total solar composition

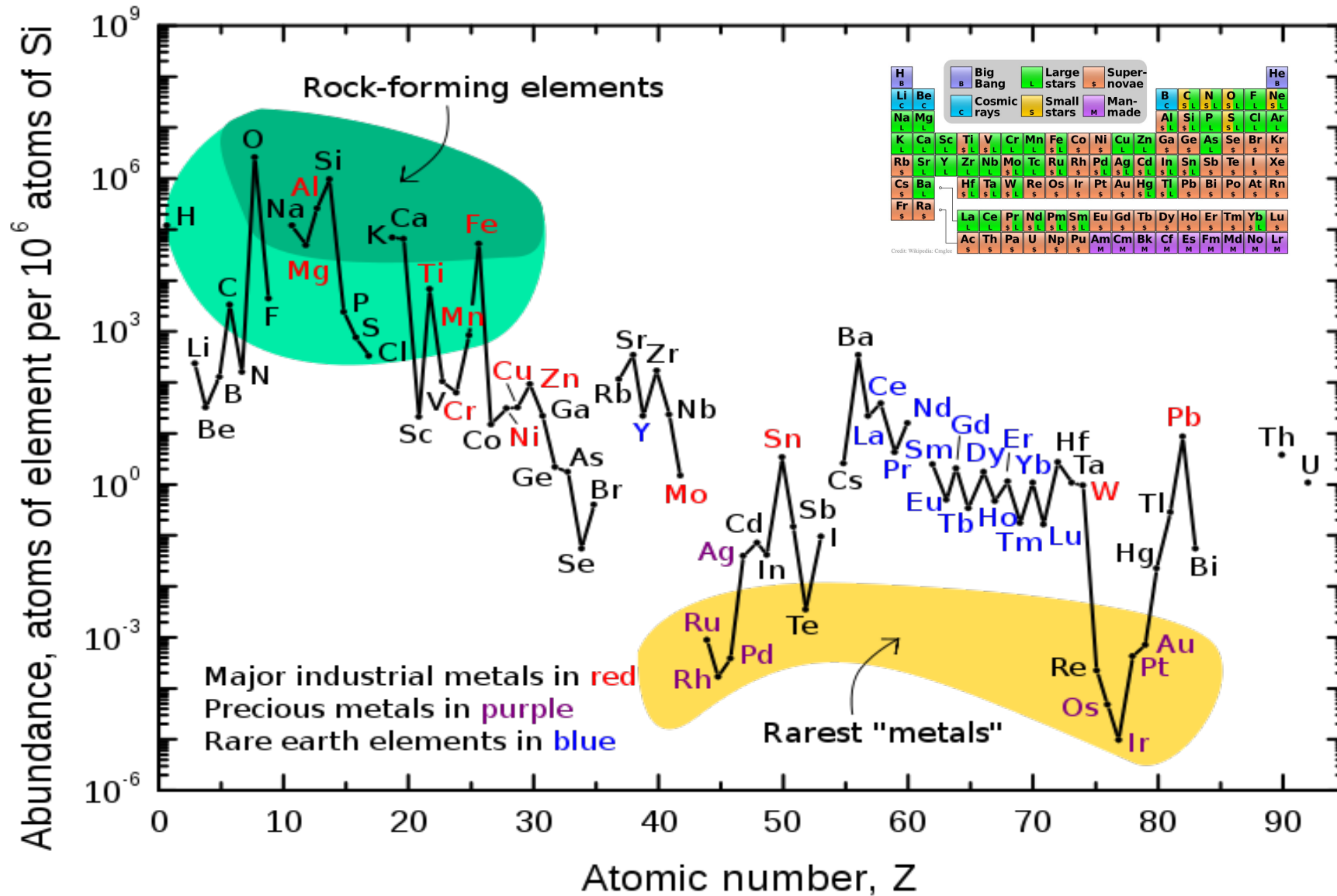


Metal composition



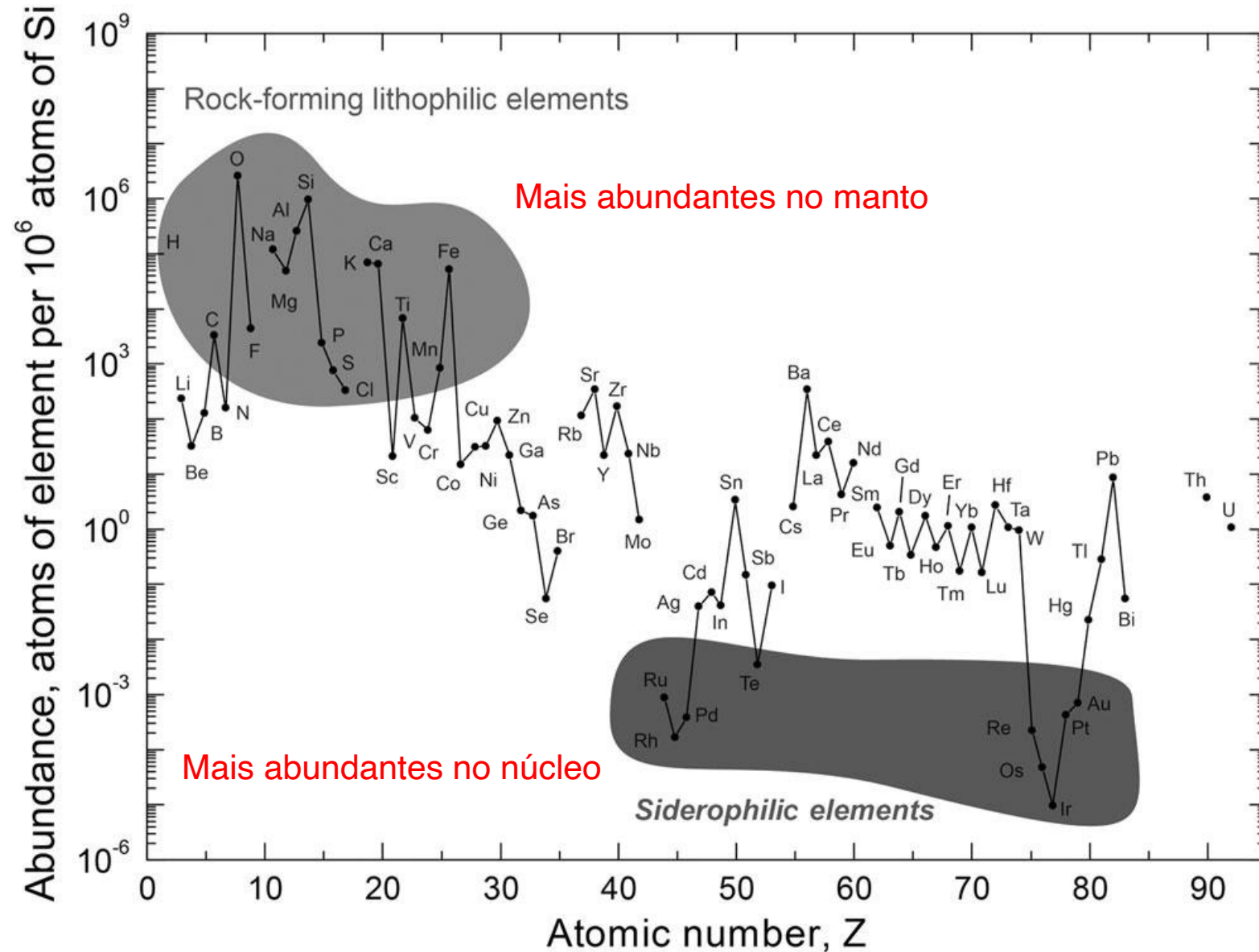


Abundâncias dos Elementos na Crosta Terrestre

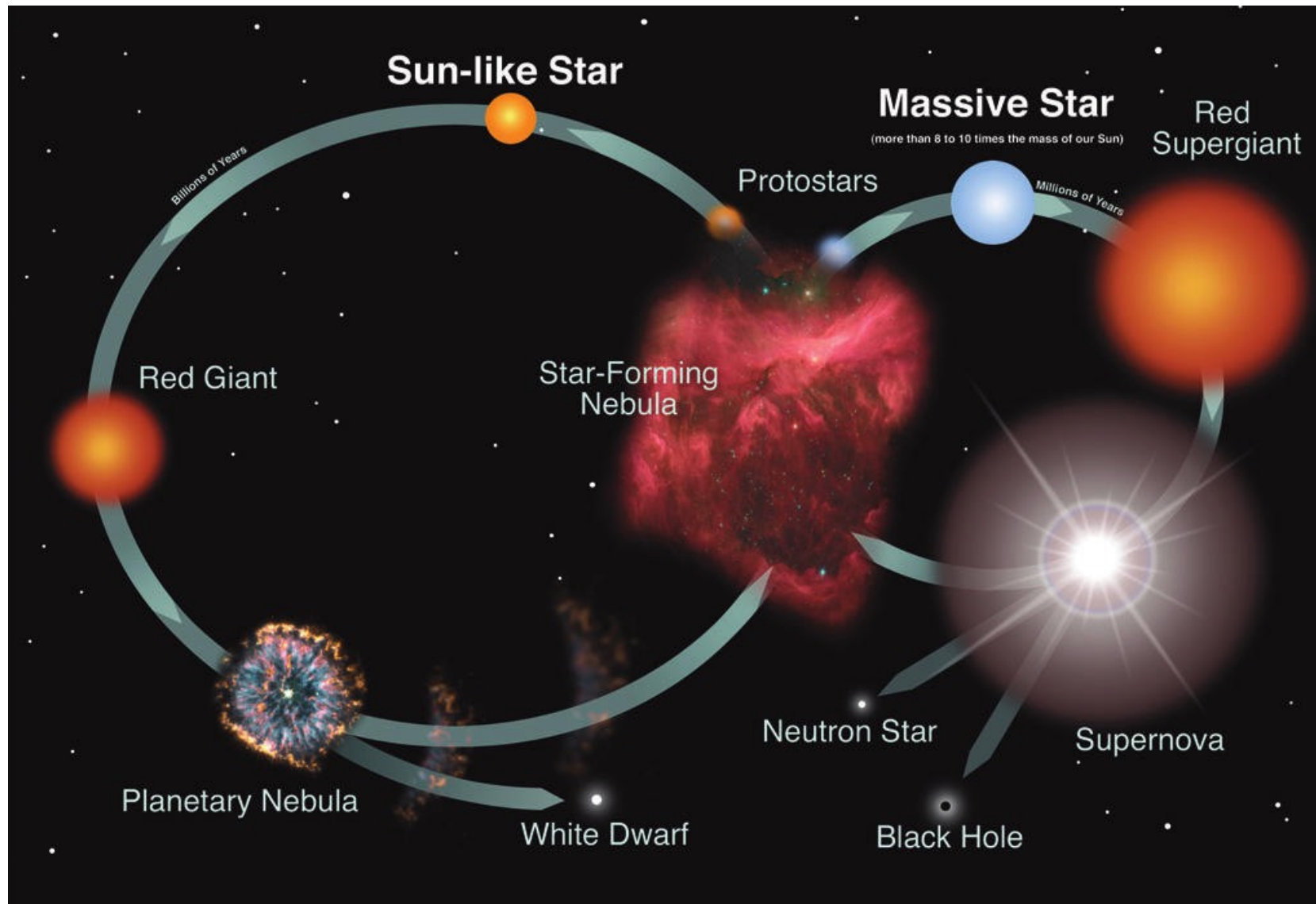




Abundâncias dos Elementos na Crosta Terrestre

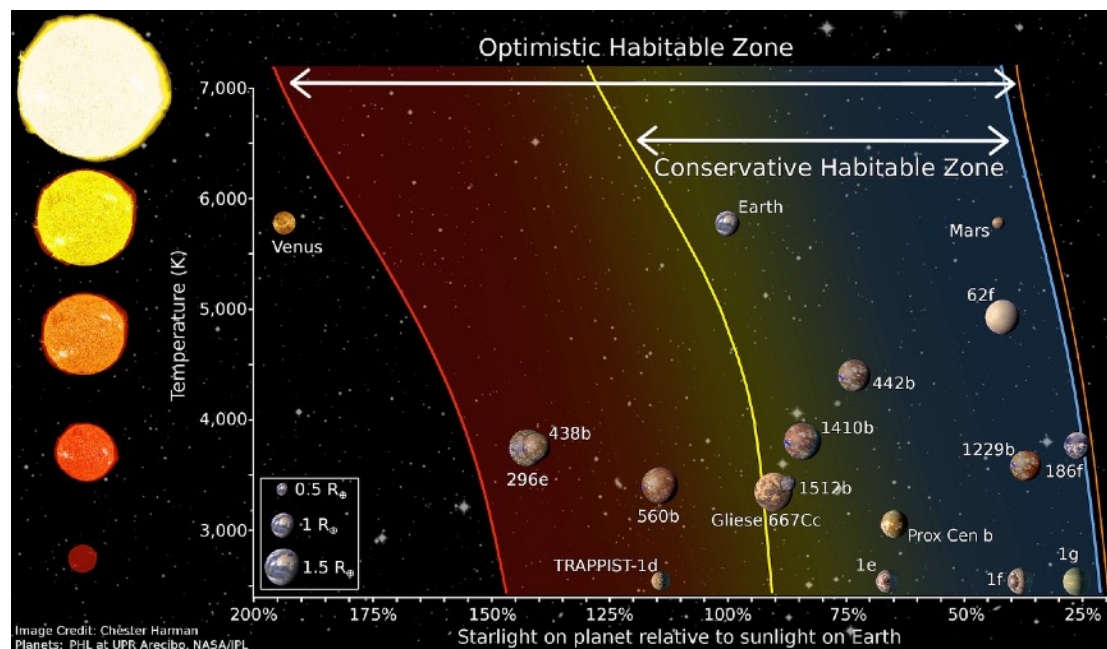


O ciclo de vida estelar



Três níveis de habitabilidade

- ☑ Cosmos biofílico
- ☑ Zona habitável Galáctica
- ☑ Zona habitável estelar



A região ideal (“GOLDILOCK’S ZONE”)

- ☑ No nível mais básico (planetário)
 - ✓ Sistemas planetários: a zona habitável estelar
- ☑ No nível intermediário (galáxias)
 - ✓ Galáxias como um abrigo para a vida: a zona habitável Galáctica

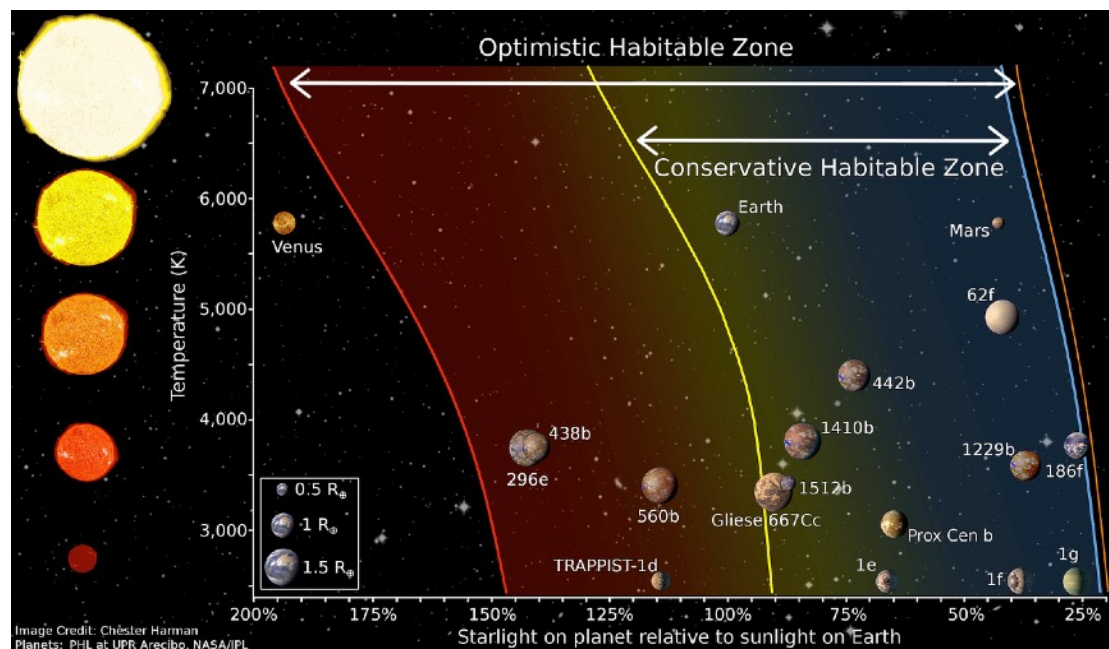
Três níveis de habitabilidade

- ☑ Cosmos biofílico
- ☑ Zona habitável Galáctica
- ☑ Zona habitável estelar

Galaxies são laboratórios de química complexa

A região ideal (“GOLDILOCK’S ZONE”)

- ☑ No nível mais básico (planetário)
 - ✓ Sistemas planetários: a zona habitável estelar
- ☑ No nível intermediário (galáxias)
 - ✓ Galáxias como um abrigo para a vida: a zona habitável Galáctica





Formação de Galáxias → Habitabilidade

- ☑ Galáxias são “células” naturais, das 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



Formação de Galáxias → Habitabilidade

- ☑ Evolução galáctica em seus primórdios
 - ✓ Formação estelar → poeira e moléculas → química complexa
- ☑ CNO sintetizados por estrelas do tipo popIII no Universo jovem permitiram o aparecimento dos “tijolos” da química orgânica a partir de ~ 100 milhões de anos (o satélite Planck estima que a época da reionização começa em 180 milhões de anos)
- ☑ Desenvolvimento de complexidade química → VIDA (?!?!?!?!)



Considerações sobre habitabilidade galáctica

- ☑ Que tipo de ambiente é adequado? Em que intervalo de tempo?
- ☑ As condições iniciais no Universo, nas galáxias e nos processos de evolução estelar espalharam os tijolos necessários para a formação da vida como a conhecemos
- ☑ Quão amigável deve ser o ambiente galáctico para abrigar a formação e evolução da vida?
- ☑ Uma vez formados, planetas parecem evoluir de forma “tranquila”, mas o mesmo não vale para as formas de vida que conhecemos

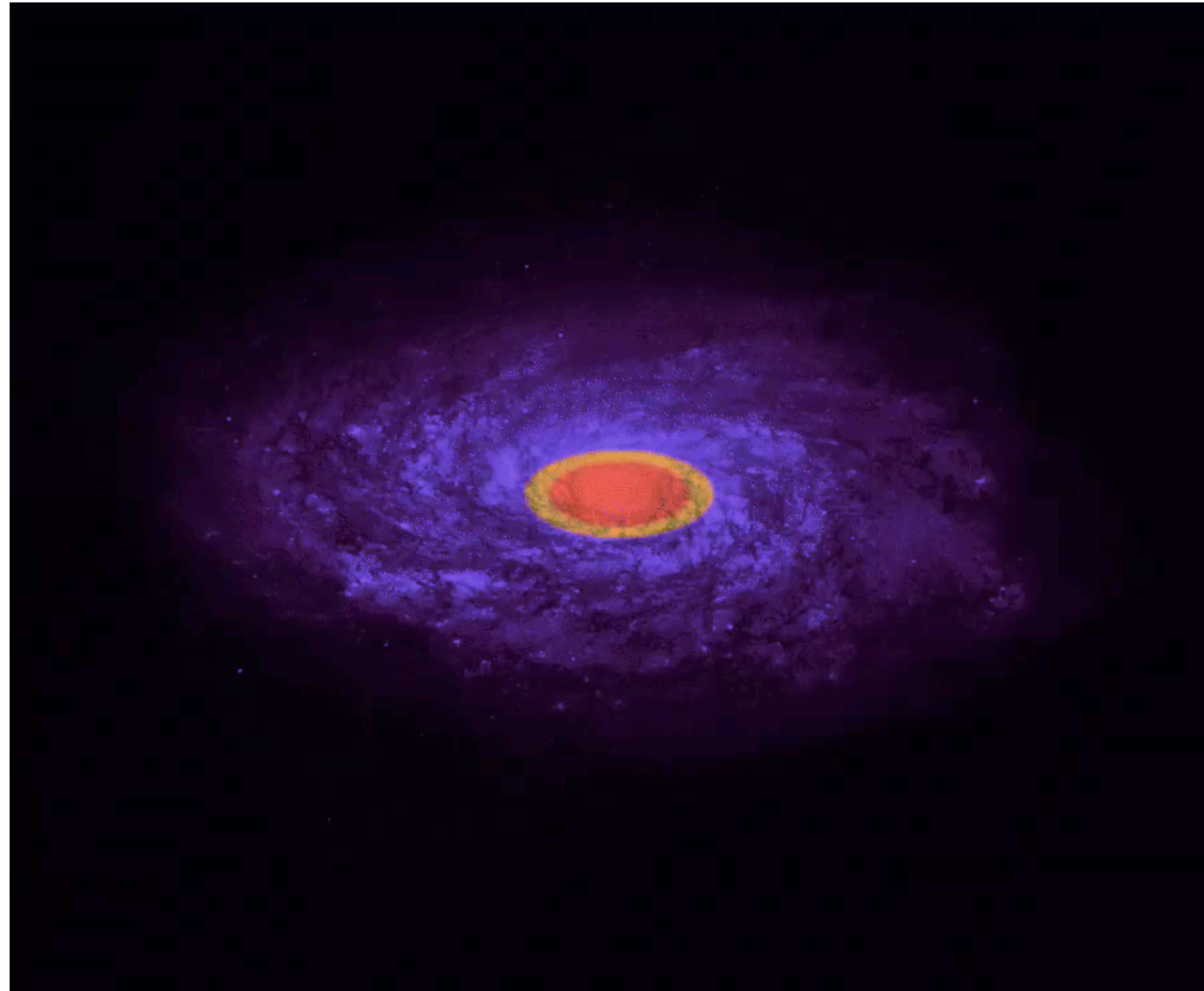


Considerações sobre habitabilidade galáctica

- ✓ Tempo de vida estelar típico
 - ✓ $4,5 \times 10^9$ anos $< t < 13 \times 10^9$ anos
 - ✓ (entrada da \star na SP $< t < \text{exaustão do combustível nuclear}$)
- ✓ Metalicidade: Fe $\sim 1\%$ da abundância H
- ✓ Ausência de explosões de supernovas
- ✓ Estimativa: $\leq 10\%$ das estrelas da Galáxia estão na “Zona Habitável”.

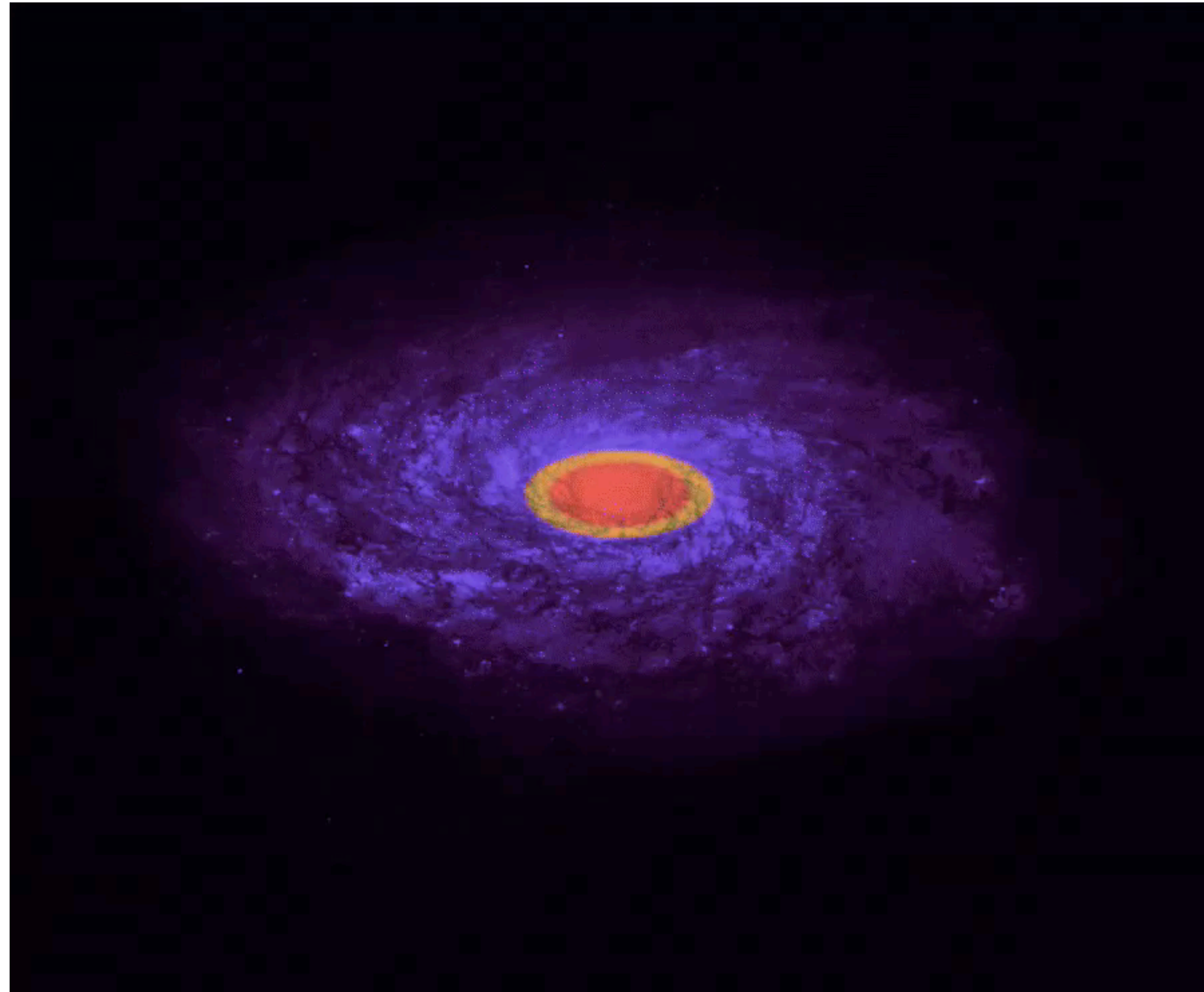


Existe uma Zona Habitável Galáctica?





Existe uma Zona Habitável Galáctica?





A Zona Habitável Galáctica

☑ Definida por P_{GHZ}

$$P_{GHZ} = P_{SFR} + P_{\text{metais}} + P_{\text{evol}} + P_{SN}$$

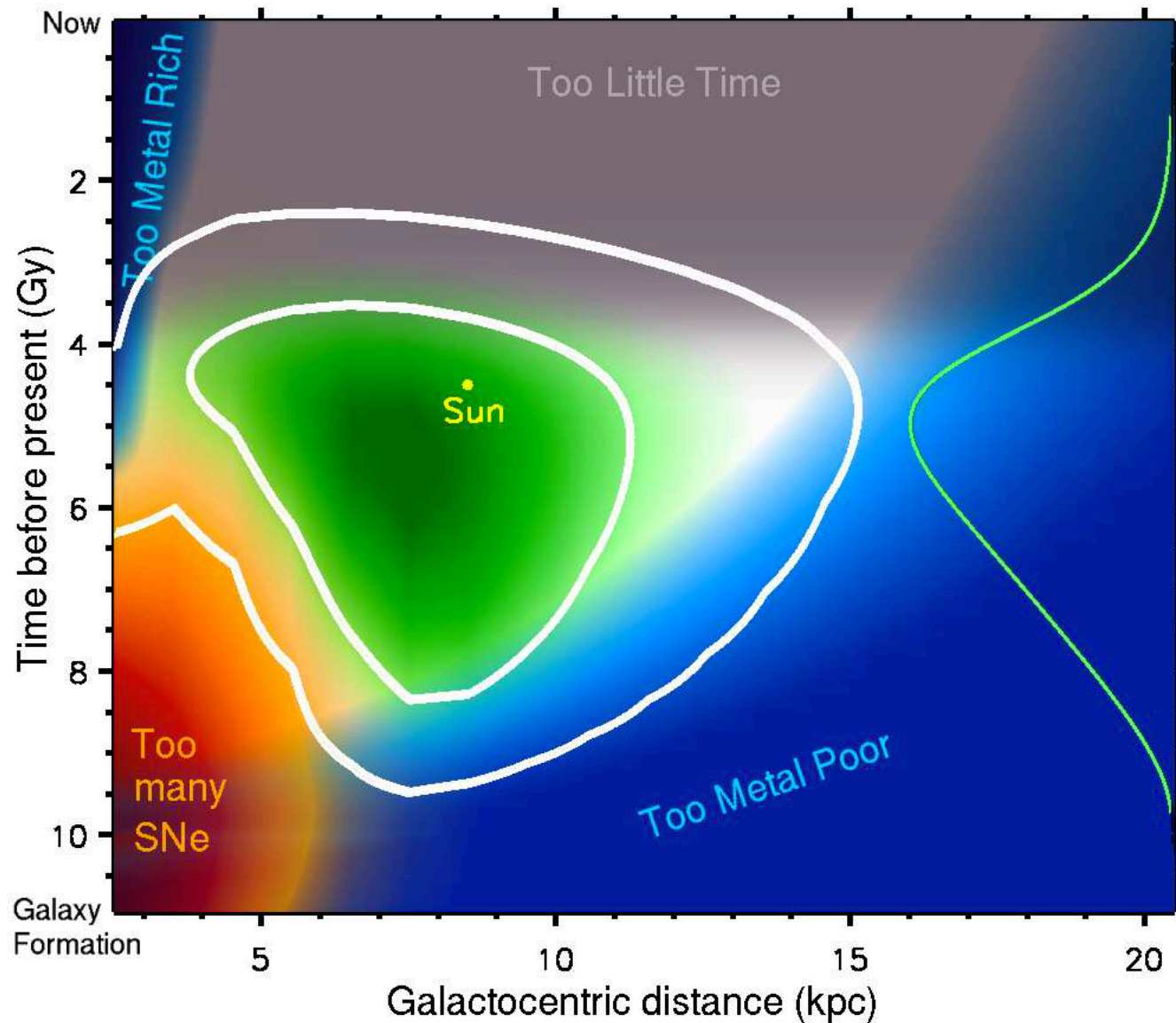
- ✓ Proporcional à taxa de formação estelar SFR
- ✓ Condições para formar planetas rochosos (grande produção de metais)
- ✓ Tempo de evolução biológico “grande” ($\sim 10^9$ anos)
- ✓ Sobrevivência a eventos galácticos extremos (e.g., explosões de SN).

Região no espaço que tem metalicidade suficiente para formar planetas terrestres sem estar sujeita a radiação nociva nem a eventos catastróficos frequentes



A Zona Habitável Galáctica

- ☑ Caso “centrado” na Terra, também definido por P_{GHZ}
 - ✓ P_{metais} : $-1,0 < Z_{\text{DE}} < 3,0$
 - ✓ P_{evol} : $t_{\text{evol}} = 4 \times 10^9$ anos
 - ✓ P_{SN} : $t_{\text{SN}} = 4 \times 10^9$ anos, $P_{\text{SN}}(2 N_{\text{sol}}) = 0,5$
 - ✓ Normalizado para o Sol ($r = 8$ kpc, $t = 13 \times 10^9$ anos)



Ref: Lineweaver, Fenner & Gibson, Science (2004)

68% da origem das estrelas com grande potencial de hospedar vida complexa **HOJE** (a maior parte das estrelas adequadas para hospedar a vida é mais velha que o Sol)

Probabilidade de distribuição de vida complexa, **considerando que o tempo de aparecimento da vida é da ordem**

de 4 +/- 1 Gano

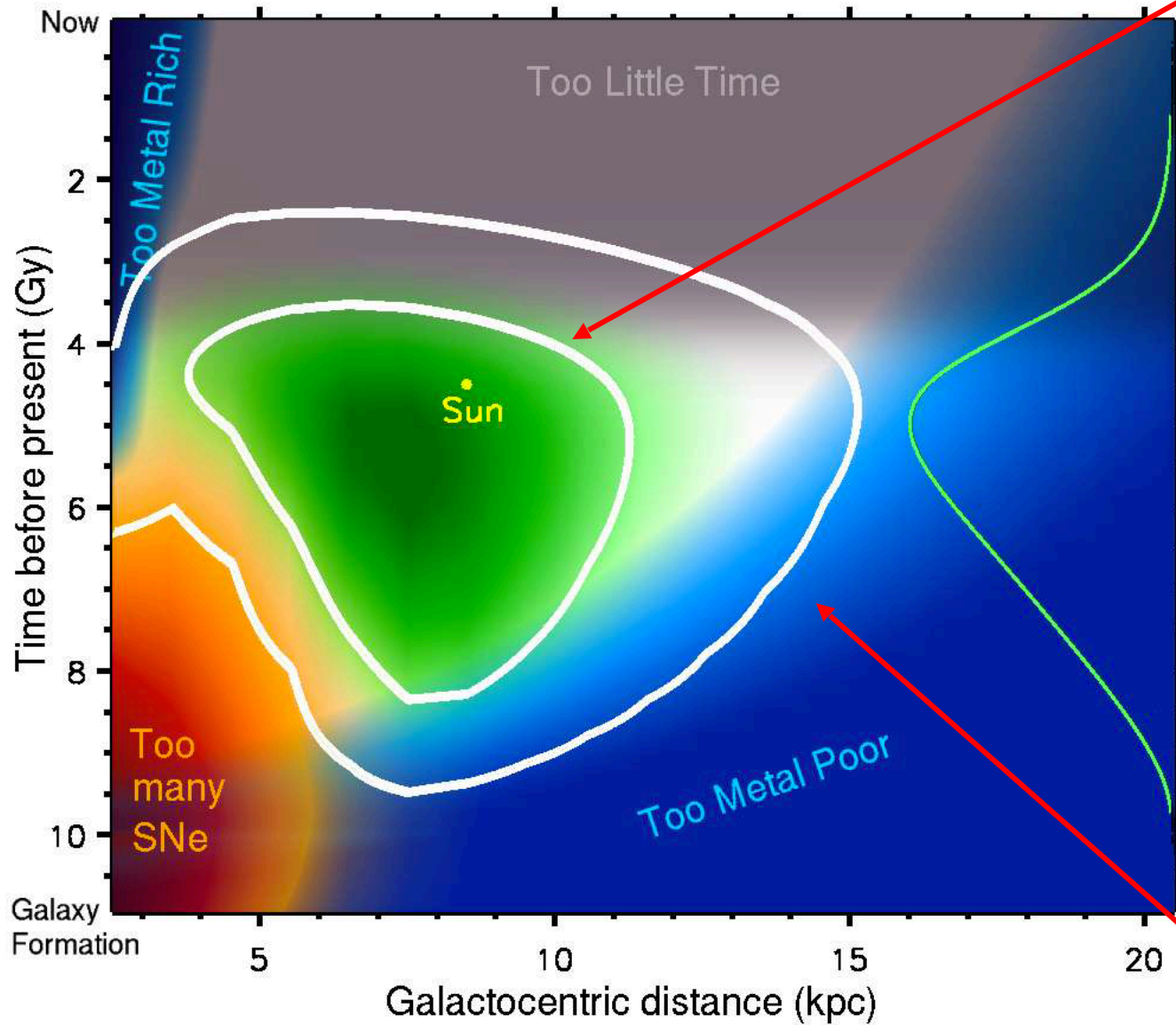
$$P_{ZH} = \int_0^{R_{Gal}} \int_0^{Hoje} P(r, t) dr dt$$

$$P(r, t) = P_{SFR} + P_{metais} + P_{evol} + P_{SN}$$

95%



ZONA HABITÁVEL GALÁCTICA



68% da origem das estrelas com grande potencial de hospedar vida complexa **HOJE** (a maior parte das estrelas adequadas para hospedar a vida é mais velha que o Sol)

Probabilidade de distribuição de vida complexa, **considerando que o tempo de aparecimento da vida é da ordem**

de 4 +/- 1 Gano

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

$$P(r, t) = P_{SFR} + P_{metais} + P_{evol} + P_{SN}$$

95%

Ref: Lineweaver, Fenner & Gibson, Science (2004)



Probabilidade de formação de planetas rochosos

Definida por P_{metals} , sensível à metalicidade* Z

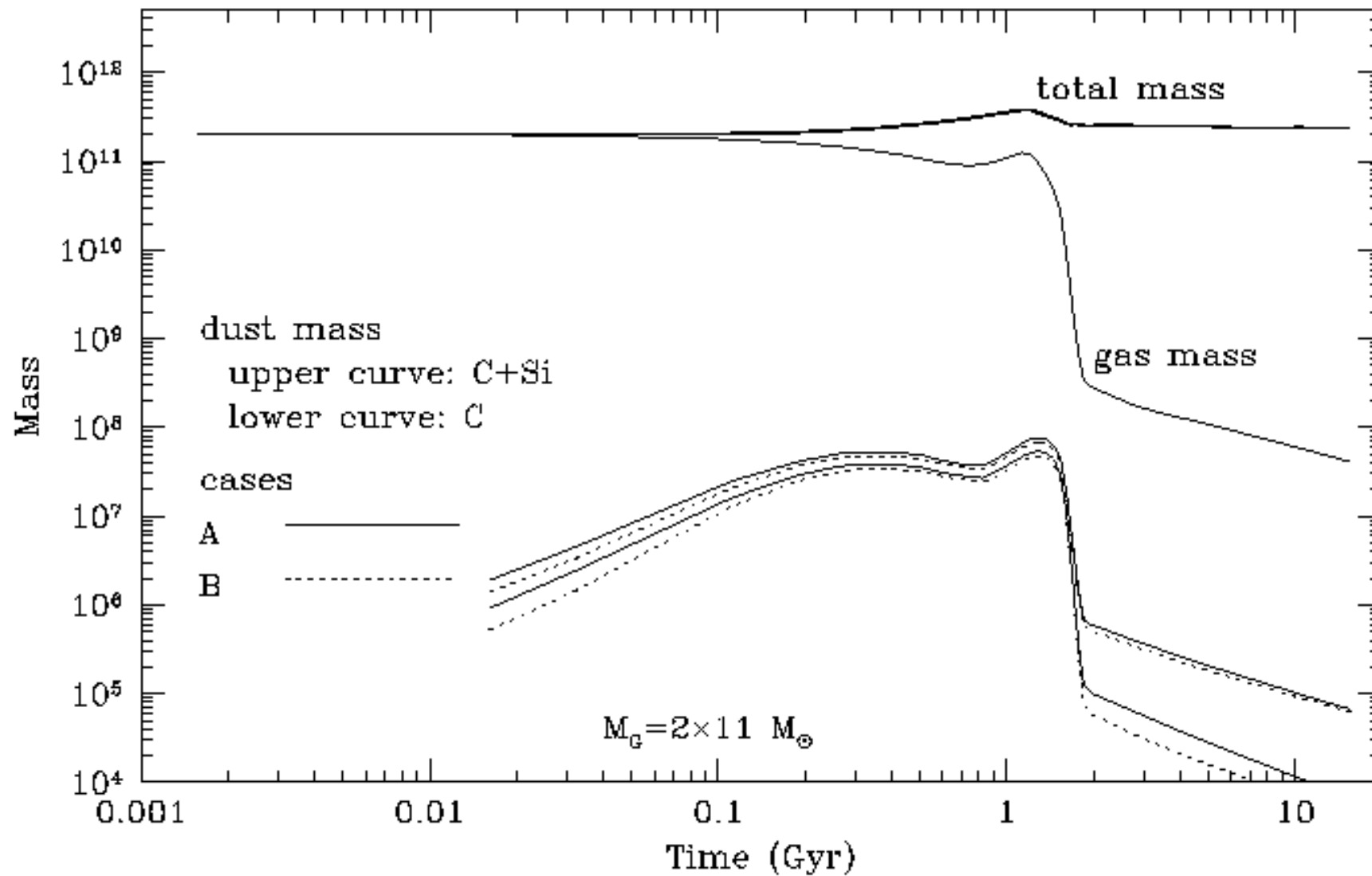
- ☑ Probabilidade de destruir Terras (parâmetro Z_{DE})
- ☑ Probabilidade de produzir Terras (parâmetro Z_{PE})
- ☑ Probabilidade de abrigar Terras ($P_{HE} = P_{\text{metals}}$)

$$P_{DE}(M) = \frac{N_H(M)}{N(M)}$$

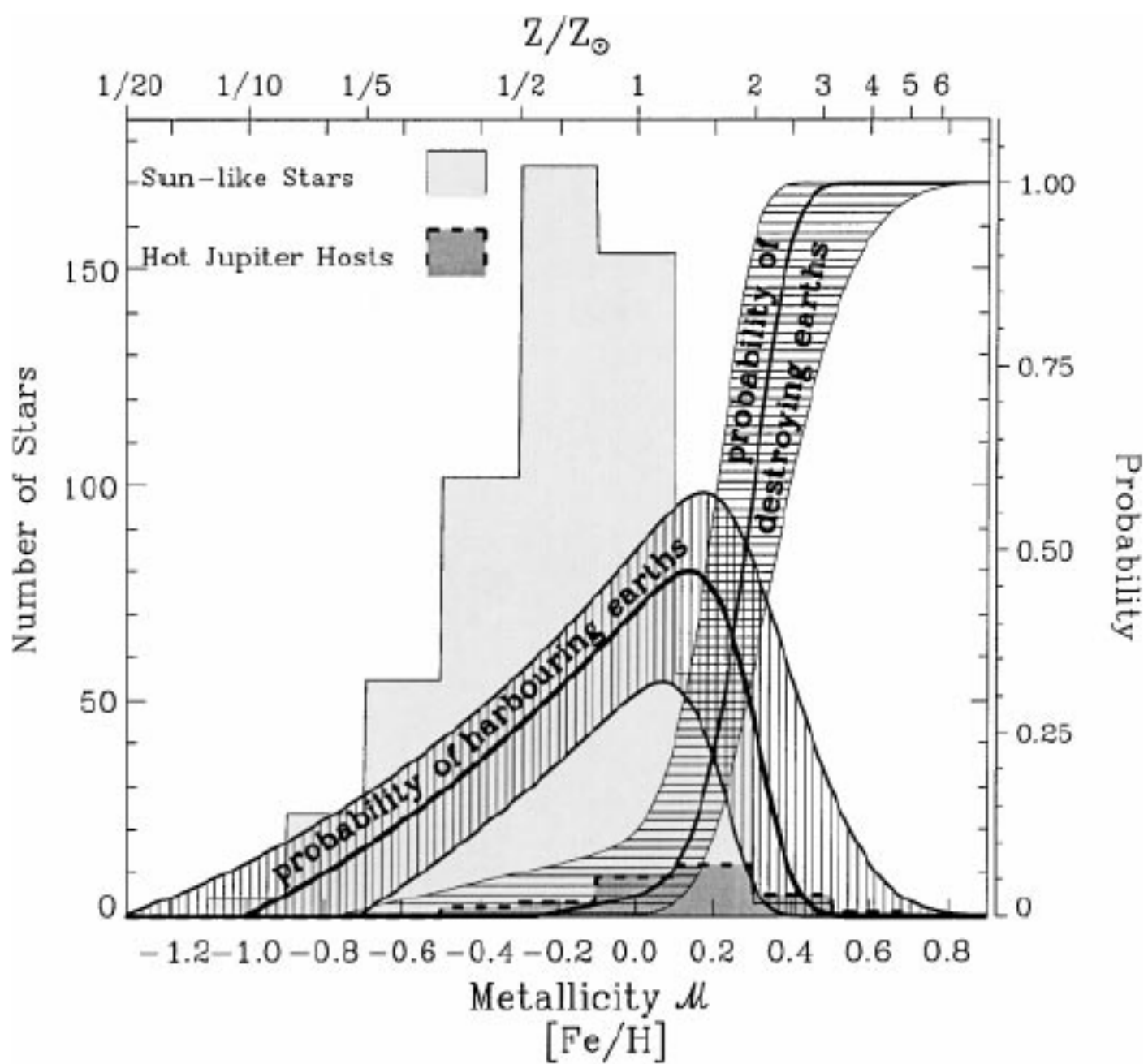
Em astrofísica, metal = qualquer elemento mais pesado que o He

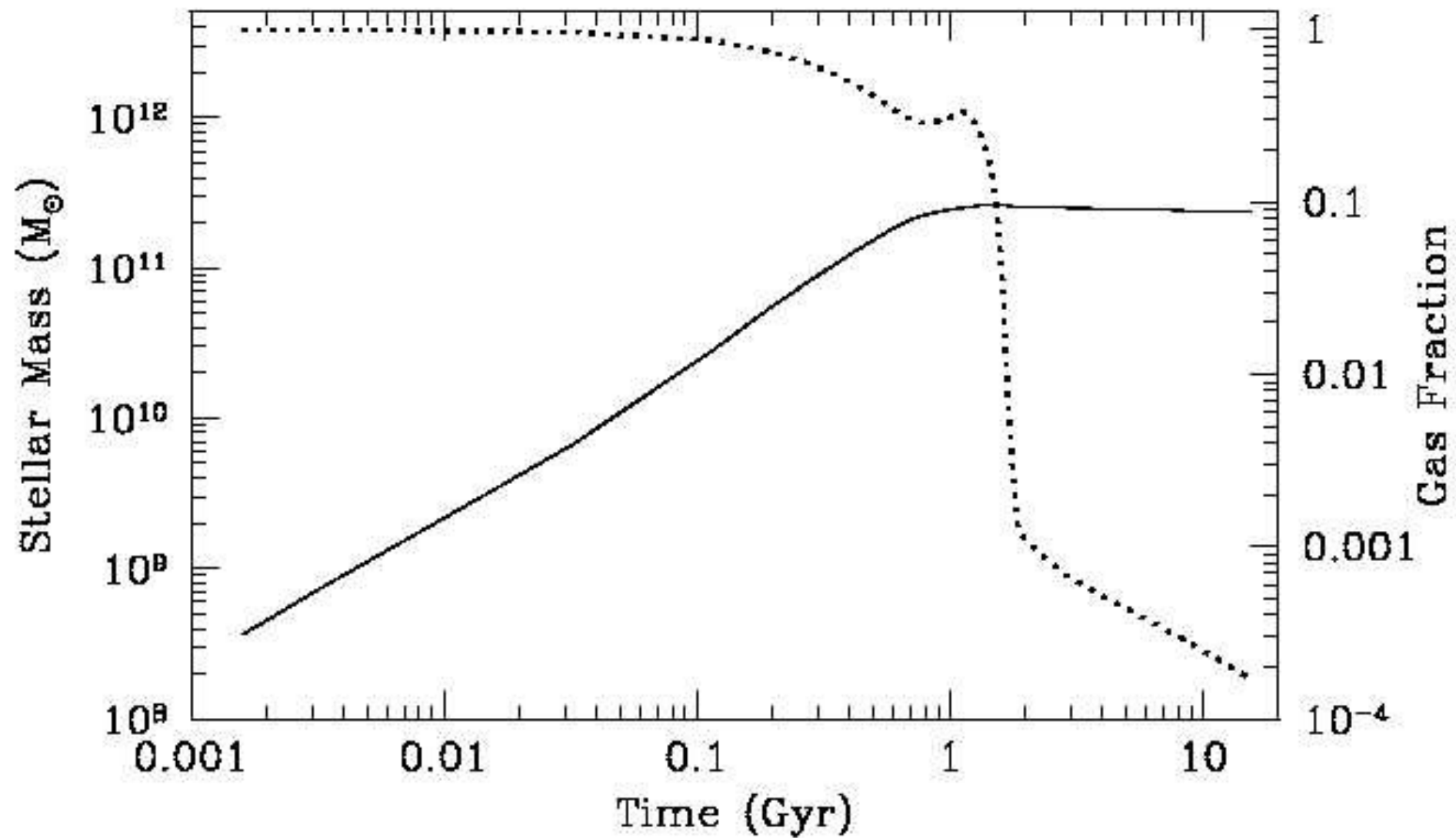
$$P_{PE}(M) \propto Z$$

$$P_{HE}(M) = P_{PE}(M) \times [1 - P_{DE}(M)]$$



A quantidade de material disponível para formação planetária na Galáxia decresce com a evolução da Galáxia





A quantidade de material disponível decresce com a evolução do Universo



Probabilidade de evolução em escalas de tempo biológicas

Definida por P_{evol}

- ☑ Darwinismo requer escalas de tempo “longas” ($\geq 10^{6-7}$ anos)
- ☑ P_{evol} depende de t_{evol}
- ☑ Para a Terra, $t_{evol} = 4$ Gyr
- ☑ t_{evol} poderia ser menor???? (parâmetro importante na definição do tamanho da GHZ)



Probabilidade de sobrevivência a eventos Galácticos “violentos”

Definido por P_{SN}

- ☑ Normalização para as condições na Terra?
- ☑ P_{evol} depende de eventos passados por causa de t_{SN}
- ☑ Para a Terra, $t_{SN} = t_{evol} = 4 \text{ Gyr}$
- ☑ Novamente, t_{SN} poderia ser menor que 4 Gyr??
- ☑ Outros “assassinos”: Gamma-Ray Bursts (GRB), Giant Molecular Clouds (GMC), Active Galactic Nuclei (AGN)



Probabilidades para uma Zona Habitável Galáctica (GHZ)

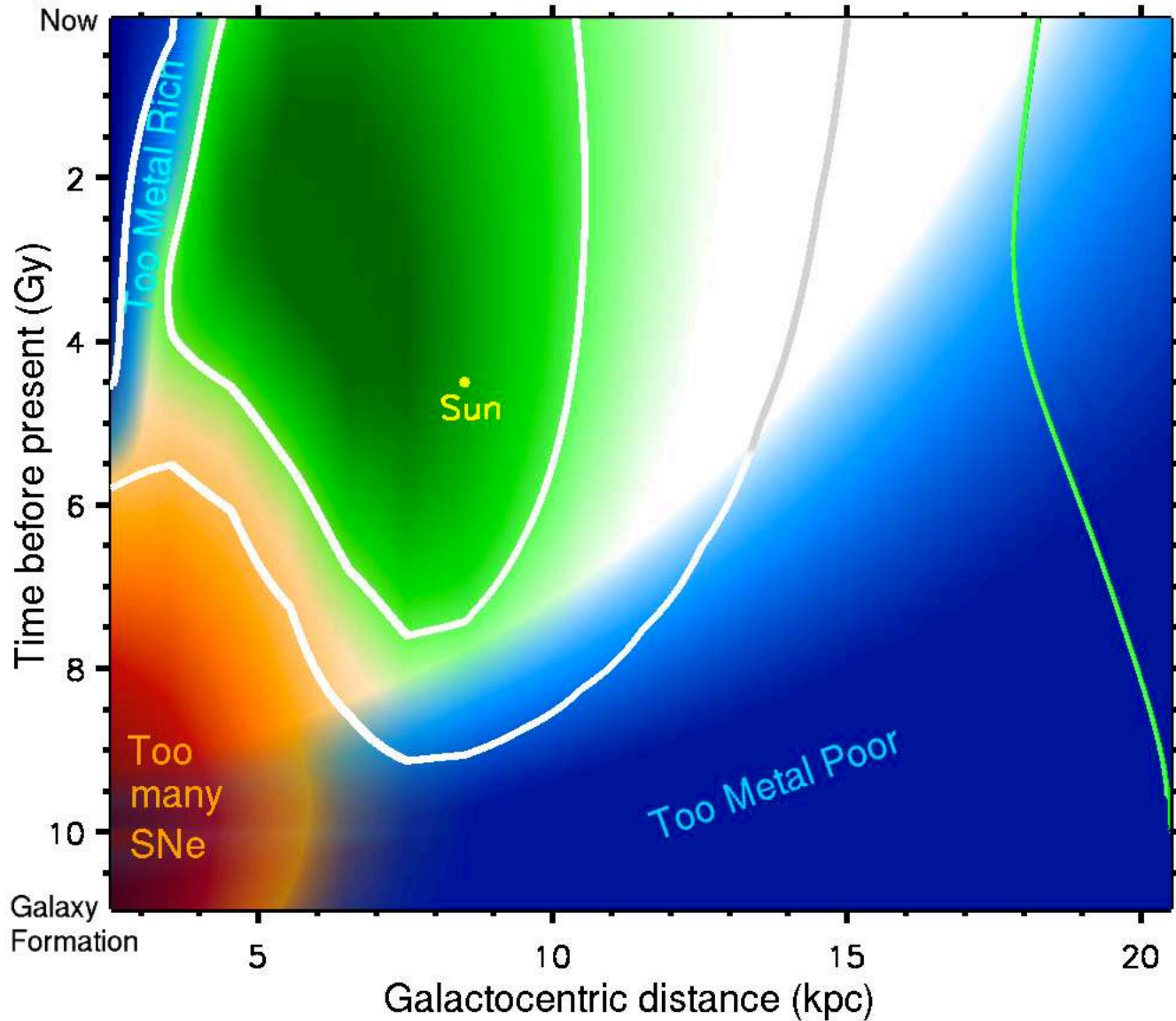
$$P_{\text{GHZ}} = P_{\text{SFR}} + P_{\text{metais}} + P_{\text{evol}} + P_{\text{SN}}$$

- ☑ P_{SFR} : Taxa de formação estelar é da ordem de $1 M_{\text{Sol}}/\text{ano}$
- ☑ P_{metais} : Probabilidade de formar planetas rochosos
 - ✓ Extremamente sensível à metalicidade
 - ✓ Probabilidade de destruir, formar e abrigar Terras

- ☑ P_{evol} : Probabilidade de evolução em escalas de tempo biológicas
 - ✓ Darwinismo requer escalas de tempo longas
 - ✓ P_{evol} depende de t_{evo} ($t_{\text{evol}} = 4 \text{ Gyr}$ para a vida na Terra. Poderia ser mais curto?)
- ☑ P_{SN} : Probabilidade de sobrevivência a eventos extremos
 - ✓ P_{evol} depende de eventos anteriores, devido a t_{SN}
 - ✓ Outros exterminadores: GRB, GMC < AGN



68%



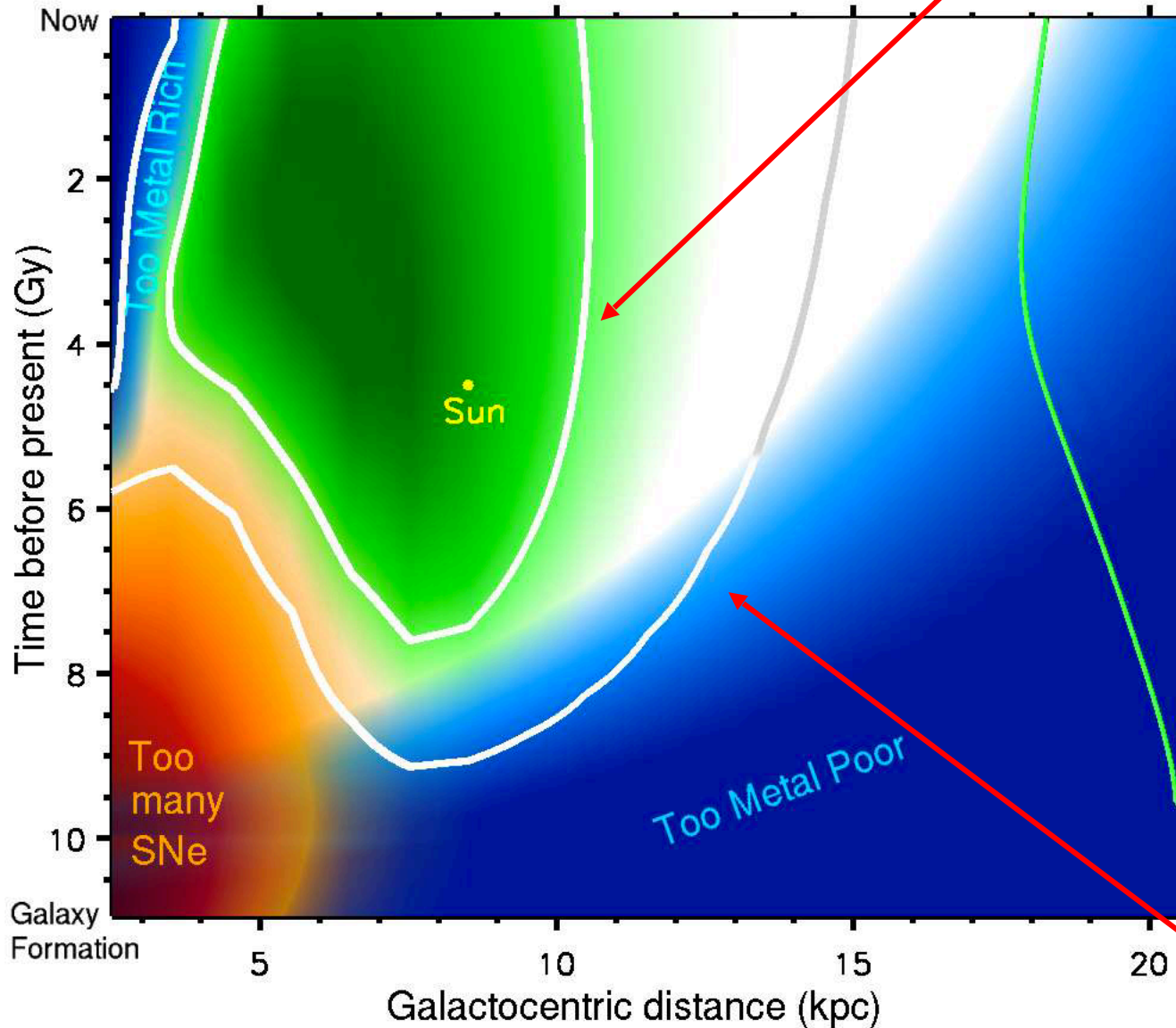
Se a condição $P_{evol} = 4 \pm 1$ Gano para o aparecimento de vida complexa for relaxada, e considerarmos qualquer forma de vida, a GHZ aumenta no tempo e no espaço!!

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

$$P(r, t) = P_{SFR} + P_{metais} + \cancel{P_{evol}} + P_{SN}$$

95%

ZONA HABITÁVEL GALÁCTICA



68%

Se a condição $P_{evol} = 4 \pm 1$ Gano para o aparecimento de vida complexa for relaxada, e considerarmos qualquer forma de vida, a GHZ aumenta no tempo e no espaço!!

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

$$P(r, t) = P_{SFR} + P_{metais} + \cancel{P_{evol}} + P_{SN}$$

95%



Zona Habitável Galáctica (GHZ) a partir de simulações cosmológicas

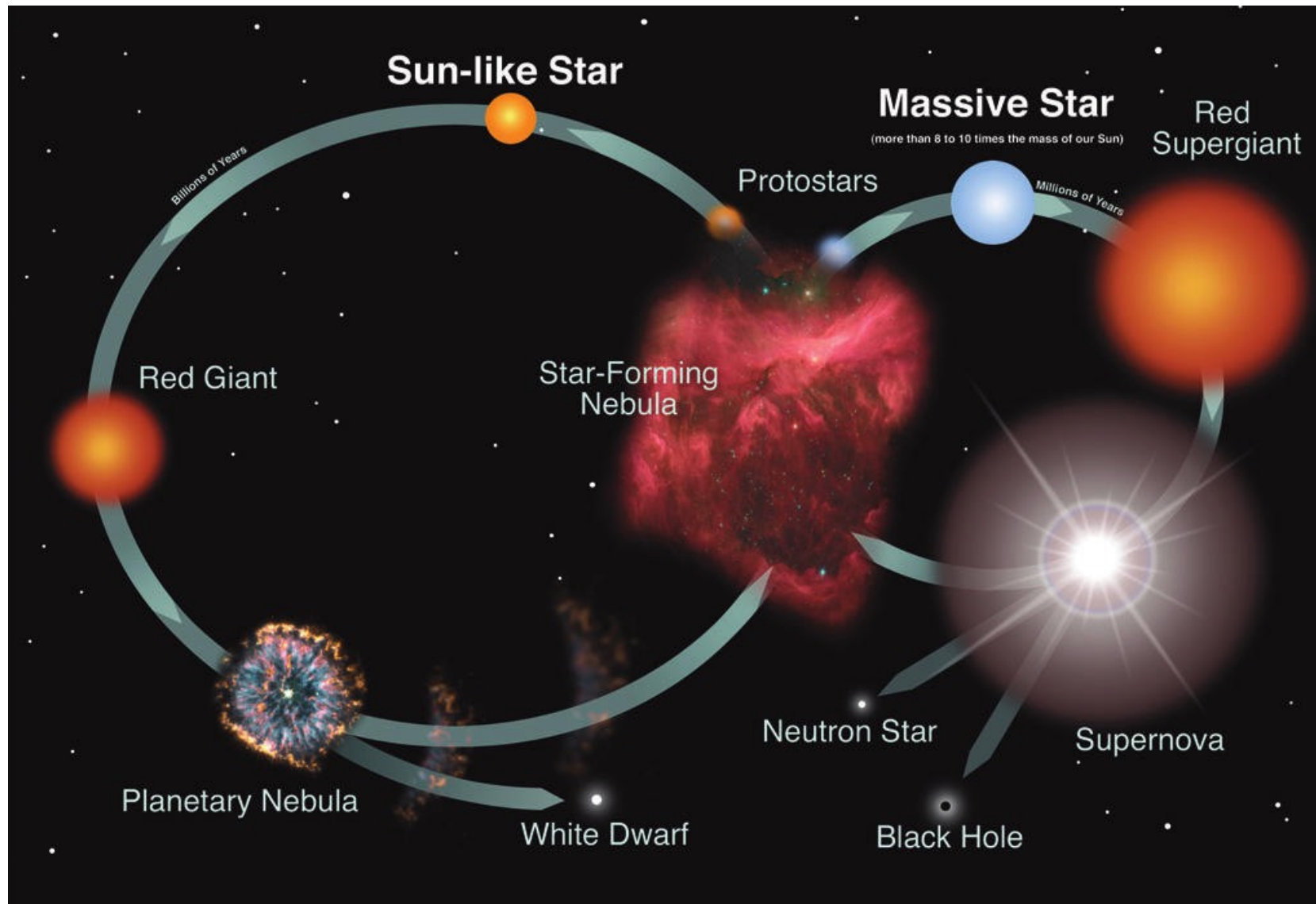
- ❑ Baseado em simulações da formação do Grupo Local, com alta resolução (alguns parsec), permitindo uma análise 3D, que inclui regiões fora do disco galáctico
- ❑ GHZ não possui “simetria radial”, mas aparece em bolsões, de forma assimétrica, no espaço e no tempo
- ❑ Análise comparativa entre a Via Láctea e M33 sugere que a borda do disco galáctico também é favorável ao aparecimento de sistemas planetários com planetas terrestres
- ❑ A história da formação galáctica é extremamente relevante: M33 e a Via Láctea chegam ao mesmo quadro atual de probabilidades por caminhos muito diferentes!
- ❑ Formação possível de diferentes biosferas em tempos diferentes na mesma galáxia!
- ❑ Simulações cosmológicas podem ser muito úteis no entendimento da habitabilidade galáctica, caso consigam resolver os detalhes da evolução química



Considerações astrofísicas

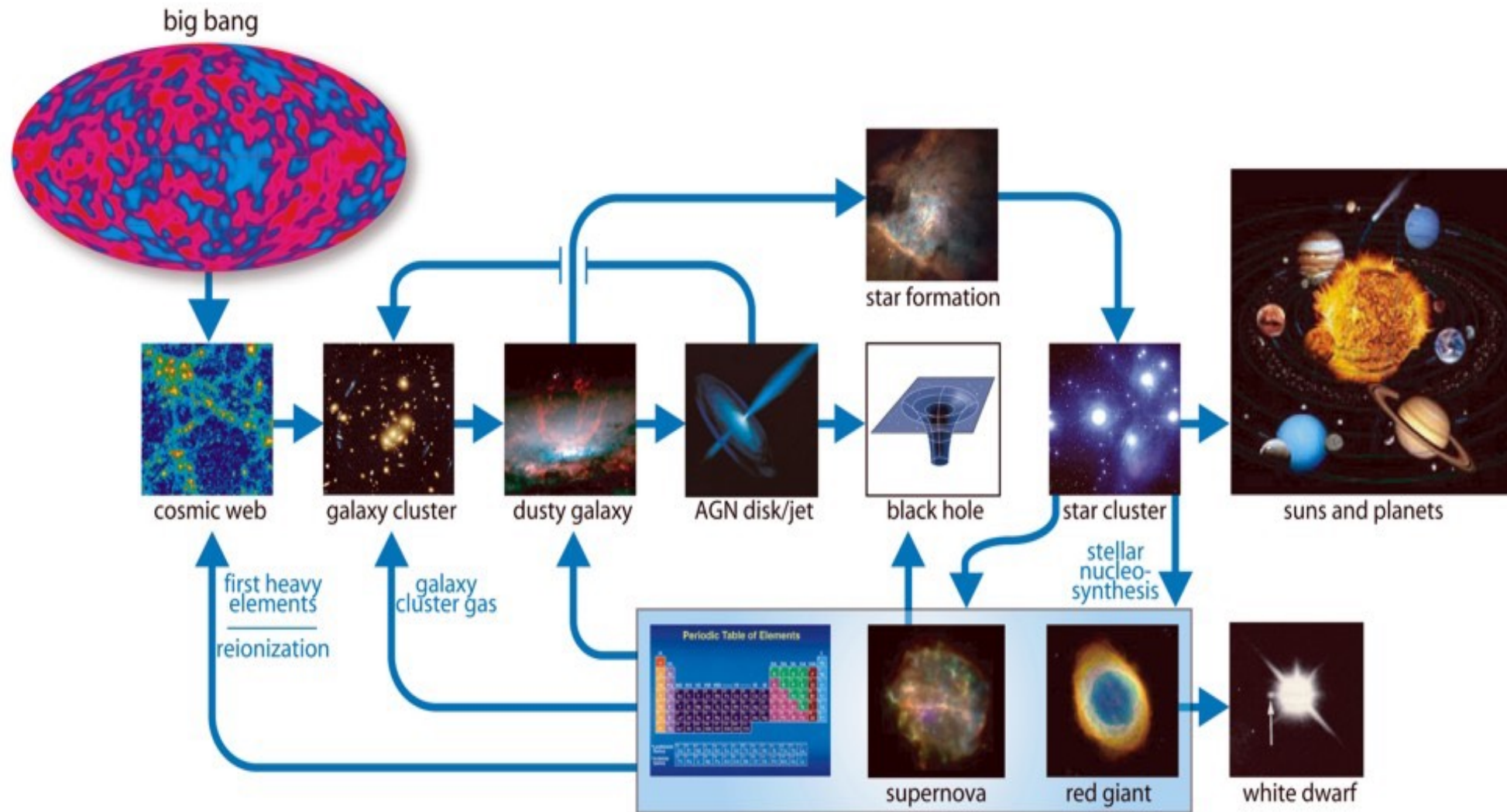
- ☑ Trabalhos posteriores ao de Lineweaver indicam que os limites estimados da GHZ variam muito dependendo da história da formação estelar, evolução química e do entendimento detalhado dos “killers” (quando eles passam a ser relevantes e quão intensa é a radiação que atinge um planeta habitado)
- ☑ Dependendo do modelo, as regiões “mais habitáveis” podem ser
 - ✓ A maior parte do disco Galáctico
 - ✓ Um anel entre 7 e 9 kpc
 - ✓ As partes externas da Galáxia
- ☑ Sugestões de abordagens com uma discussão mais detalhada dos processos físicos listados por Lineweaver et al (2004):
 - ✓ Prantzos (Sp. Sci. Rev. 2008 – que se contrapõe diretamente a Lineweaver),
 - ✓ Lineweaver & Chopra (Ann. Rev. Earth. Plan. Sci. 2012),
 - ✓ Gowanlock & Morrison (arxiv:1802.07036)
 - ✓ Seccho, Fecchio e Marzari (arxiv:1912.01569)

O ciclo de vida estelar





SEU CYCLES OF MATTER AND ENERGY



Fonte: Beyond Einstein, GSFC/NASA (2003)



FIM DA AULA 2