

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:

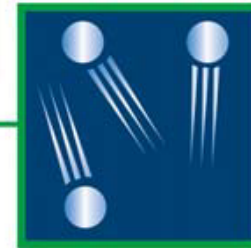
- ✓ Cap. 3 do livro “Astrobiologia: uma ciência emergente”
- ✓ artigo “The Astrobiology Primer 2.0”, cap. 3 (Domagal-Goldman & Wright, Eds., 2016)
- ✓ artigo “On the Habitability of our Universe” (A. Loeb, 2016)

COMPOSITION OF THE COSMOS

Buracos negros supermassivos (0,04%)



Heavy Elements:
0.03%

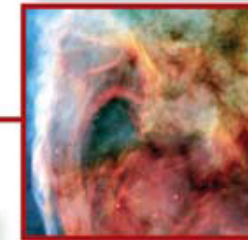


Neutrinos:
0.3%

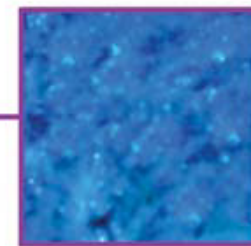
Os constituintes da
vida vêm daqui!!!



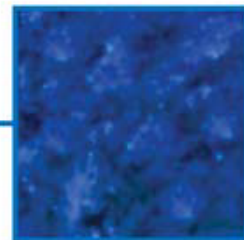
Stars:
0.5%



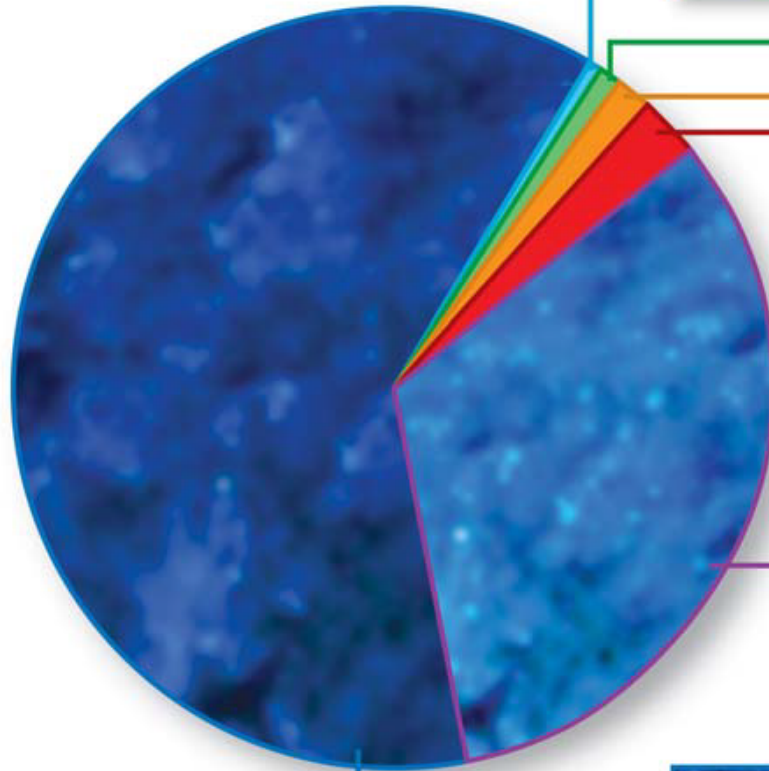
Free Hydrogen
and Helium:
4%



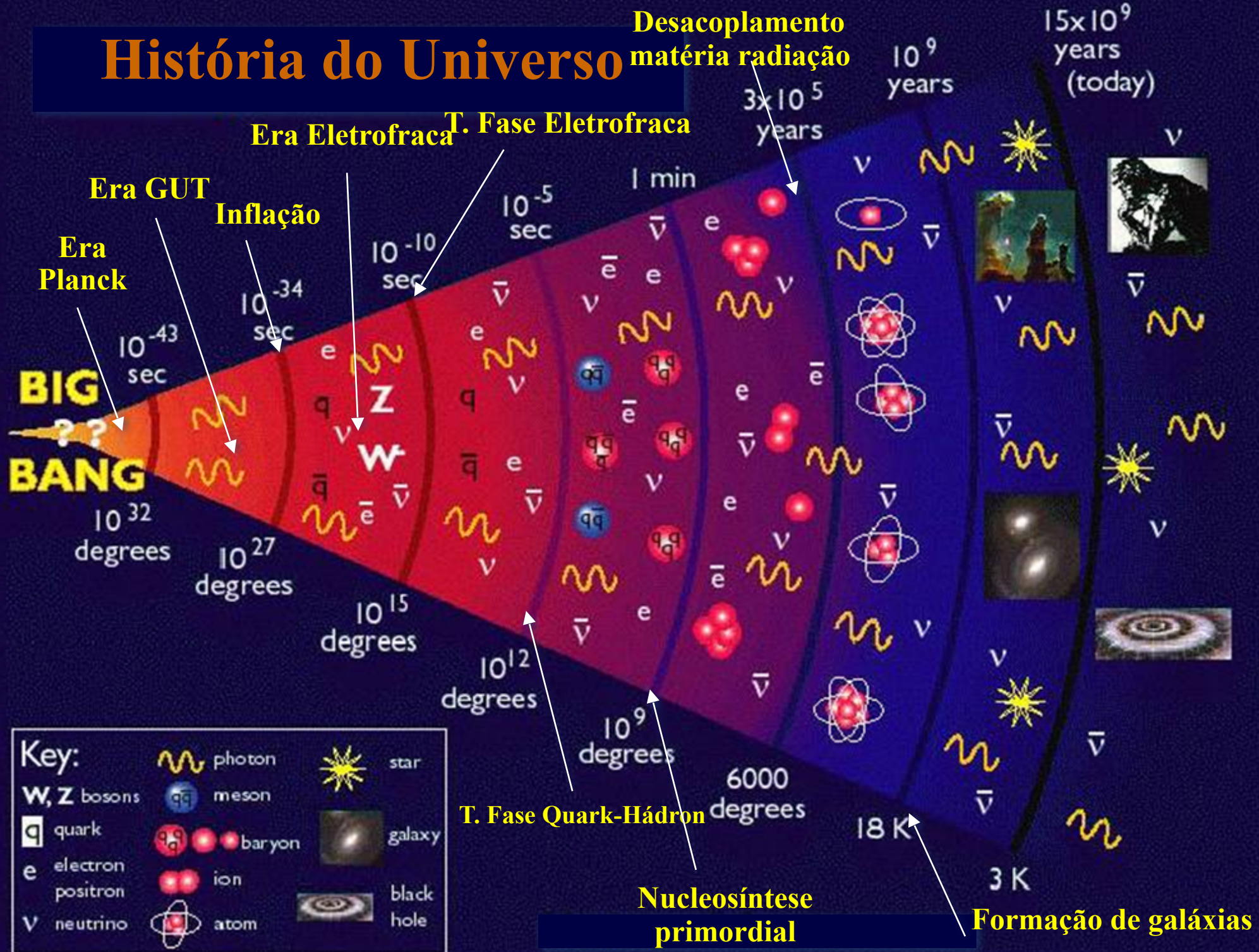
Dark Matter:
25%



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”)

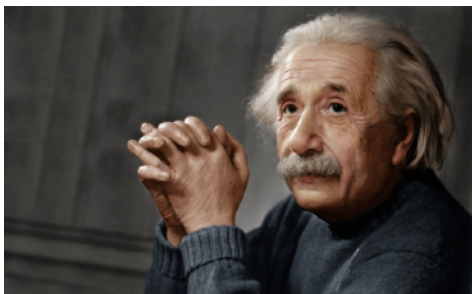
O modelo cosmológico padrão – MCP

- ☑ 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
 - ☑ 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



Alexander
Friedman

Albert Einstein

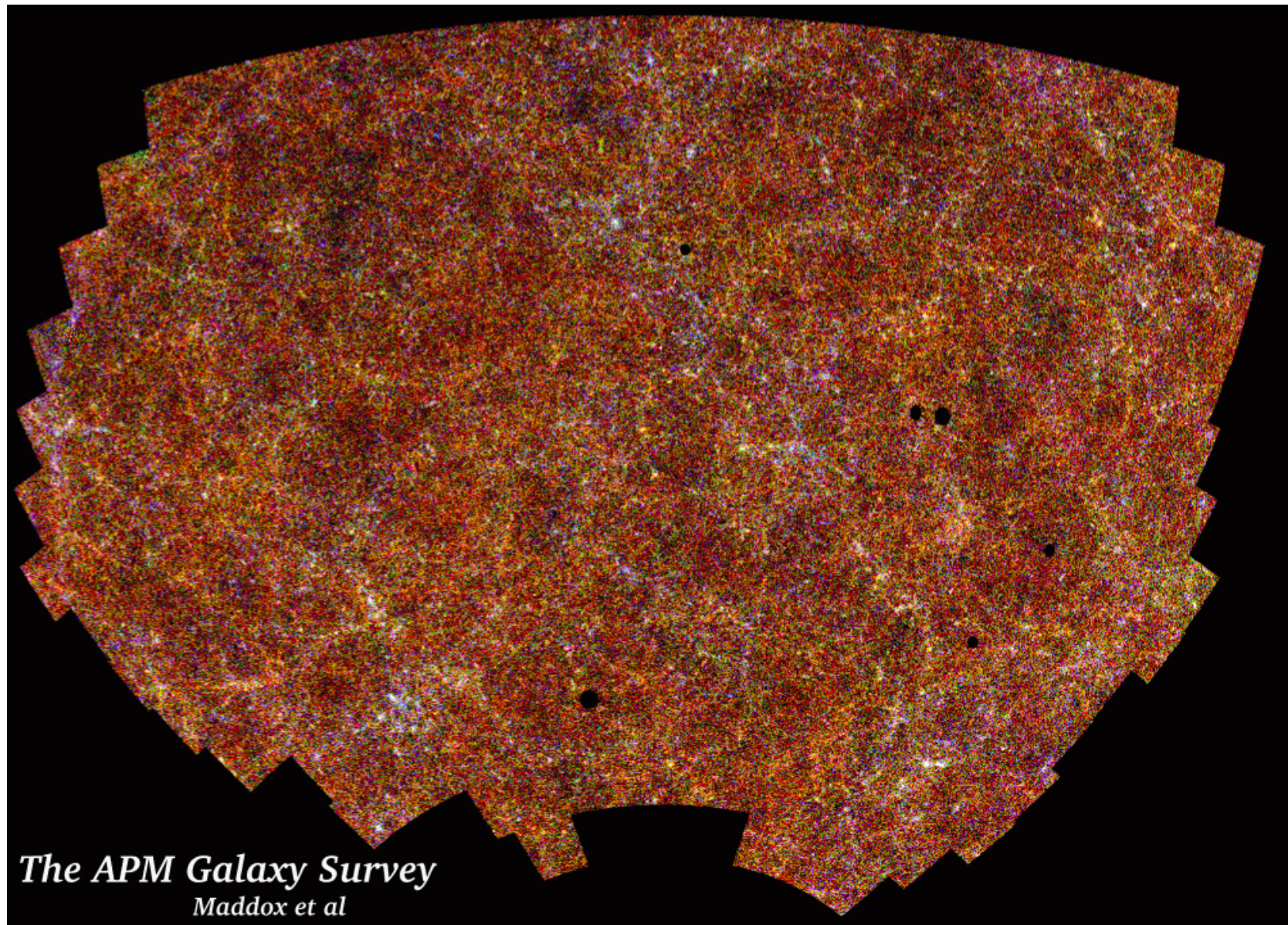




O modelo cosmológico padrão – MCP

- ☑ 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



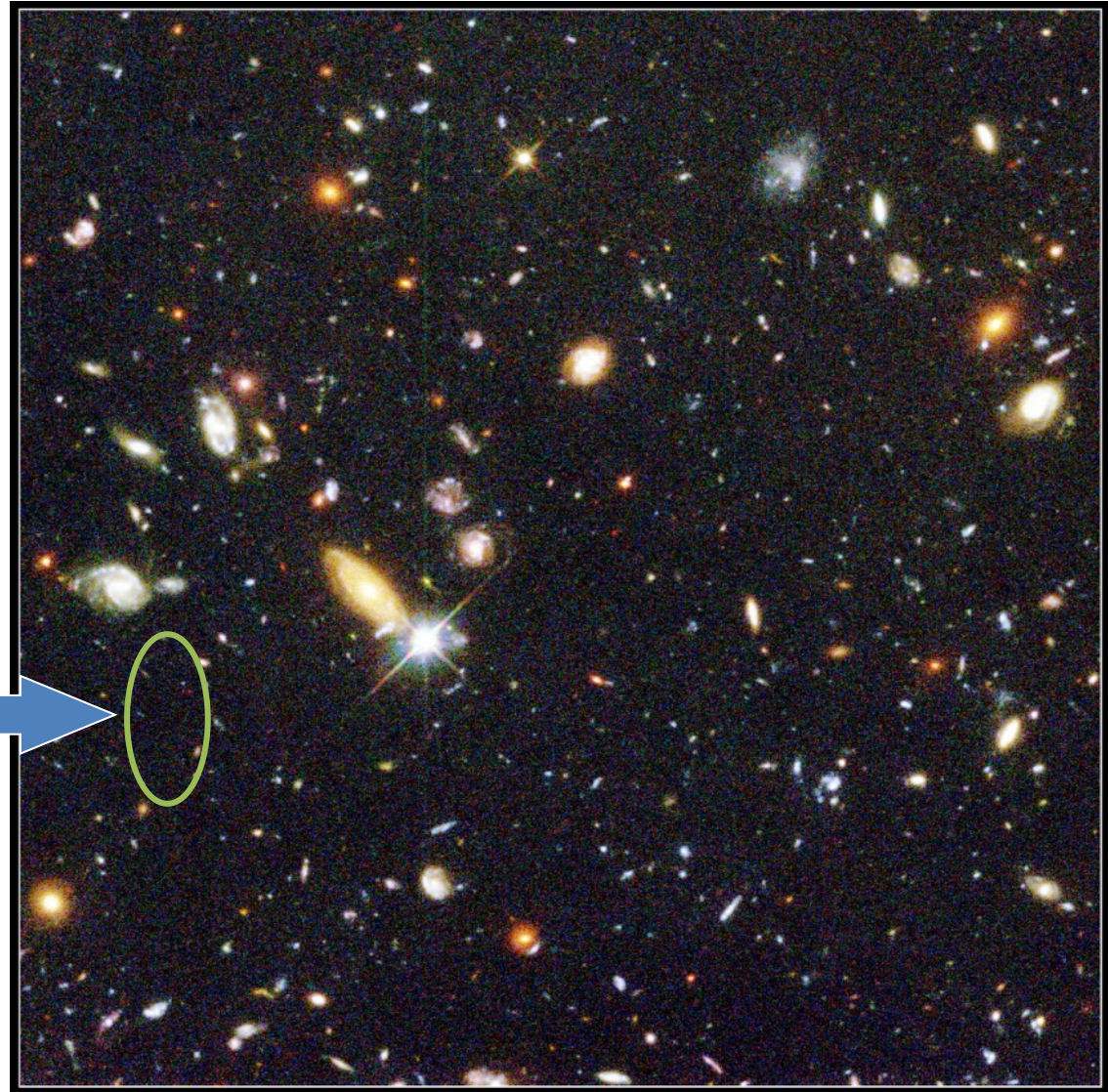
Uma visão do Universo no séc. XXI

Hubble Deep Field
(www.nasa.gov)

30.000 galáxias aqui

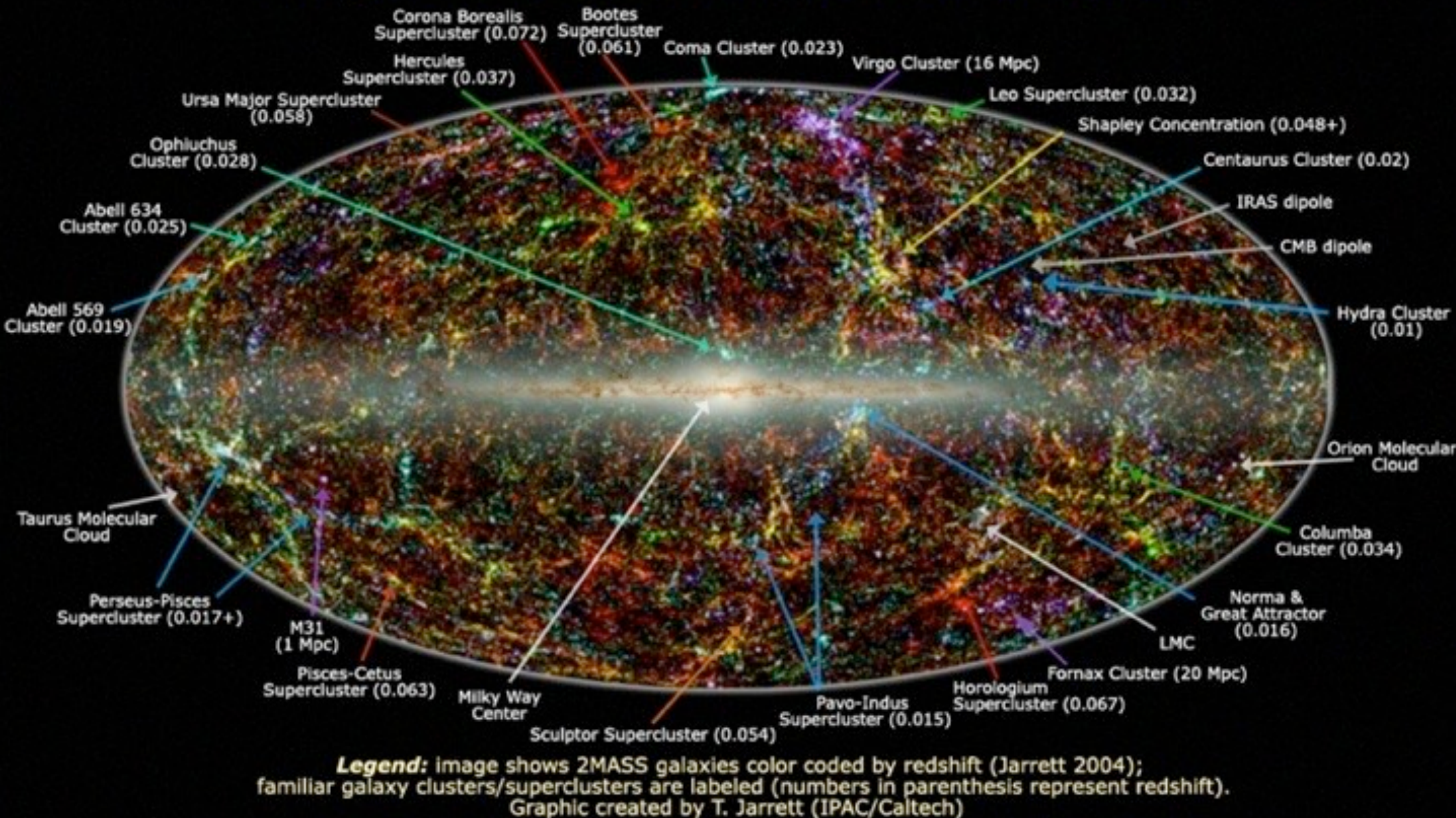


**100 bilhões
em todo o céu**

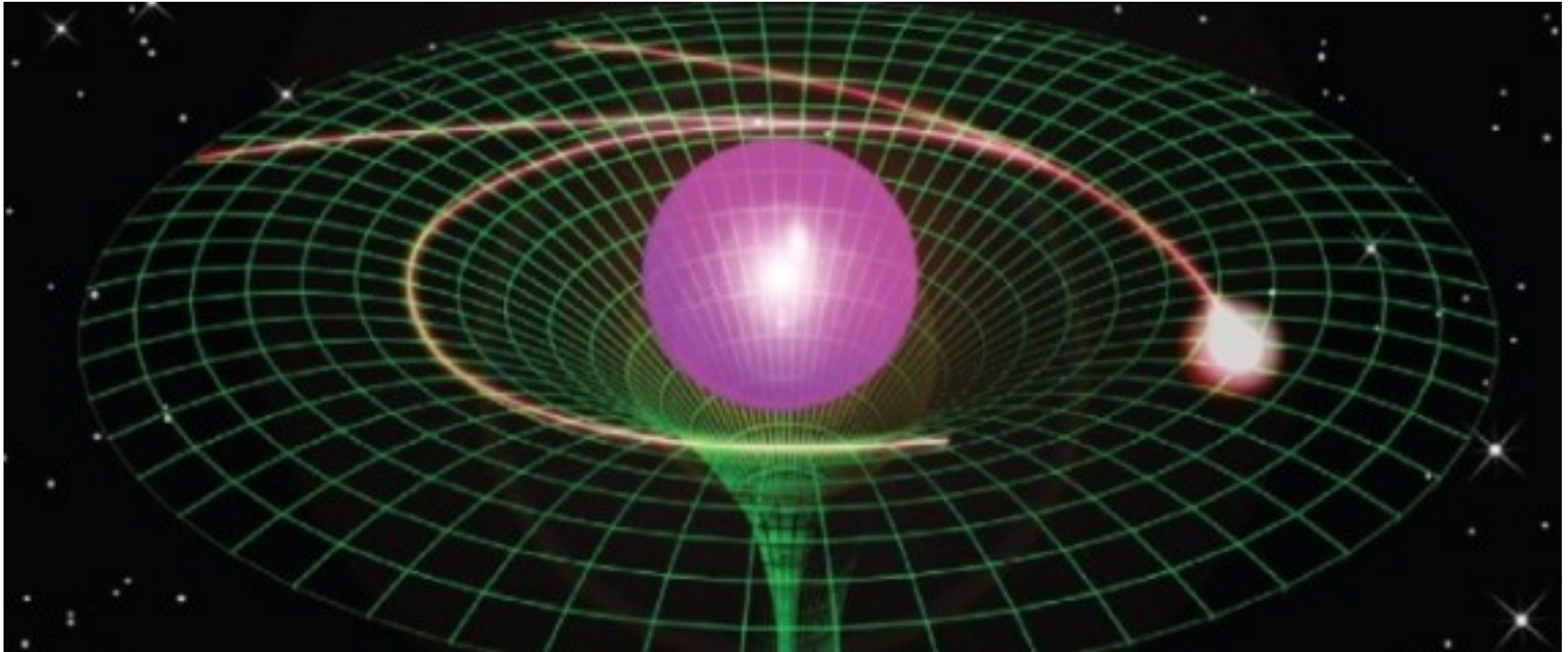


Uma visão do Universo no séc. XXI

Large Scale Structure in the Local Universe



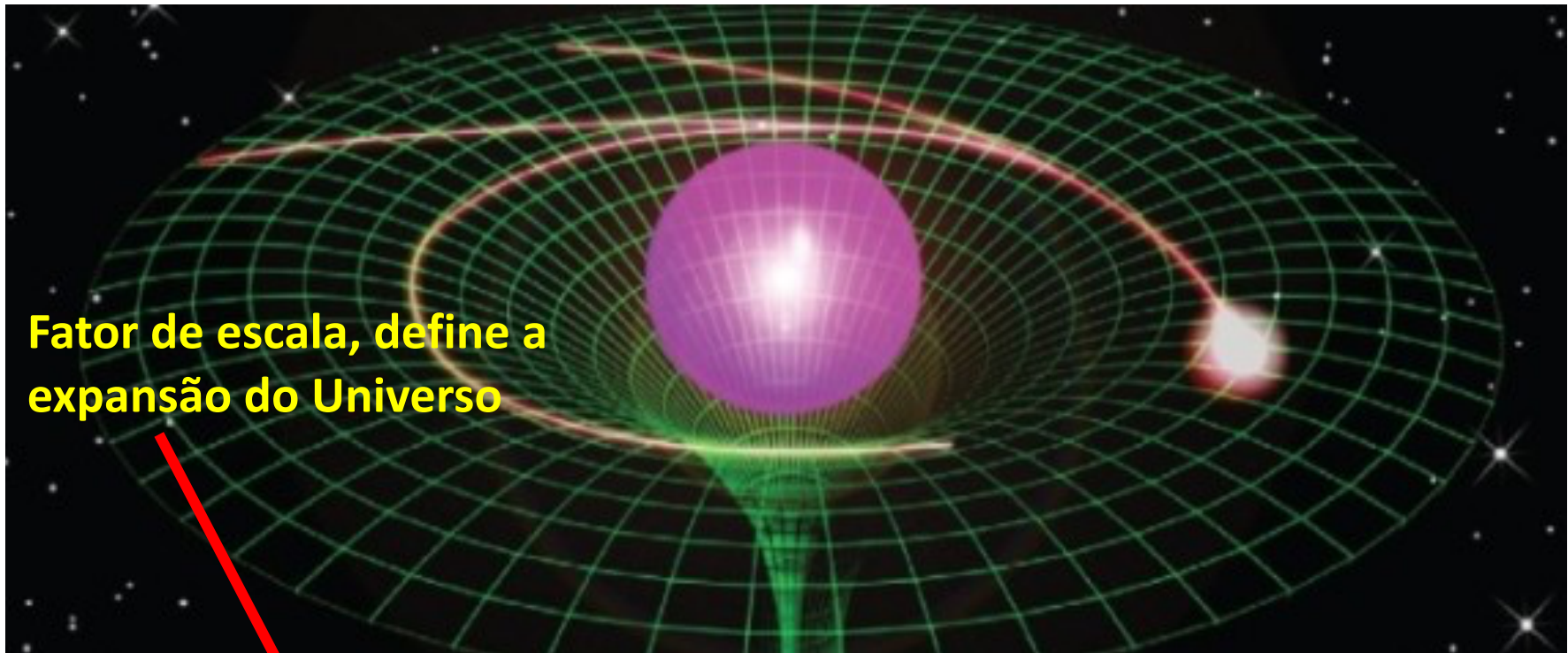
O Arcabouço teórico



- ☑ 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

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 \right)$$

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

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 \right)$$

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

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 \right)$$

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

$$ds^2 = dt^2 - a(t)^2 \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 \right)$$



O Arcabouço teórico

- ☑ As equações de Einstein

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

- ☑ Desembocam nas chamadas equações de Friedmann-Lemaître



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-Lemaître

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



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

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



Equações de Friedmann-Lemaître

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

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-Lemaître

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

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-Lemaître

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

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, contém implicitamente a 1a. Lei da Termodinâmica.

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

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

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


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



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

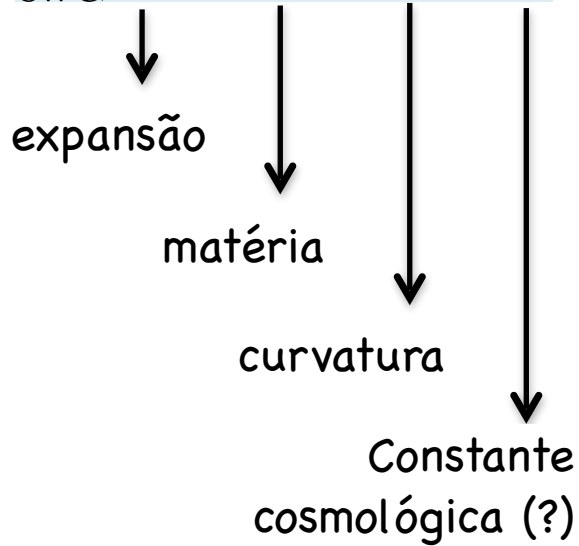

Termo dinâmico, envolve uma aceleração

Termo de fontes, contém implicitamente a 1a. Lei da Termodinâmica.

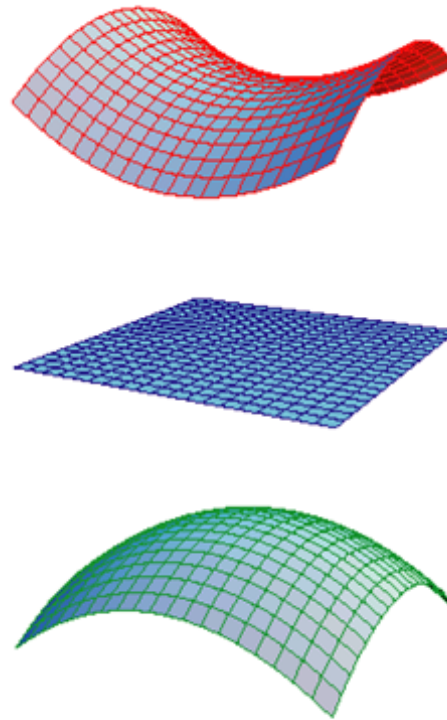
Evolução Cósmica

Relatividade Geral

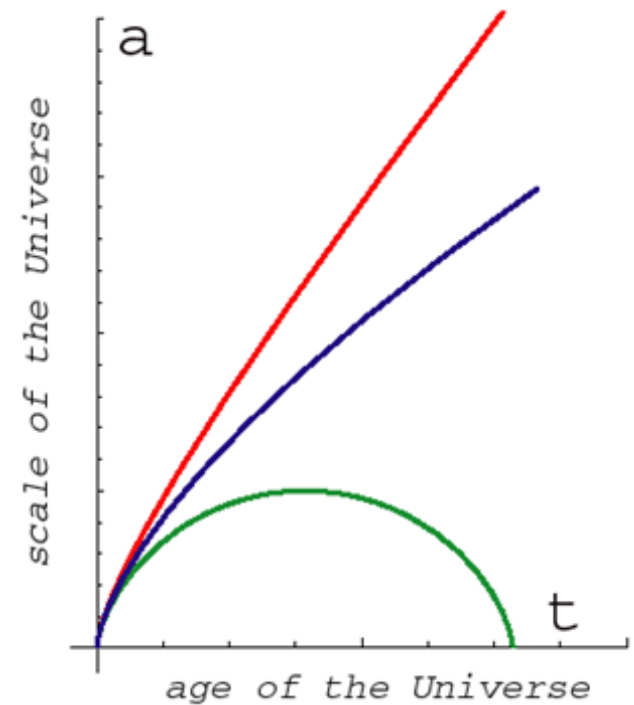
$$\frac{3c^2}{8\pi G} H^2 = \rho_m - \rho_k + \rho_\Lambda$$



Geometria



Cosmologia





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)

Carlos Alexandre Wuensche (2019)



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)

Carlos Alexandre Wuensche (2019)



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**)



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

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

Carlos Alexandre Wuensche (2019)

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

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

Carlos Alexandre Wuensche (2019)



Os parâmetros

Função de massa de Chabrier

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

Tempo de vida estelar

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

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

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

Os parâmetros

Taxa de formação estelar

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

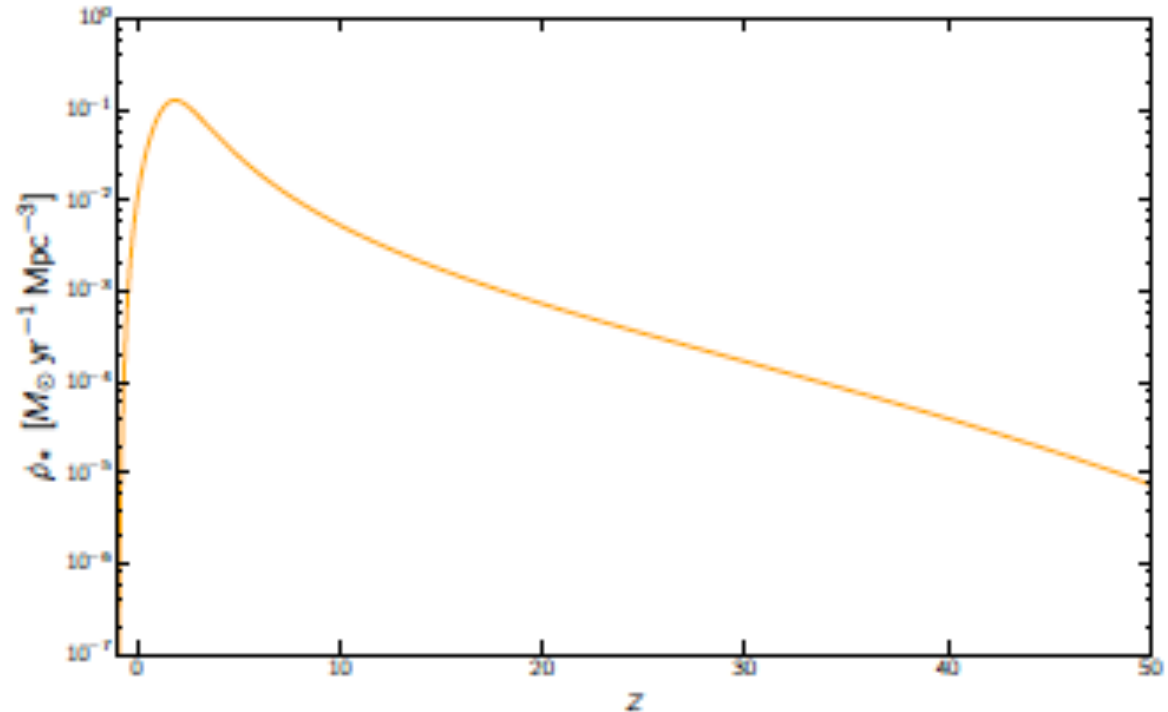
Probabilidade de
existência de vida
na Zona Habitável

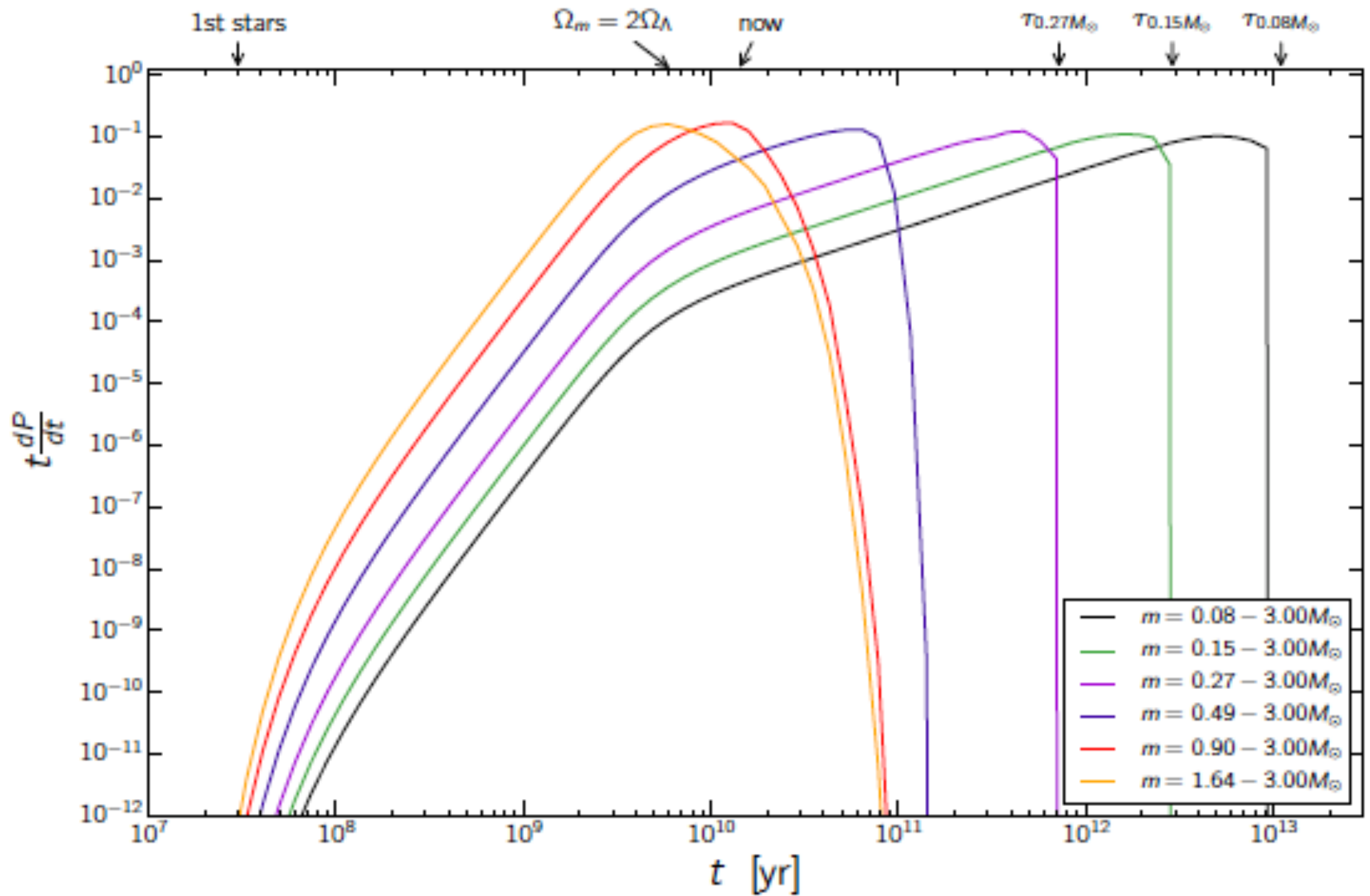
$P(\eta, \text{HZ})$

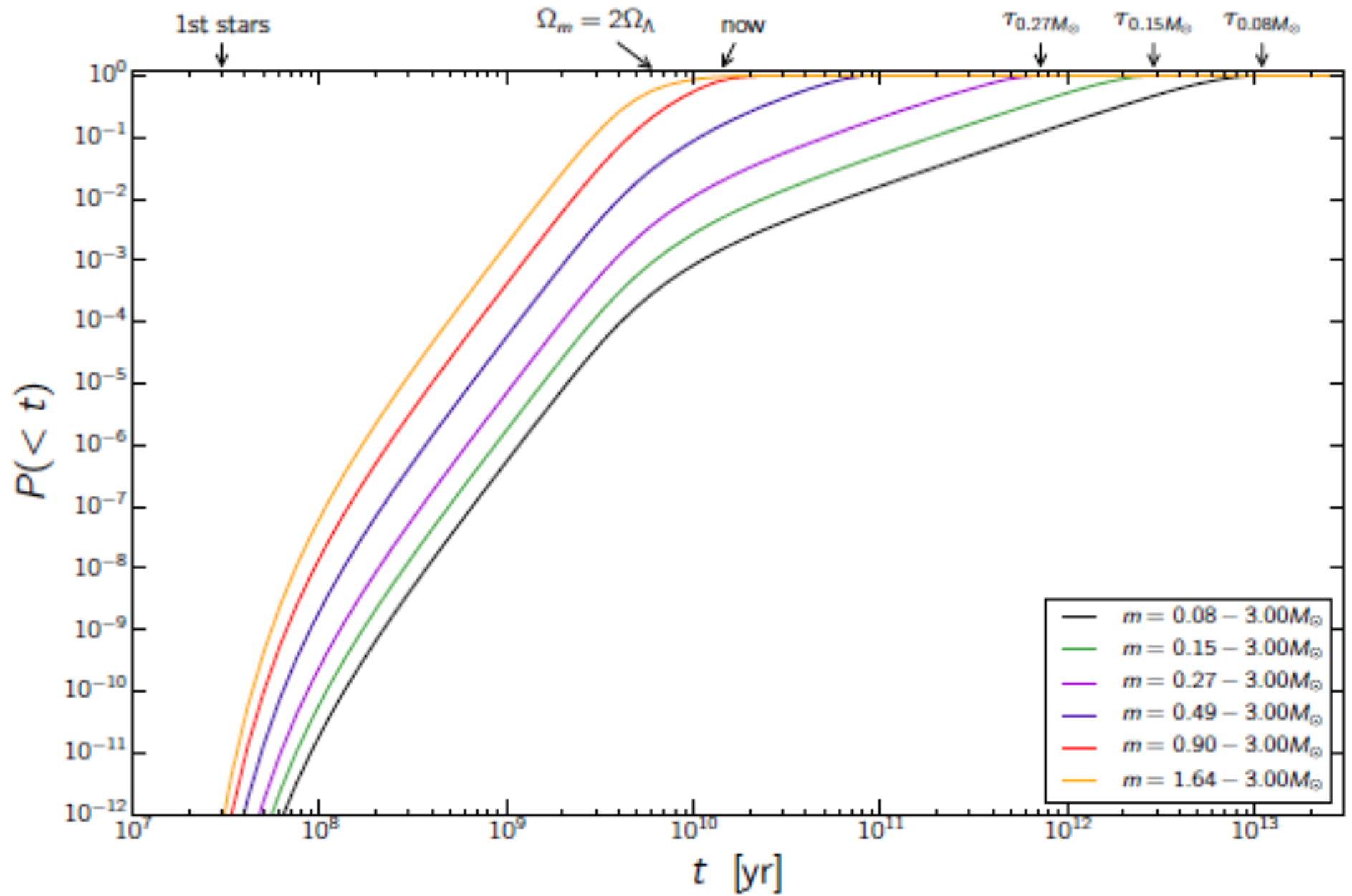
?????

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

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









Considerações galácticas

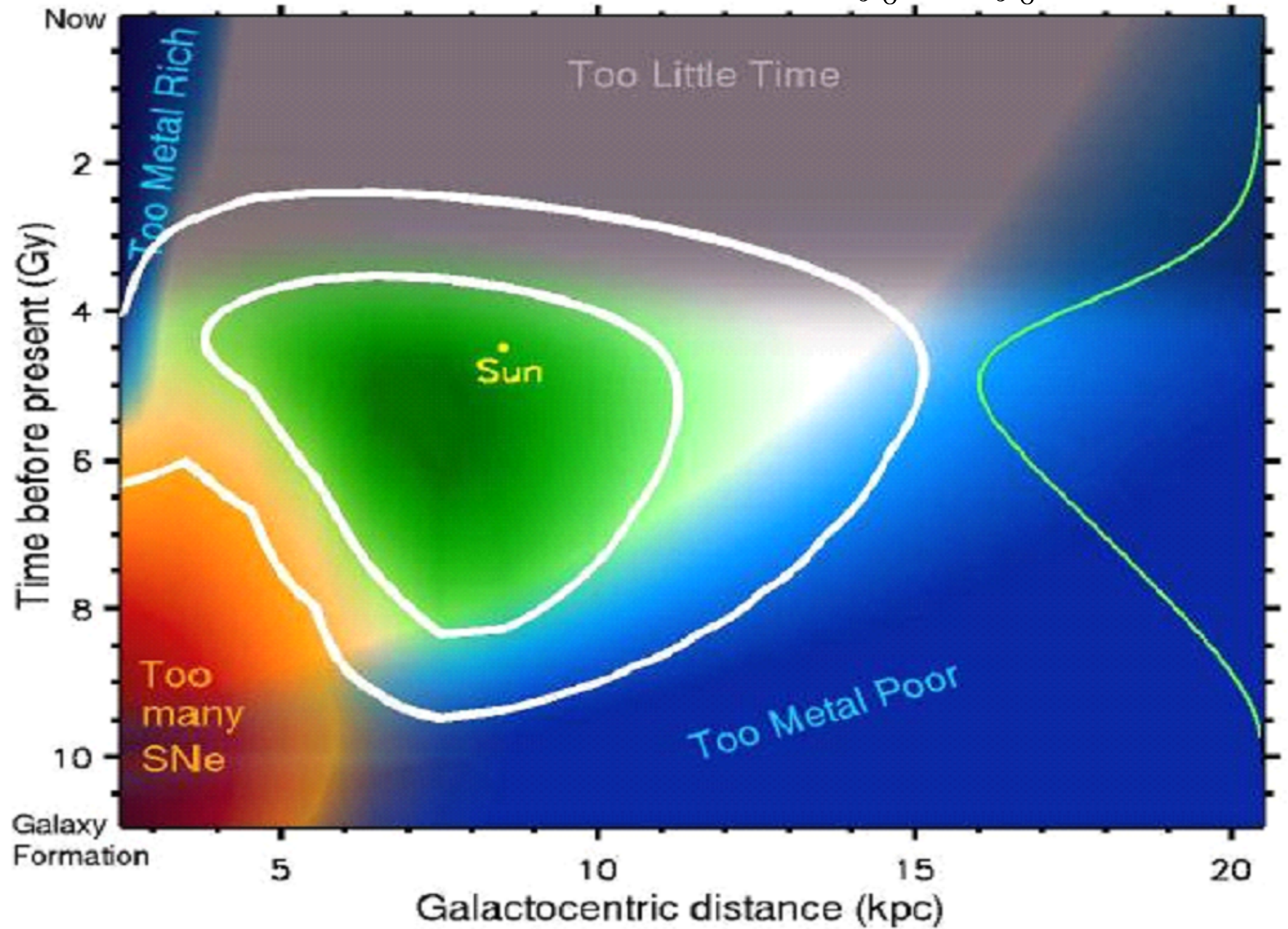
- ☑ Que tipo de ambiente é adequado? Em que intervalo de tempo?
- ☑ Uma vez formados, planetas parecem evoluir de forma “tranquila”, mas o mesmo não vale para as formas de vida que conhecemos
- ☑ As condições iniciais no Universo, nas galáxias e nos processos de evolução estelar espalharam os tijolos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



Considerações galácticas

- ✓ Tempo de vida estelar típico
 - ✓ $4,5 \times 10^9 \text{ anos} < t < 13,9 \times 10^9 \text{ anos}$
 - ✓ (entrada da $\star$ na SP $< t <$ 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”.

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

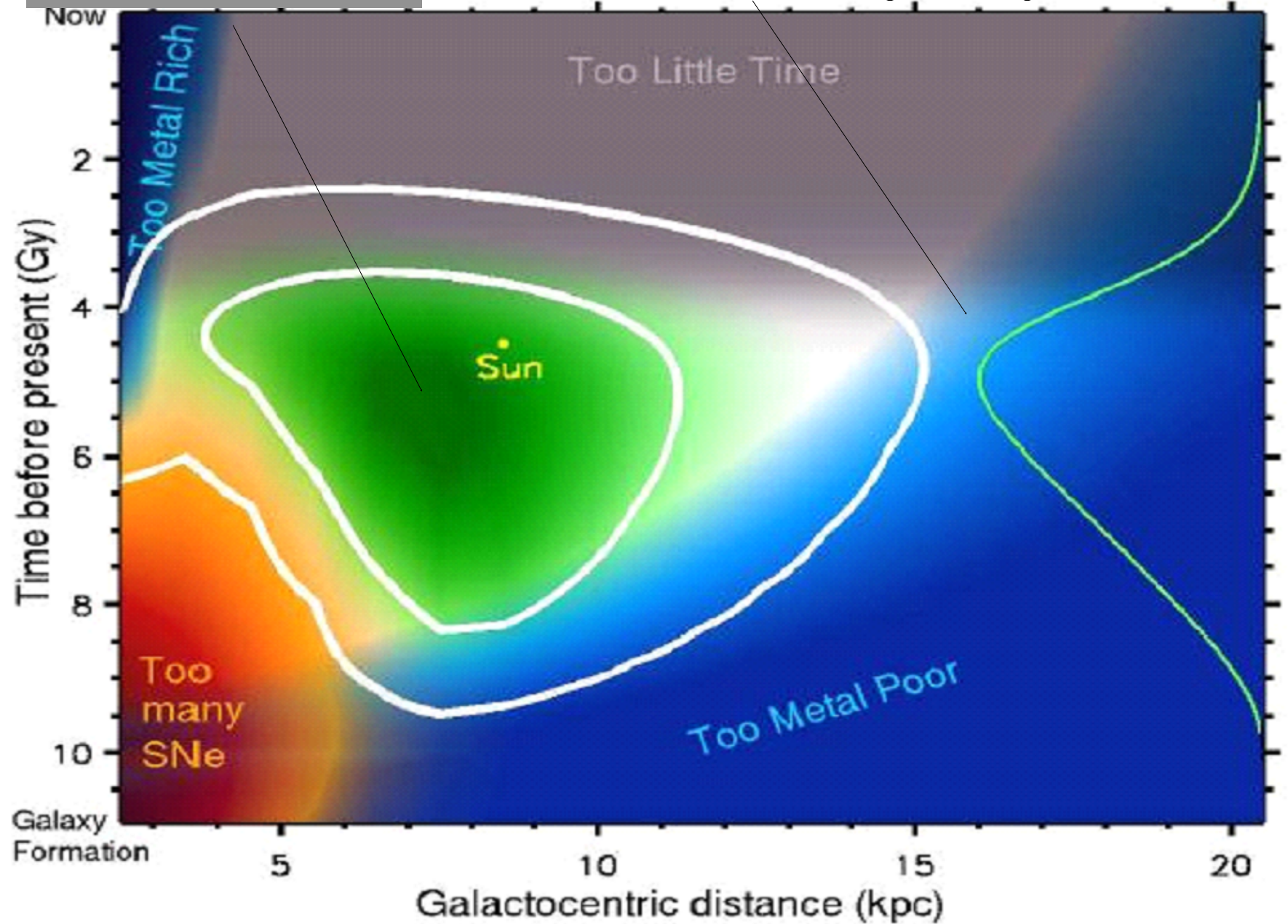


Ref.: Lineweaver et al., Science, 303, 59 (2004)

Carlos Alexandre Wuensche (2019)

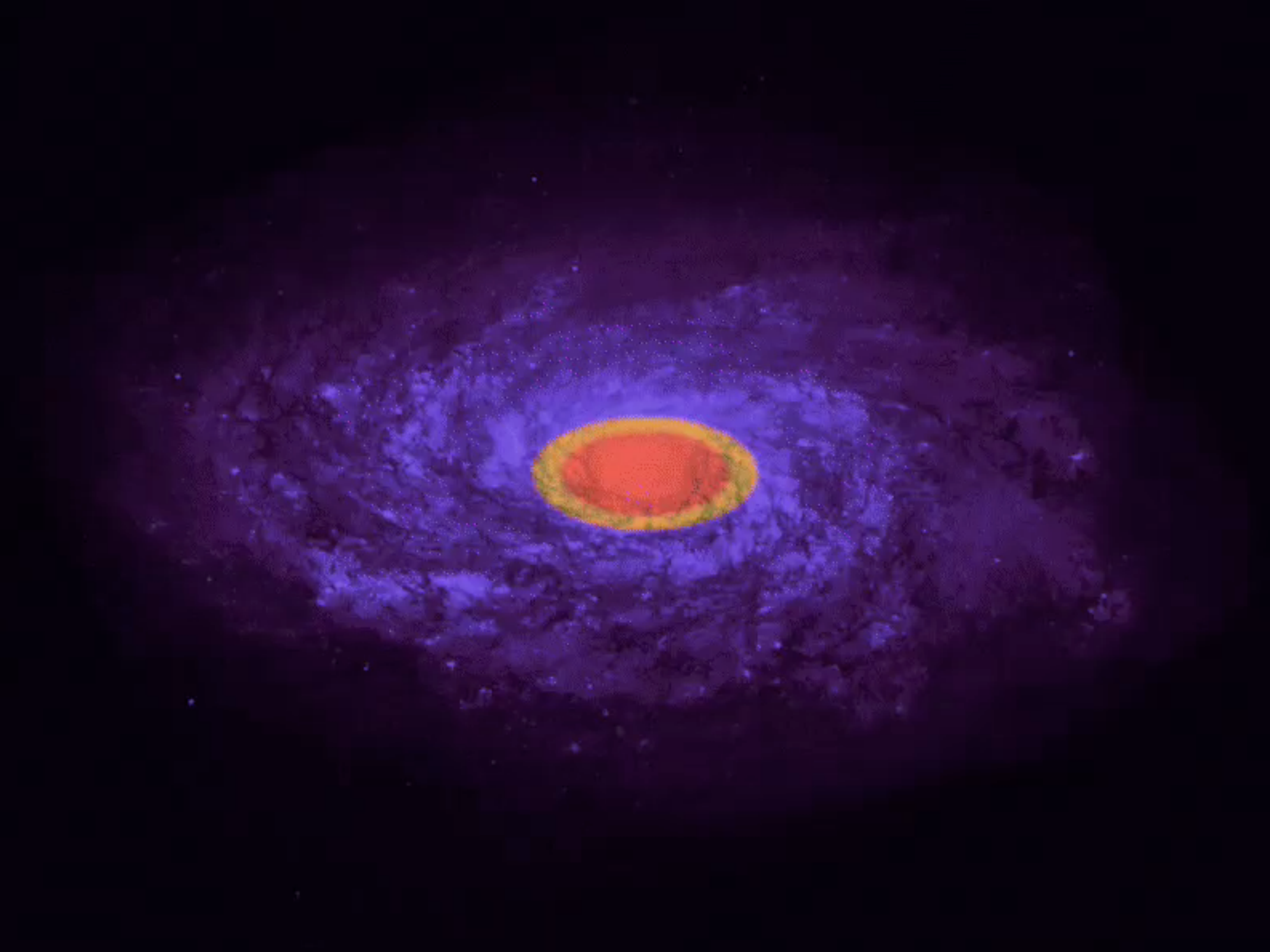
ZONA HABITÁVEL

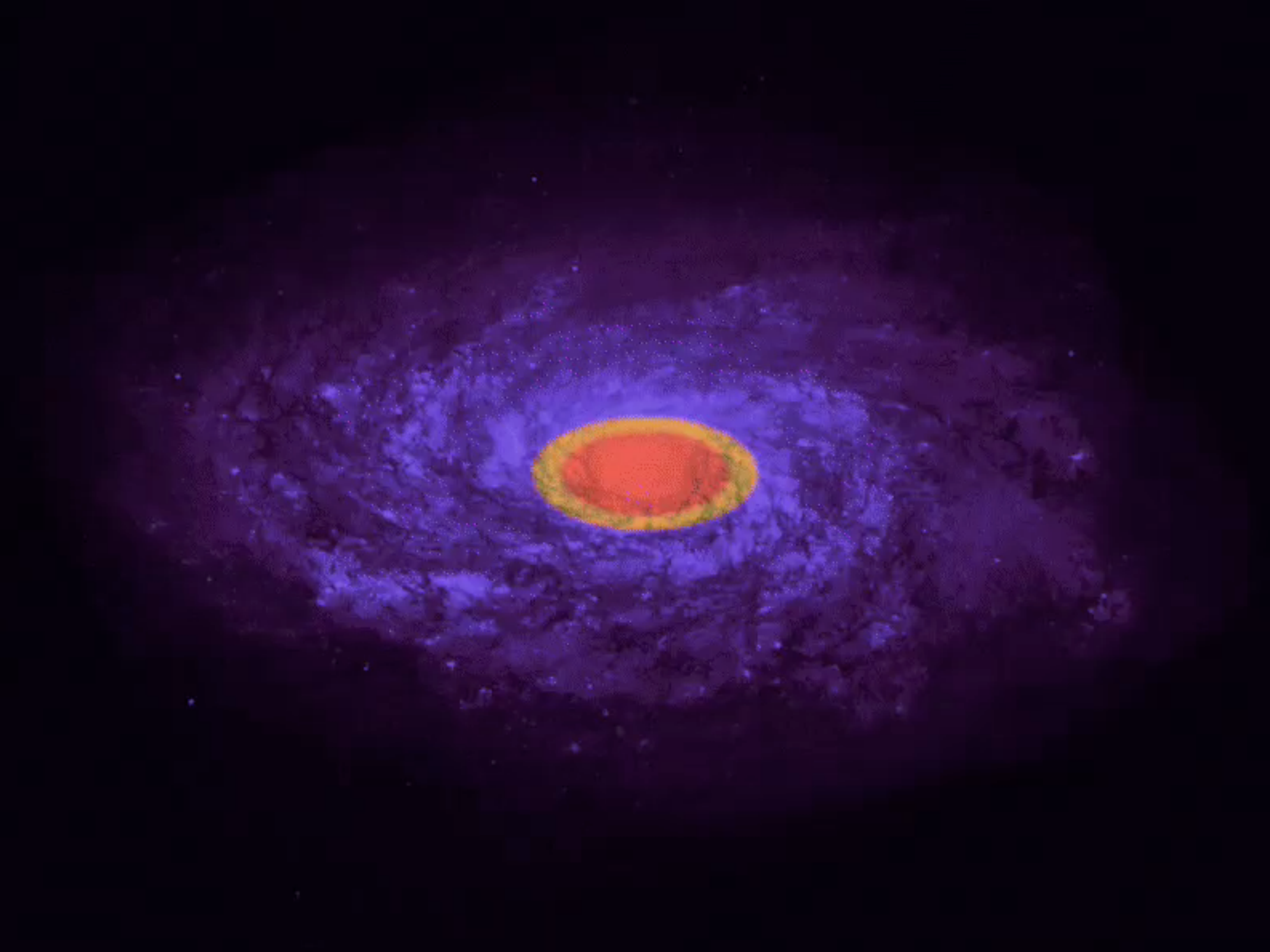
$$P_{ZH} = \int_0^{R_{Gal}} \int_0^{H_{oje}} P(r, t) dr dt$$



Ref.: Lineweaver et al., Science, 303, 59 (2004)

Carlos Alexandre Wuensche (2019)







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



Formação de Galáxias → Habitabilidade

- ☑ Evolução galáctica em seus primórdios
 - ✓ Formação estelar → poeira e moléculas → química complexa
- ☑ CNO sintetizados por estrelas em galáxias jovens permitiram o aparecimento dos “tijolos” da química orgânica desde que o Universo tinha cerca de 180 milhões de anos (*época* estimada pelo satélite Planck para o começo da reionização)
- ☑ Desenvolvimento de complexidade → VIDA (?!?!?!?!)



Three Levels of Habitability

- ☑ Biophylic Cosmos
- ☑ Galactic Habitable Zone
- ☑ Stellar Habitable Zone

THE GOLDBLOCK'S ZONE

- ☑ On the most basic level (planets)
 - ✓ in planetary systems: the Stellar Habitable Zone
- ☑ On the intermediate level (galaxies)
 - ✓ The Galactic Habitable Zone or galaxies as home for life



Three Levels of Habitability

- ☑ Biophylic Cosmos
- ☑ Galactic Habitable Zone
 - ✓ Galaxies as laboratories of complex chemistry
 - ✓ Galactic Habitable Zone
- ☑ Stellar Habitable Zone

THE GOLDBLOCK'S ZONE

- ☑ On the most basic level (planets)
 - ✓ in planetary systems: the Stellar Habitable Zone
- ☑ On the intermediate level (galaxies)
 - ✓ The Galactic Habitable Zone or galaxies as home for life



Um modelo de habitabilidade de galáxias

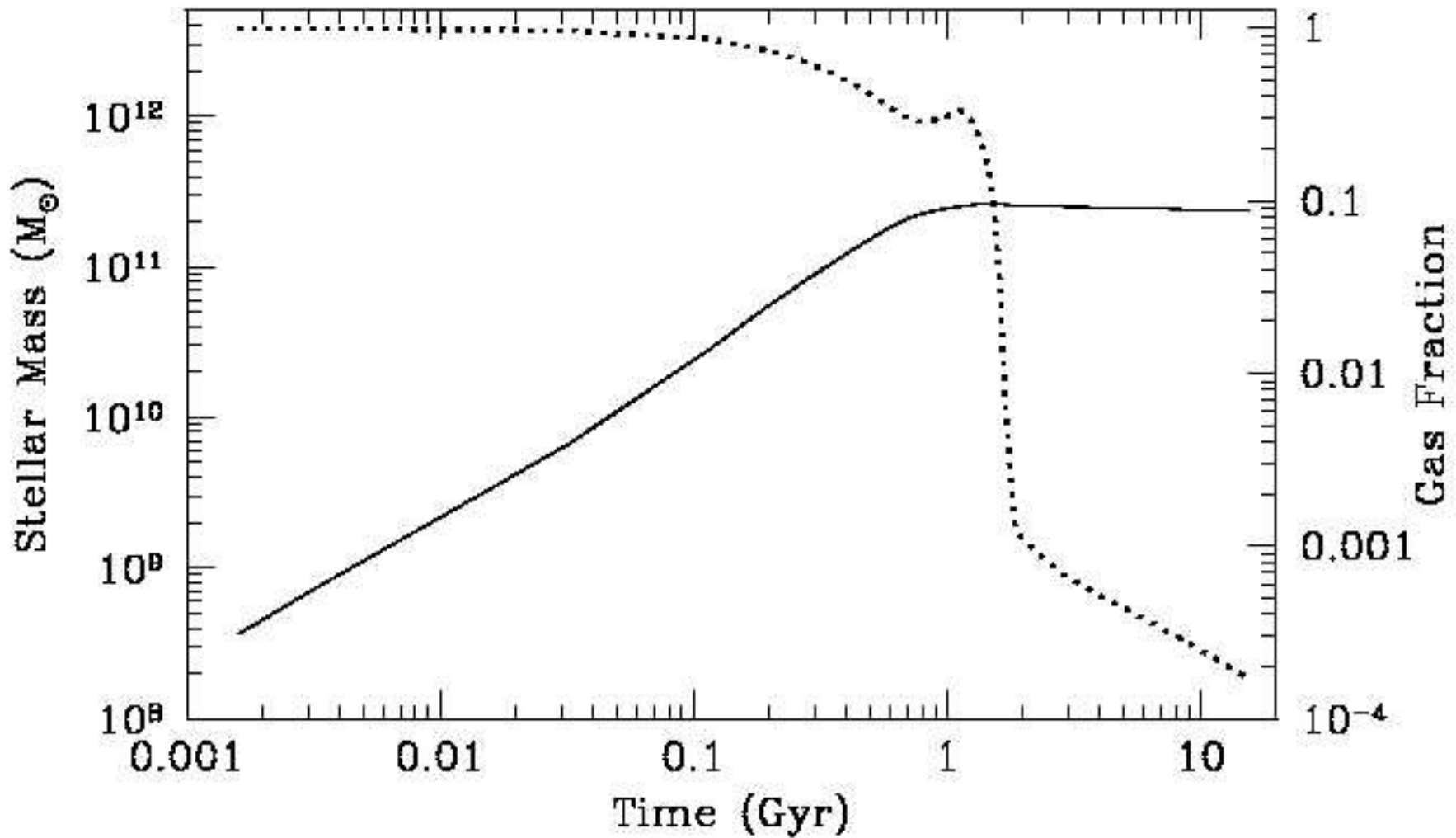
- ☑ Baseado em trabalho de Amácio Friaça (IAG/USP)
- ☑ Probabilidade de formação de condições biofílicas em galáxia espirais e elípticas
- ☑ Evolução e habitabilidade x catástrofes
- ☑ Números possivelmente desatualizados, mas equações e conceitos não estão! **Uma revisita aos cálculos seria interessante!**



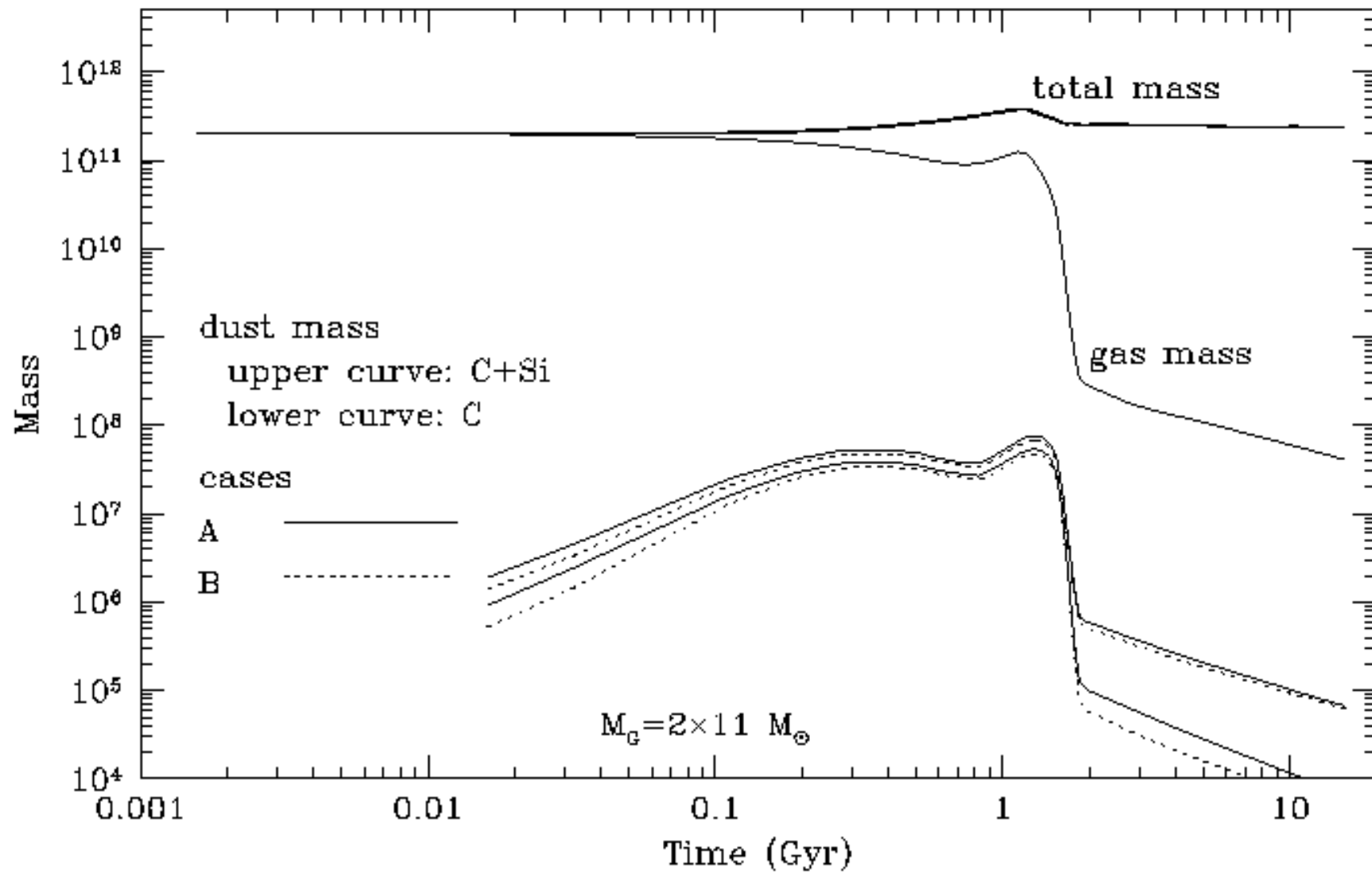
Example: dusty early spheroids (elliptical galaxies and bulges of spirals) complex chemistry as revealed by PAH lines

- ☑ Spheroids in formation resemble dusty starbursts
- ☑ Large amounts of dust produced in 0.1–0.3 Gyr
- ☑ Reprocessing of UV starlight into local FIR
- ☑ Rest-frame FIR redshifted to submm/mm
- ☑ Lines of PAHs (rest-frame MIR)
 - ✓ Features at 3.3, 6.2, 7.7, 8.6 and 11.3 μm due to C–H and C–C bounds
 - ✓ Intensity of the features sets ages for the starburst in the 0.03–1 Gyr range

(Guimarães e Friaça 2004)



A quantidade de material disponível decresce com a evolução do Universo



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



A Zona Habitável Galáctica

☑ Definida por P_{GHZ}

- ✓ 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).

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



Probability of Forming Rock Planets

Defined by P_{metals} , highly sensitive to the metallicity* Z

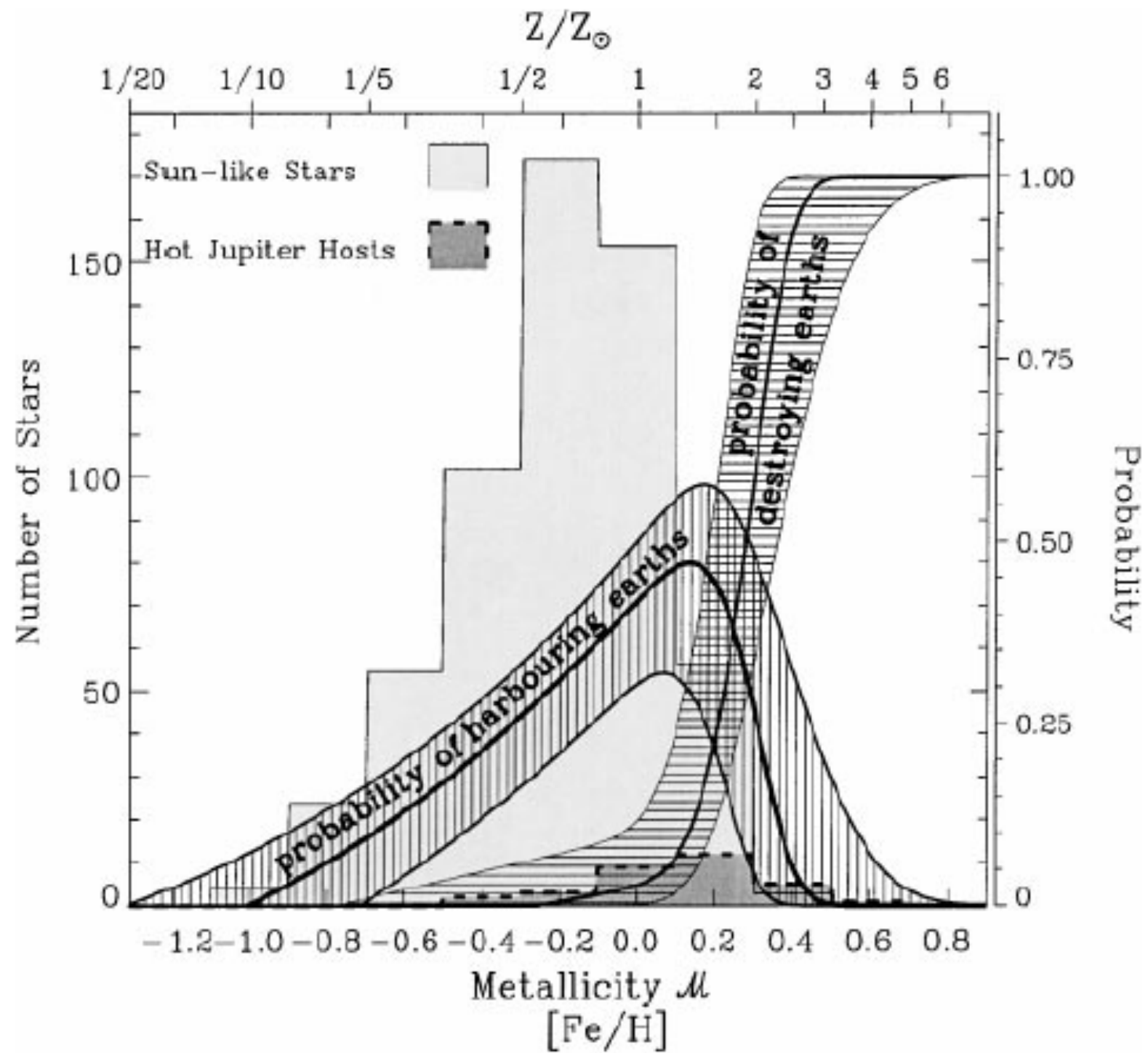
- ☑ Probability of destroying Earths (parameter Z_{DE})
- ☑ Probability of producing Earths (parameter Z_{PE})
- ☑ Probability of harboring Earths ($P_{HE}=P_{\text{metals}}$)

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

*Metals= for astrophysics every element heavier than He

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

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





Probability of Evolution over Biological Timescales

Defined by P_{evol}

- ☑ Darwin's Theory requires long timescales
- ☑ P_{evol} depends on t_{evol}
- ☑ For Earth $t_{\text{evol}} = 4 \text{ Gyr}$
- ☑ t_{evol} could be shorter than 4 Gyr?



Probability of Survival to Galactic Violent Events

Defined by P_{SN}

- ☑ Normalization to Earth?
- ☑ P_{evol} depends on past events through t_{SN}
- ☑ For Earth, $t_{\text{SN}} = t_{\text{evol}} = 4 \text{ Gyr}$
- ☑ Again, t_{SN} could be shorter than 4 Gyr
- ☑ Other Killers: Gamma-Ray Bursts (GRB), Giant Molecular Clouds (GMC), Active Galactic Nuclei (AGN)



Probabilities for the GHZ

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

- ☑ Probability of star formation rate: typically 1 Solar Mass/year
- ☑ Probability of Forming Rock Planets (P_{metals})
 - ✓ Highly sensitive to the metallicity
 - ✓ Probability of destroying, producing and harboring Earths
- ☑ Probability of Evolution over Biological Timescales (P_{evol})
 - ✓ Darwin's theory requires long timescales
 - ✓ P_{evol} depends on t_{evo} ($t_{\text{evol}} = 4$ Gyr for life on Earth. Could it be shorter?)
- ☑ Probability of Survival to Galactic Violent Events (P_{SN})
 - ✓ P_{evol} depends on past events through t_{SN}
 - ✓ Other killers: GRB, GMC < AGN





O modelo do disco

☑ Modelo químico multi-zonas e duplo “infall”

✓ taxa de formação estelar

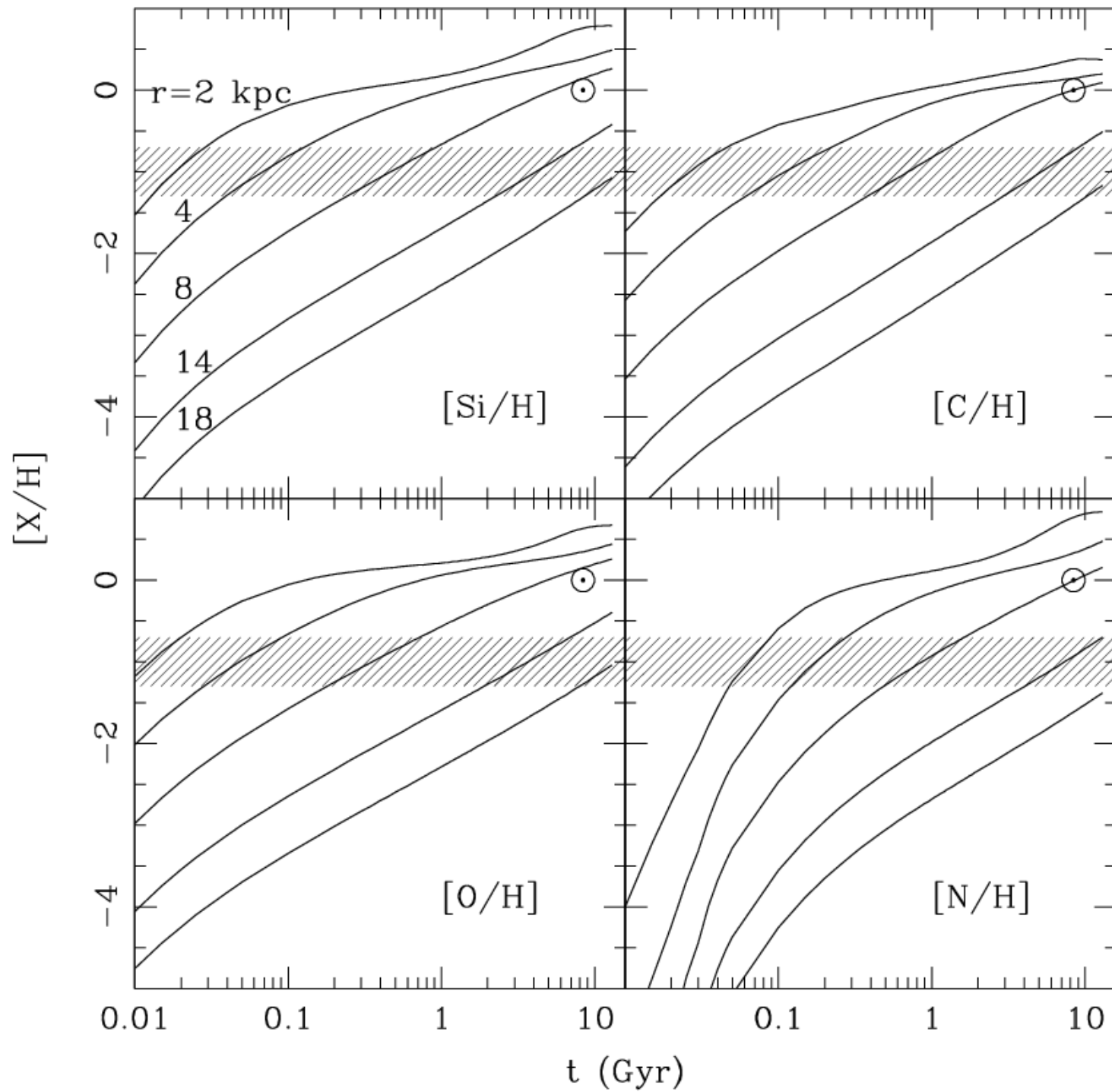
$$\Psi(rat) = \tilde{\nu} \left[\frac{\sigma(r, t)}{\tilde{\sigma}(\tilde{r}, t)} \right]^{2x_{SF}} \left[\frac{\sigma(r, t_G)}{\sigma(r, t)} \right]^{x_{SF}} G(rat)^{x_{SF}+1}$$

☑ Taxa de infall (disco fino)

$$\propto e^{-t/r_D}$$

$$\tau_D(r_D) = 1 + 7/6(r - 2), \text{ para } 2 \leq r \leq 8 \text{ kpc}$$

$$\tau_D(r_D) = 8 + 0,5(r - 8), \text{ para } r \geq 8 \text{ kpc}$$





A Zona Habitável Galáctica

☑ Caso “centrado na Terra, também definido por

P_{GHZ}

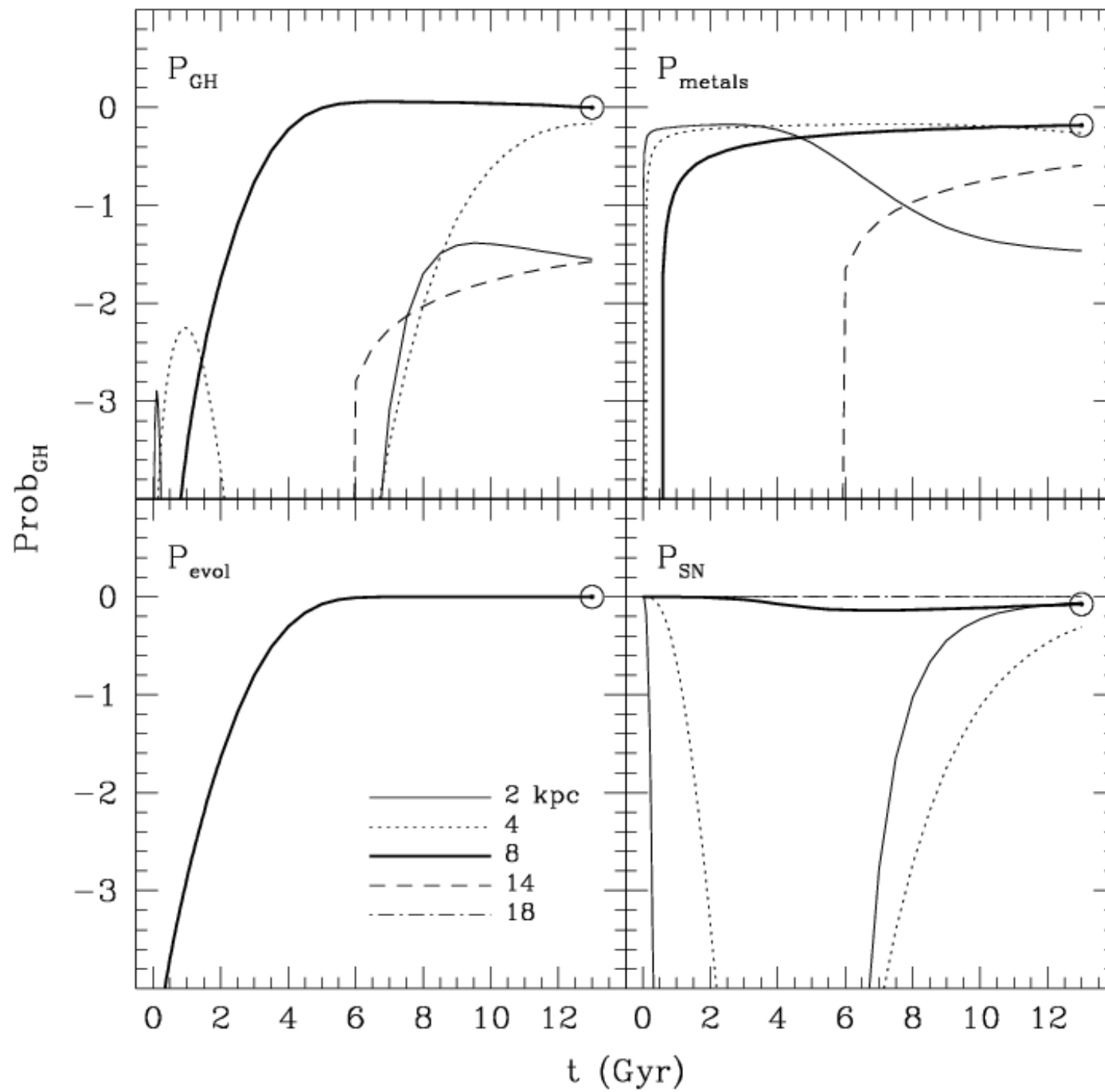
✓ $P_{\text{metais}}: -1,0 < Z_{\text{DE}} < 3,0$

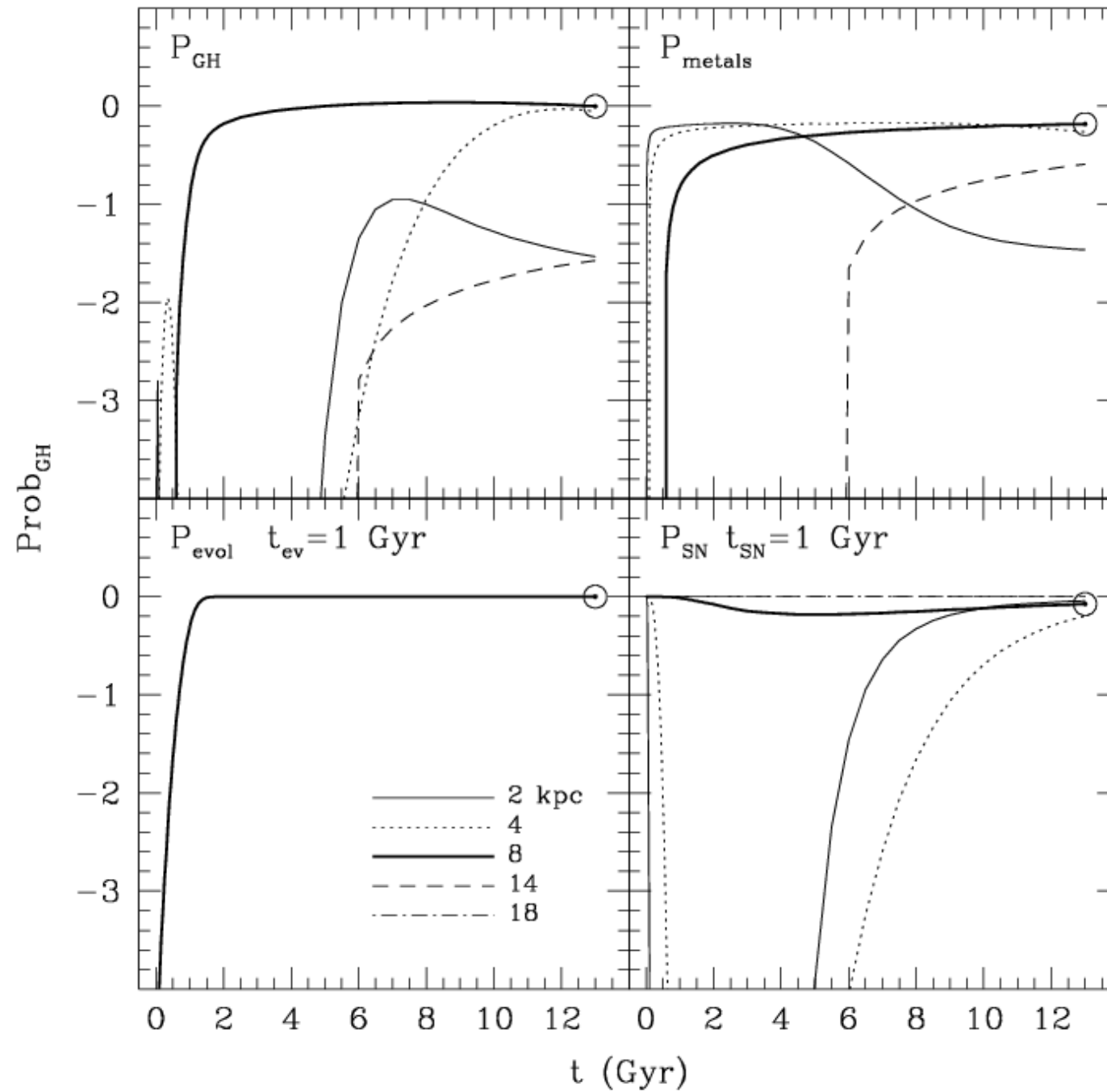
✓ $P_{\text{evol}}: t_{\text{evol}} = 4 \times 10^9 \text{ anos}$

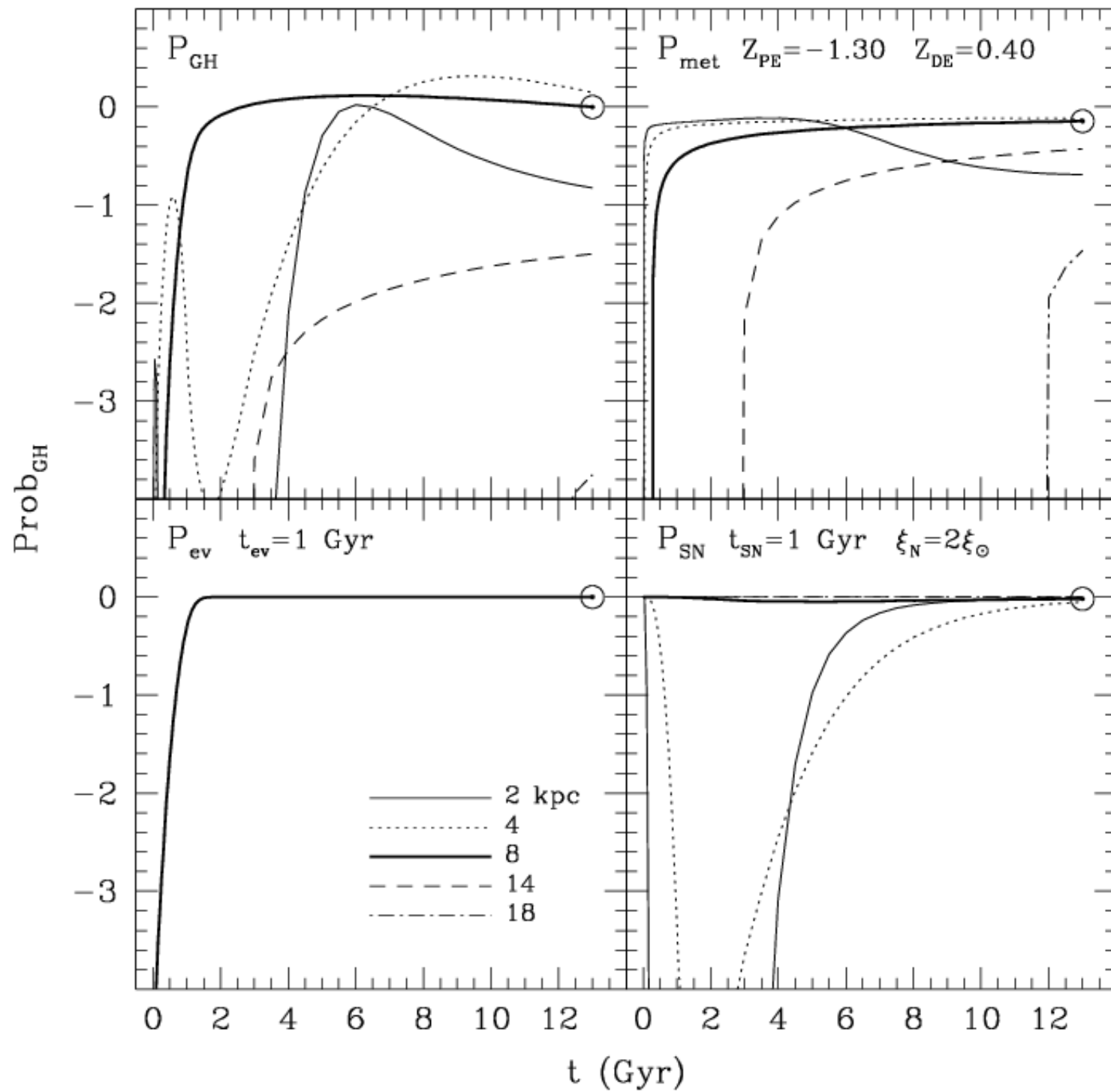
✓ $P_{\text{SN}}: t_{\text{SN}} = 4 \times 10^9 \text{ anos}, P_{\text{SN}}(2 N_{\text{sol}}) = 0,5$

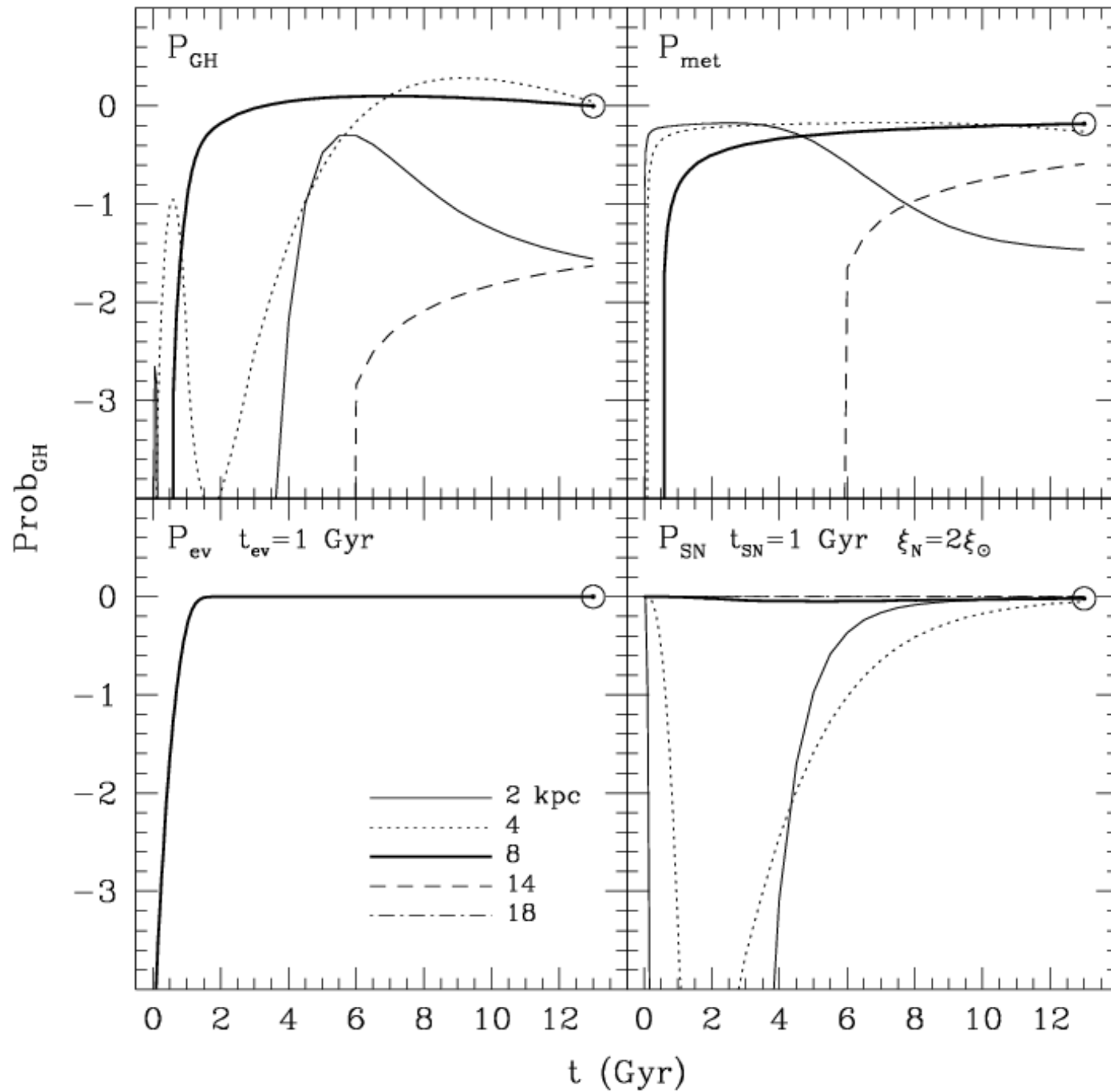
✓ Normalizado para o Sol ($r = 8 \text{ kpc}, t = 13 \times 10^9 \text{ anos}$)

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







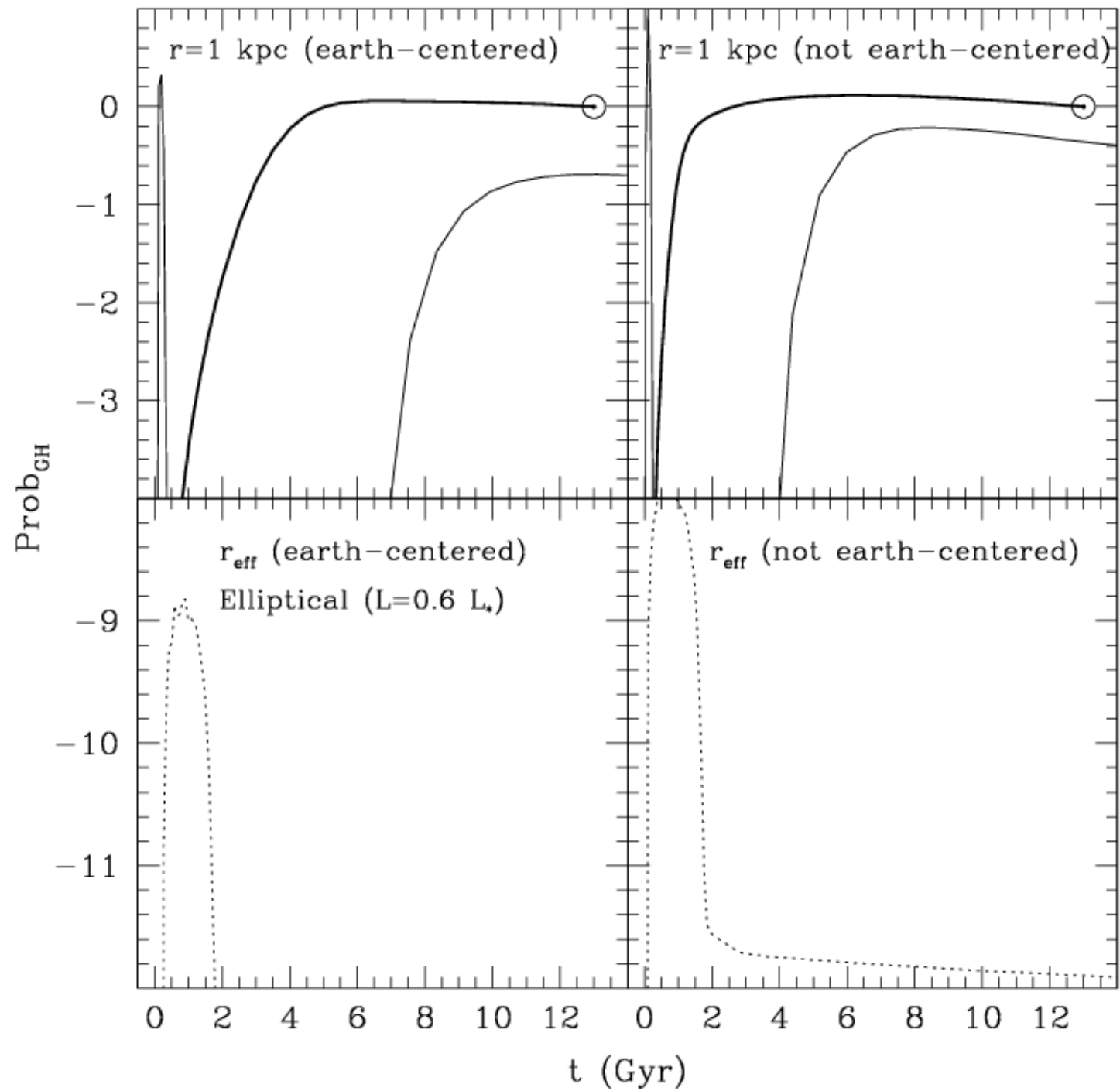






Spheroid (Elliptical Galaxy) The Chemodynamical Model

- ☑ **Multi-zone chemical evolution solver**
 - ✓ + hydrodynamical code
- ☑ **Chemodynamical approach**
 - chemical evolution of the gas
+ dynamical state of the gas (inflow/outflow)
 - star formation history even after galactic winds
 - spatial variations in age and metallicity
- ☑ **Bright Elliptical Galaxy: $2 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$**





Perspectives

- ☑ Disks seem to be biophilic environments
- ☑ In spheroids, conditions are or too harsh or too barren
- ☑ In elliptical galaxies, the central regions could be biophilic
- ☑ The inner regions of the Galaxy (between the solar radius and 2 kpc) are biophilic
- ☑ Care should be taken against to be too earth-centered



Habitabilidade

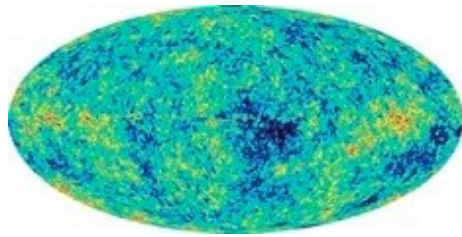
- ☑ Condições para o surgimento da vida:
desenvolvimento da complexidade
 - ✓ química complexa
 - ✓ longos períodos de tempo
 - ✓ massa prebiótica crítica.
- ☑ Condições de sobrevivência a catástrofes de
origem geológica ou astronômica.



A busca astronômica das origens



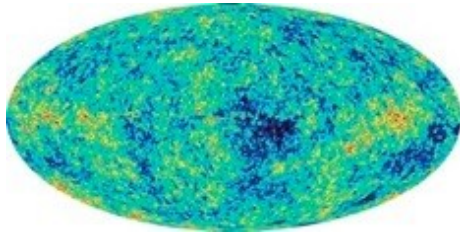
A busca astronômica das origens



Big Bang



A busca astronômica das origens

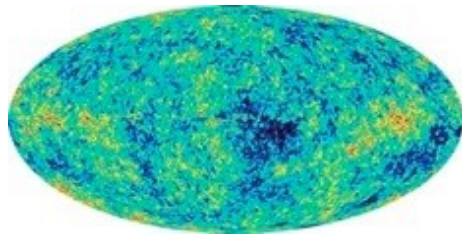


Big Bang



Primeiras
galáxias se
formam

A busca astronômica das origens



Big Bang



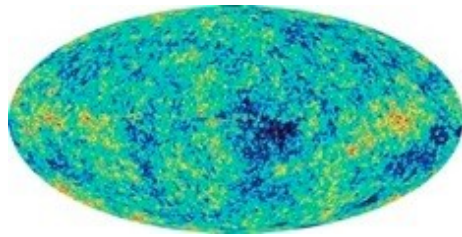
Primeiras
galáxias se
formam



Estrelas se formam



A busca astronômica das origens



Big Bang



Primeiras
galáxias se
formam



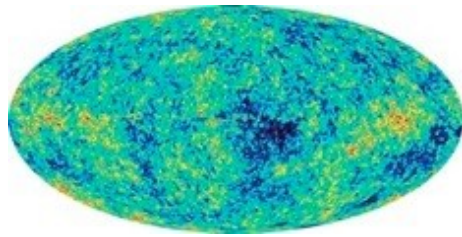
Estrelas se formam



Galáxias evoluem



A busca astronômica das origens



Big Bang



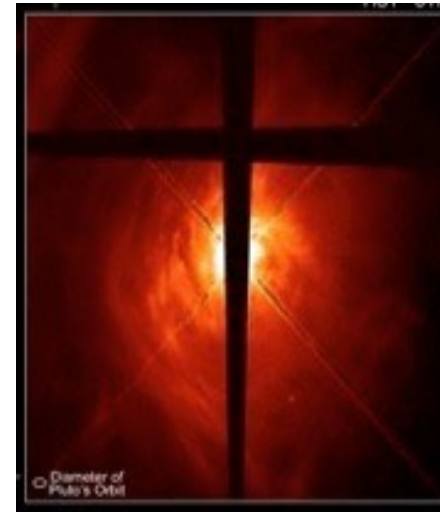
Primeiras
galáxias se
formam



Estrelas se formam



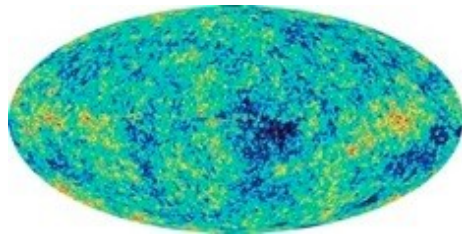
Galáxias evoluem



Planetas se
formam



A busca astronômica das origens

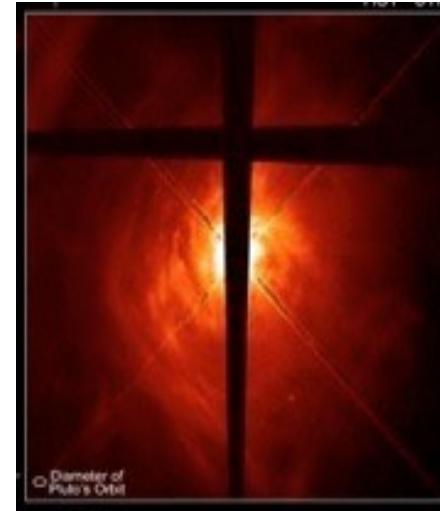


Big Bang

Planetas hoje



Planetas se formam



Primeiras galáxias se formam



Estrelas se formam



Galáxias evoluem



VIDA



VIDA

Não necessariamente inteligente...





A origem da Tabela Periódica

H B																He B															
Li C	Be C																B C	C S L	N S L	O S L	F L	Ne S L									
Na L	Mg L																Al \$ L	Si \$ L	P L	S S L	Cl L	Ar L									
K L	Ca L	Sc L	Ti \$ L	V \$ L	Cr L	Mn L	Fe \$ L	Co \$	Ni \$	Cu L	Zn L	Ga \$	Ge \$	As L	Se \$	Br \$	Kr \$														
Rb \$	Sr L	Y L	Zr L	Nb L	Mo \$ L	Tc L	Ru \$ L	Rh \$	Pd \$ L	Ag \$ L	Cd \$ L	In \$ L	Sn \$ L	Sb \$	Te \$	I \$	Xe \$														
Cs \$	Ba L																Hf \$ L	Ta \$ L	W \$ L	Re \$	Os \$	Ir \$	Pt \$	Au \$	Hg \$ L	Tl \$ L	Pb \$	Bi \$	Po \$	At \$	Rn \$
Fr \$	Ra \$																La L	Ce L	Pr \$ L	Nd \$ L	Pm \$ L	Sm \$ L	Eu \$	Gd \$	Tb \$	Dy \$	Ho \$	Er \$	Tm \$	Yb \$ L	Lu \$
																	Ac \$	Th \$	Pa \$	U \$	Np \$	Pu \$	Am M	Cm M	Bk M	Cf M	Es M	Fm M	Md M	No M	Lr M

B

Big Bang

L

Large stars

\$

Super-novae

C

Cosmic rays

S

Small stars

M

Man-made

Credit: Wikipedia: Cmglee

Credit: Wikipedia: Cmglee

The Astronomer's Periodic Table

(Ben McCall)

H

He

Mg

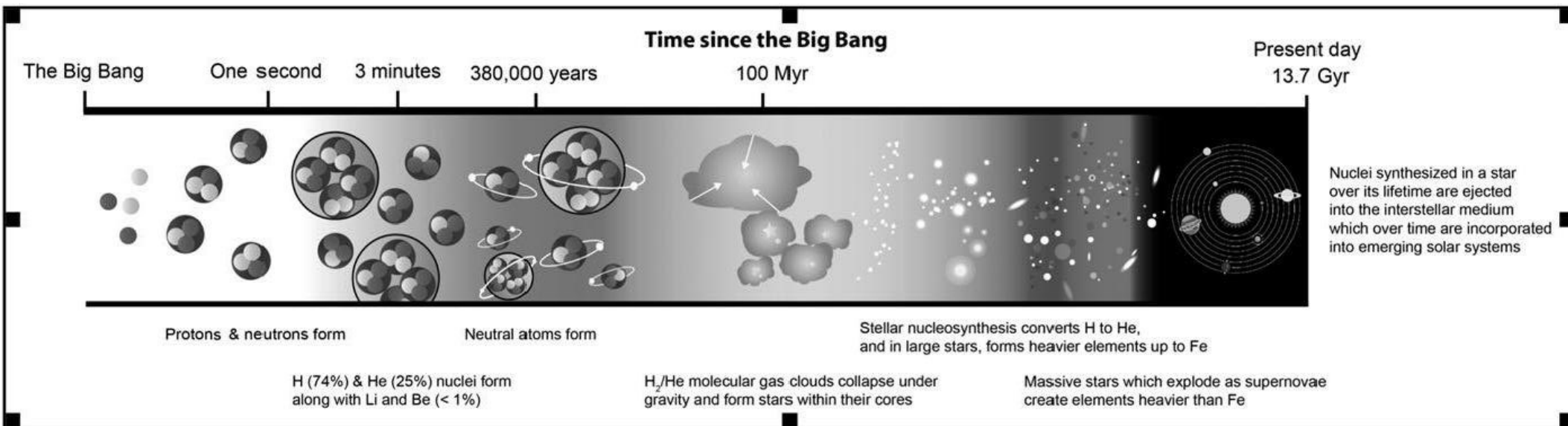
Fe

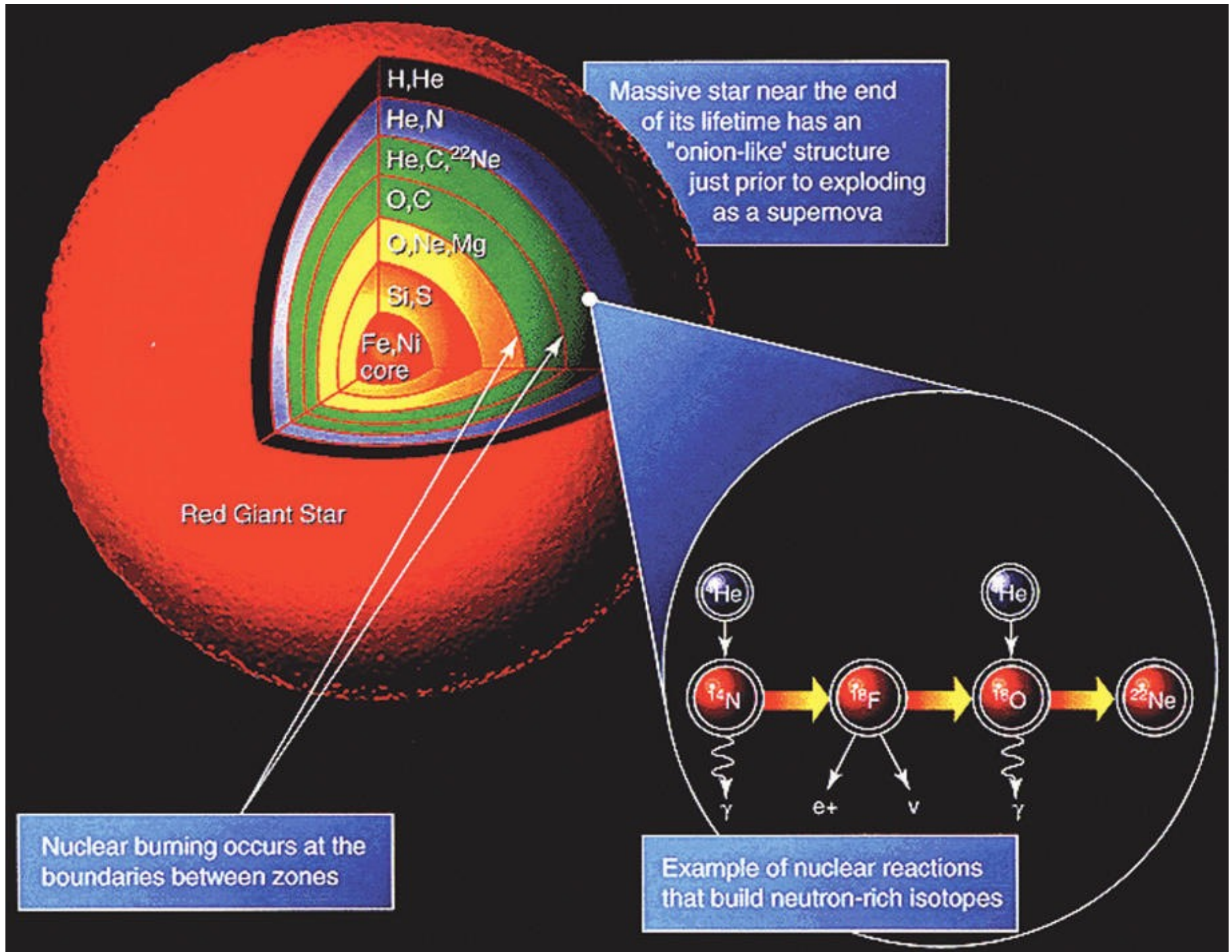
C N O Ne

Si S Ar

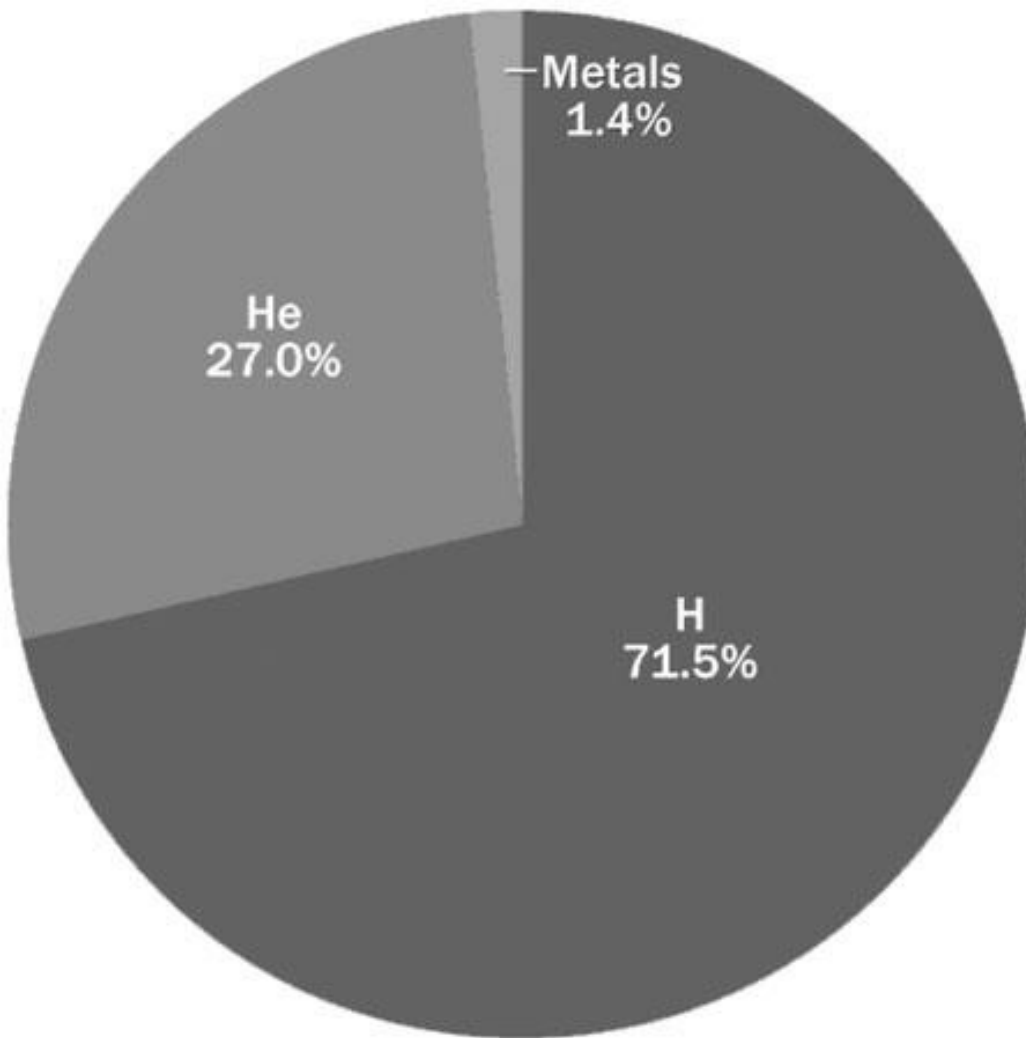
Courtesy Ben Mc Call

A cronologia do enriquecimento químico do Universo

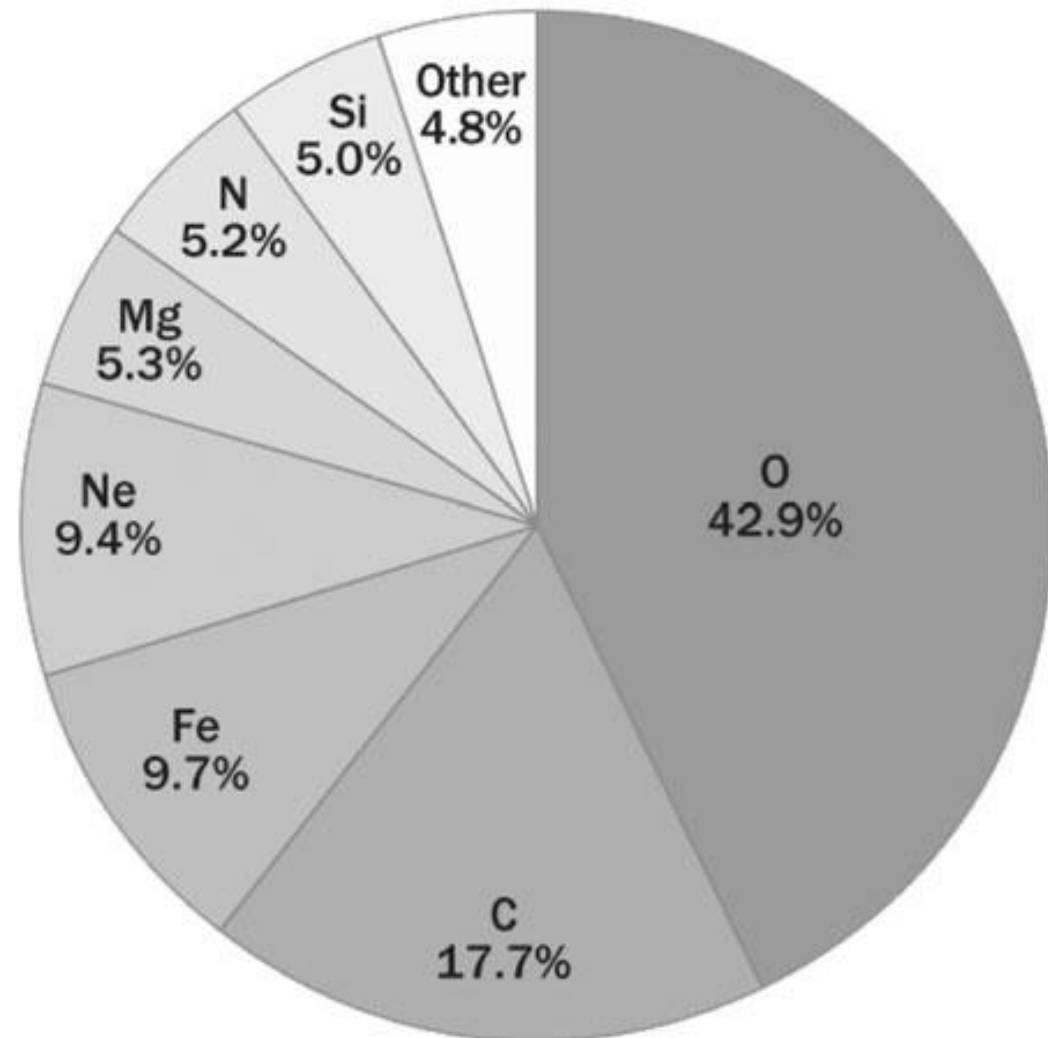




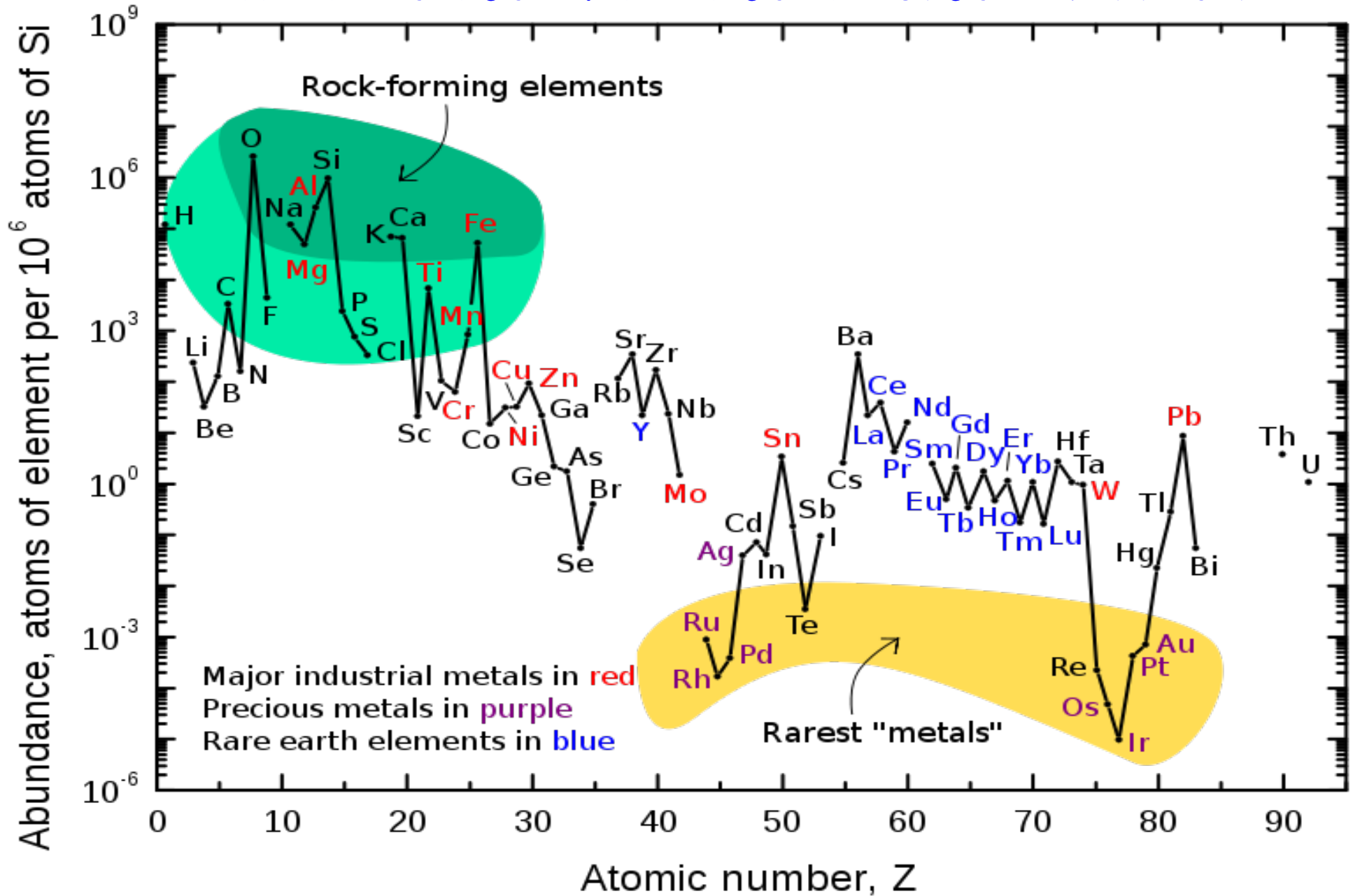
Total solar composition



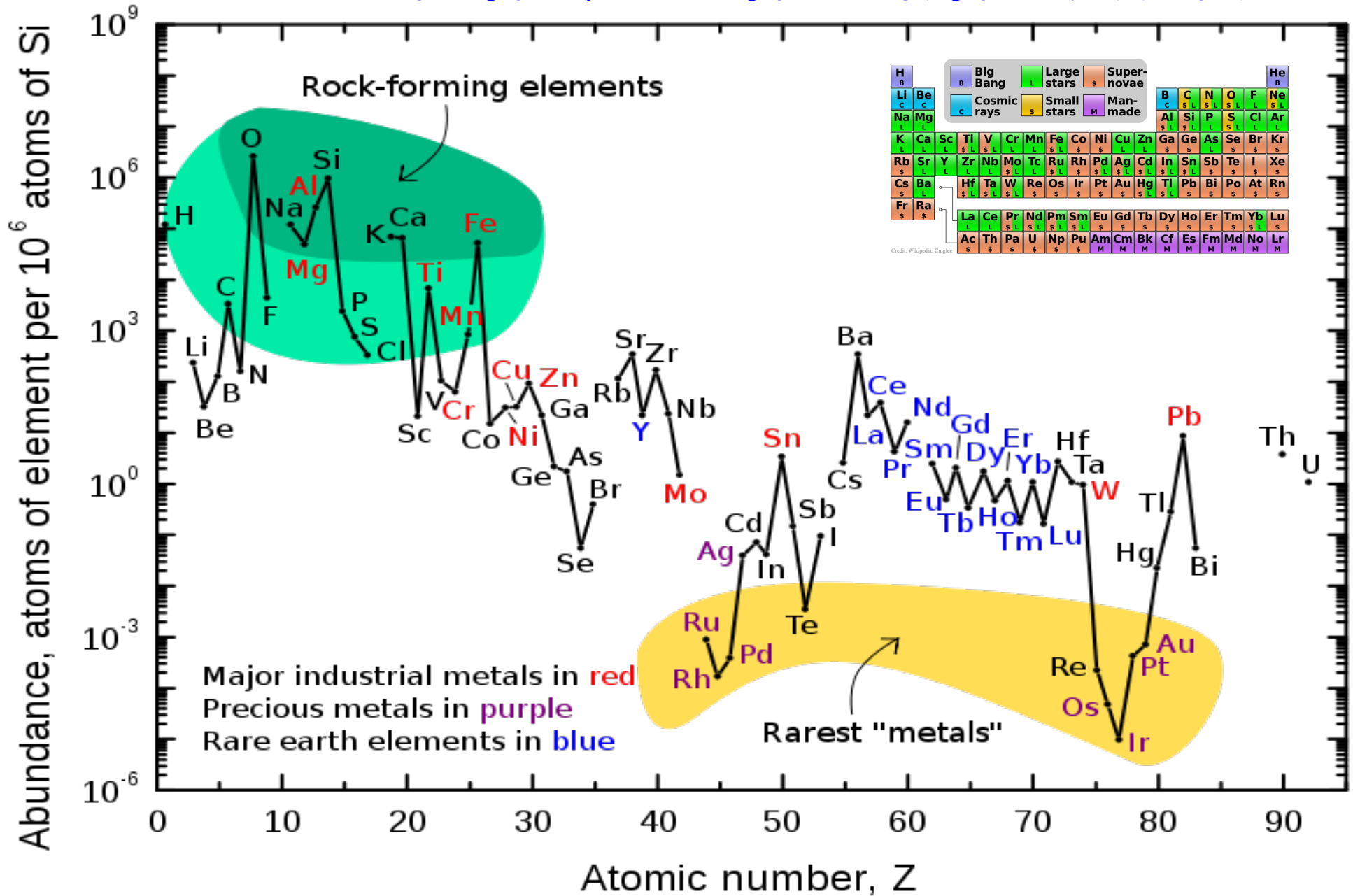
Metal composition



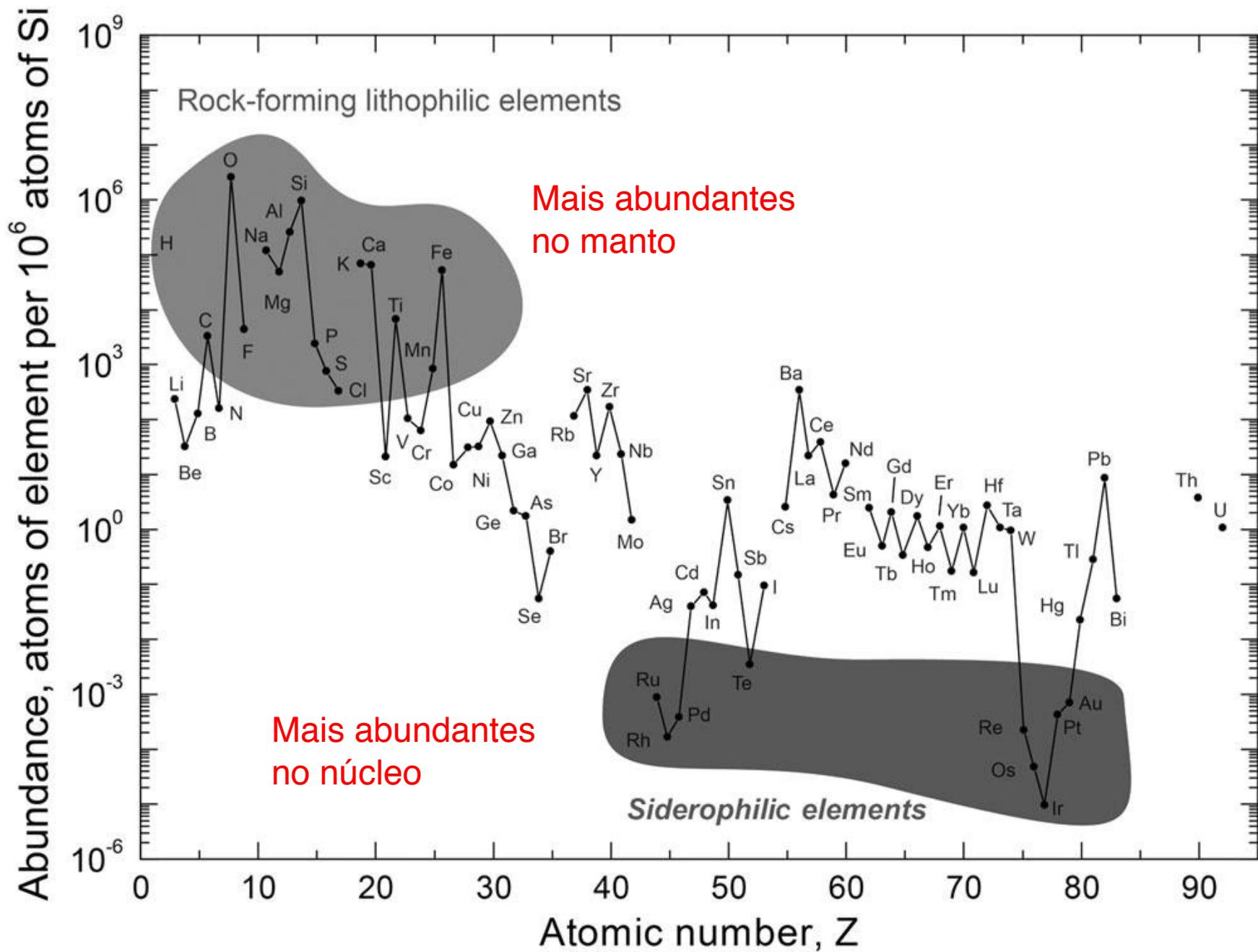
Abundâncias dos Elementos na Crosta Terrestre



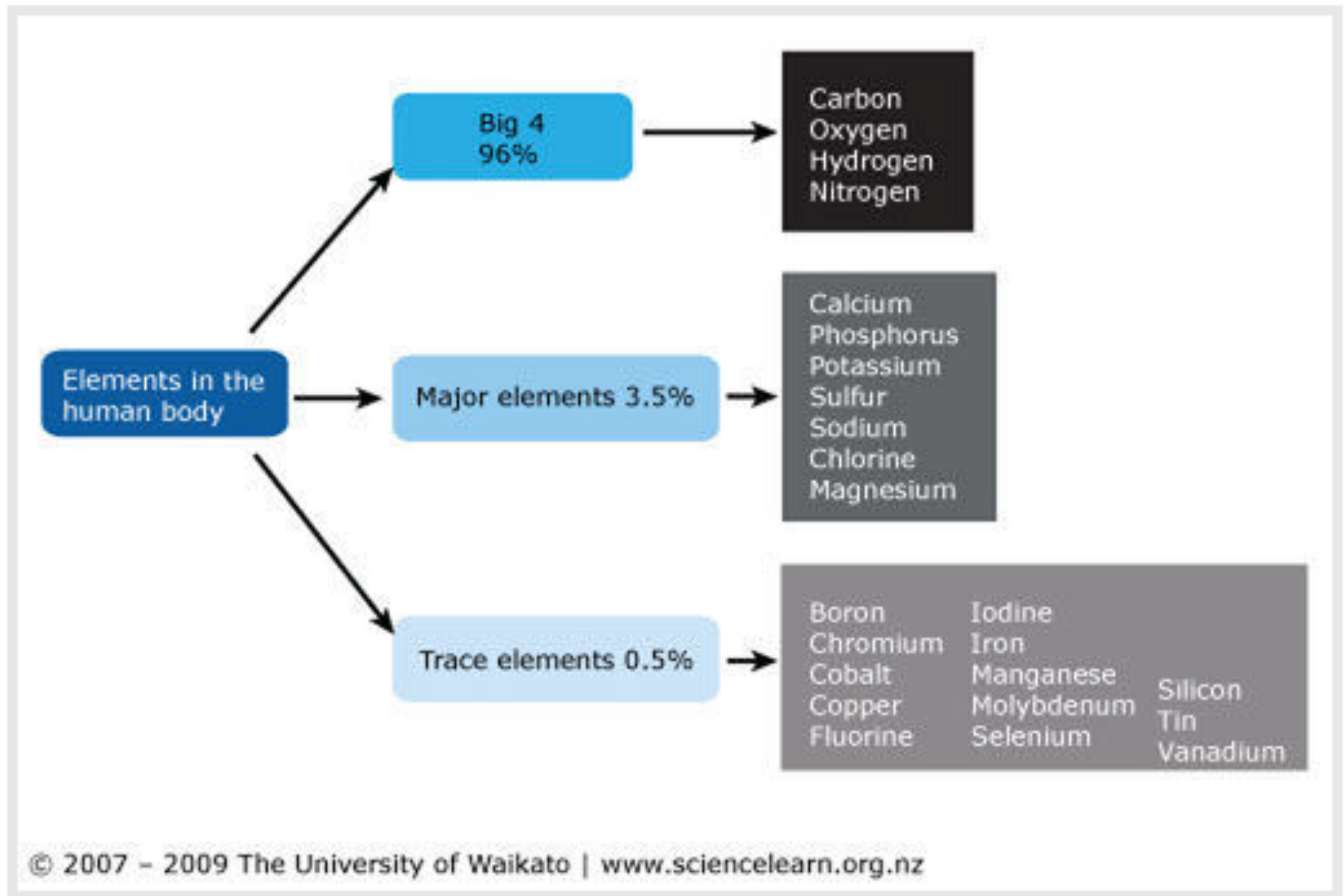
Abundâncias dos Elementos na Crosta Terrestre



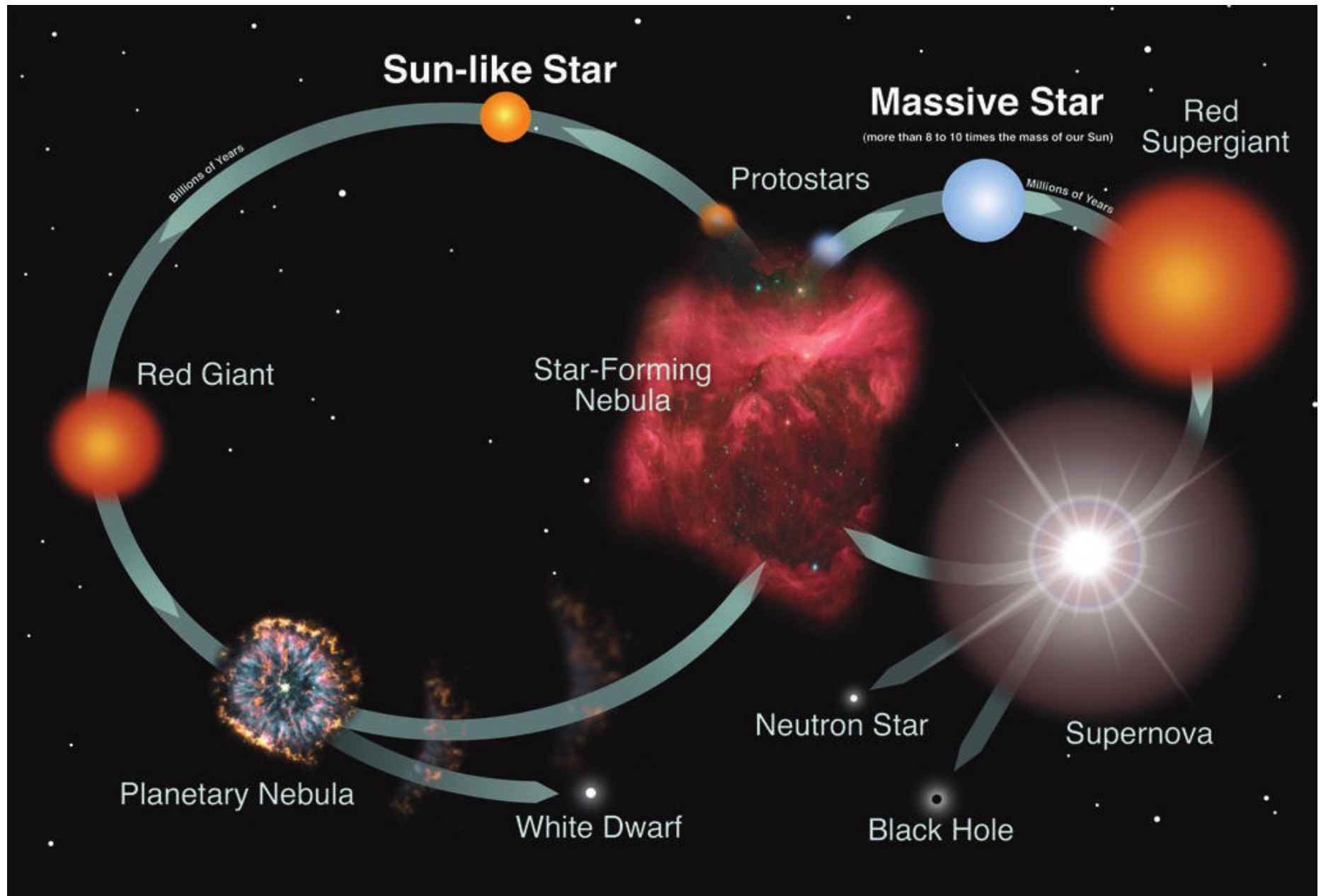
Abundâncias dos Elementos na Crosta Terrestre



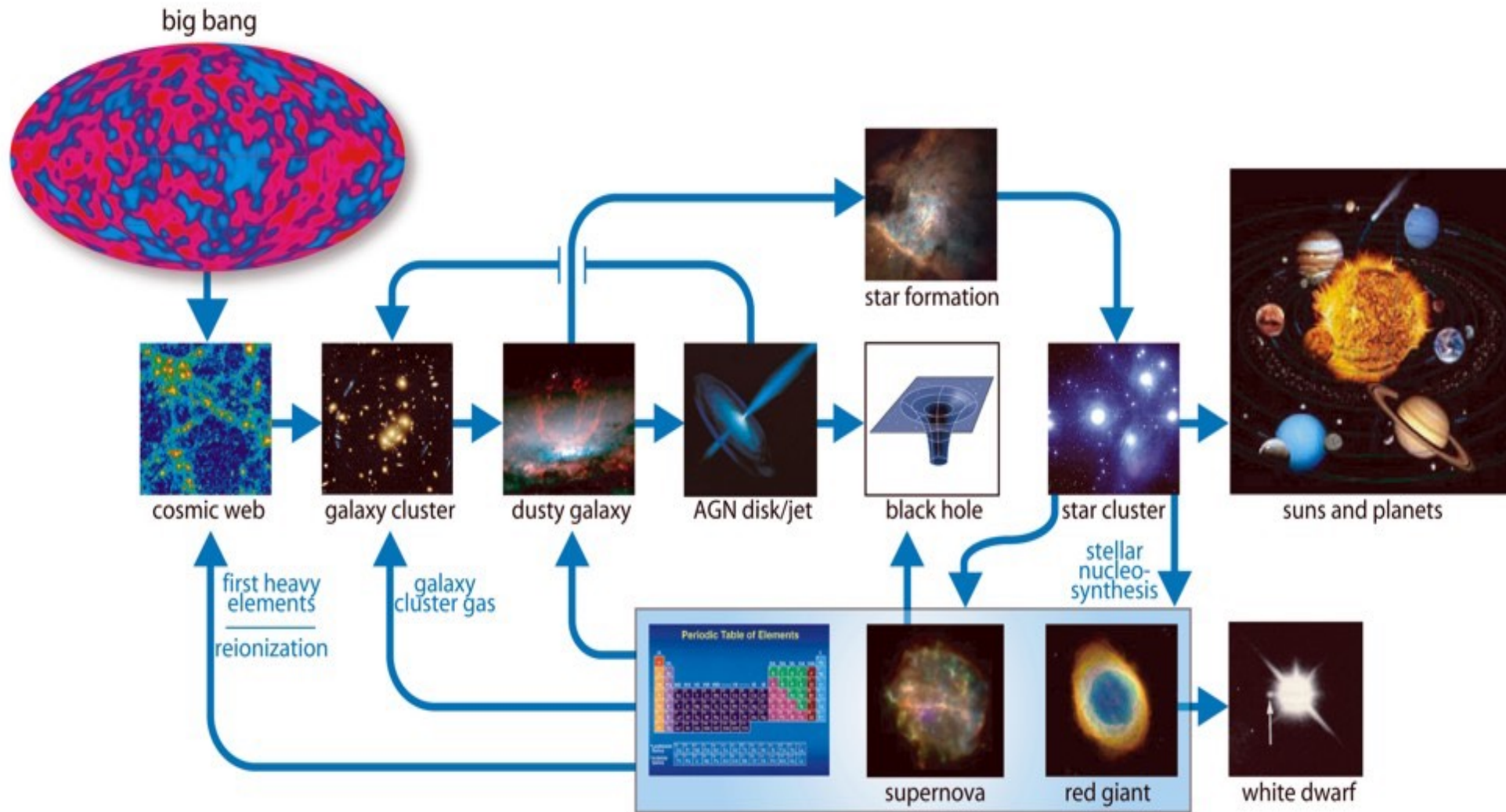
Nós e a química do Universo



O ciclo de vida estelar



SEU CYCLES OF MATTER AND ENERGY



Fonte: Beyond Einstein, GSFC/NASA (2003)



FIM DA AULA 2