

NEBULOSAS FOTOIONIZADAS E A EVOLUÇÃO QUÍMICA DAS GALÁXIAS DO GRUPO LOCAL

Walter J. Maciel

IAG/USP



RESUMO

Nebulosas fotoionizadas incluem regiões HII e nebulosas planetárias. Suas abundâncias químicas são determinadas com precisão, e podem dar importantes pistas sobre a nucleossíntese e evolução química das galáxias. Atualmente, existe uma grande quantidade de dados para estes objetos. Os principais elementos que podem ser estudados são He, C, e N, que são afetados pela evolução de estrelas de massa intermediária, e O, Ne, S, e Ar, que são produzidos essencialmente em estrelas de grande massa. Nesta palestra, vamos considerar alguns resultados recentes para esses elementos em nebulosas fotoionizadas do Grupo Local.

1. Formação e evolução de galáxias
2. Evolução química de galáxias
3. O que são nebulosas fotoionizadas
4. Motivação
5. Dados utilizados
6. Elementos que não são produzidos pelas estrelas de massa intermediária
7. Elementos que podem ser produzidos pelas estrelas de massa intermediária

1. Formação e evolução de galáxias



M31
Andromeda





SMC

Via Láctea

LMC

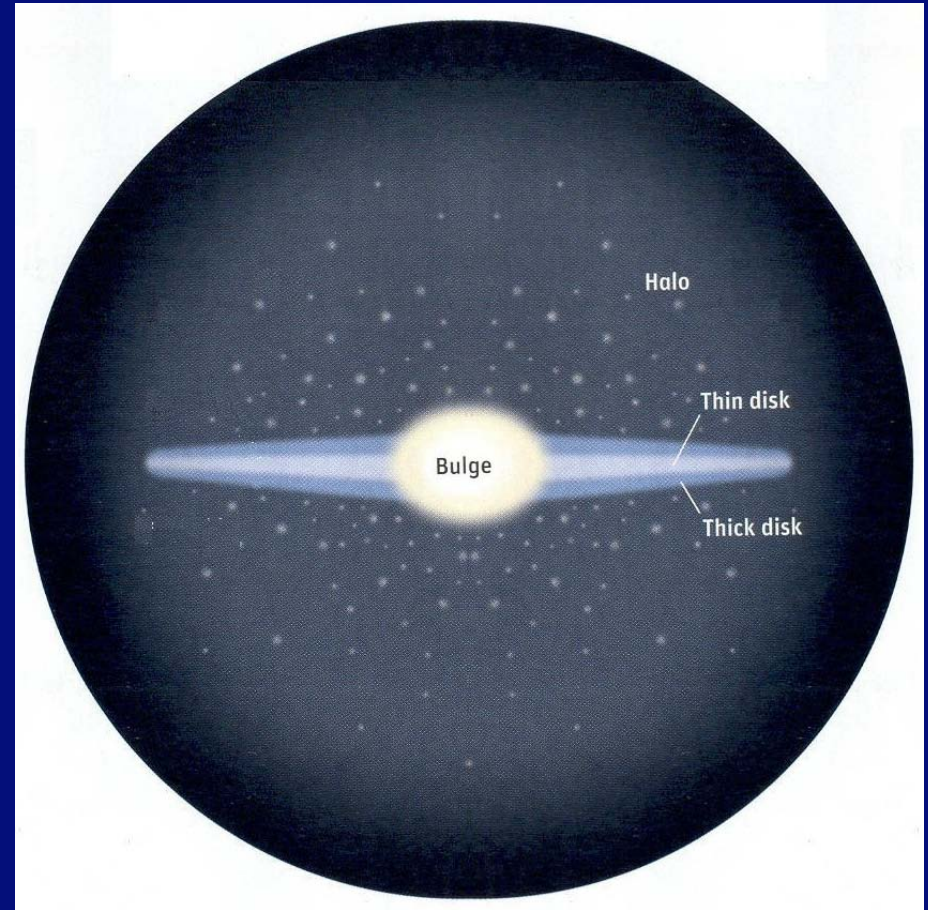
Cerro Tololo, Chile

LOCAL GALACTIC GROUP



No processo de formação de uma galáxia podemos distinguir dois aspectos:

- Evolução dinâmica
- Evolução química



2. Evolução química de galáxias

A evolução química das galáxias é o estudo das variações das abundâncias químicas em todas as regiões galácticas: disco, bojo e halo.

Modelos de evolução química devem considerar:

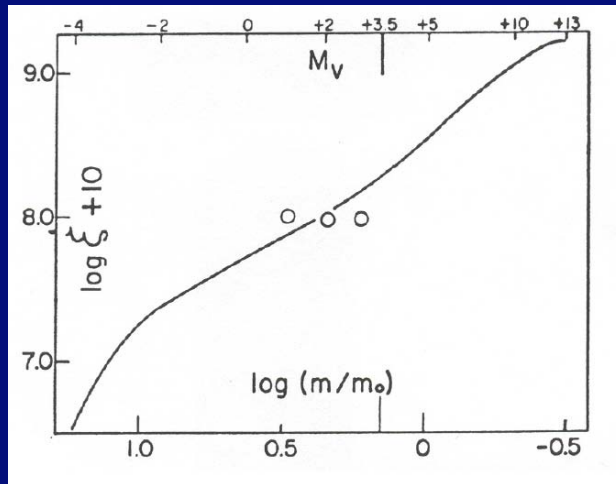
- ★ Processos de formação das estrelas
- ★ Vínculos observacionais
- ★ Nucleossíntese

★ Formação das estrelas

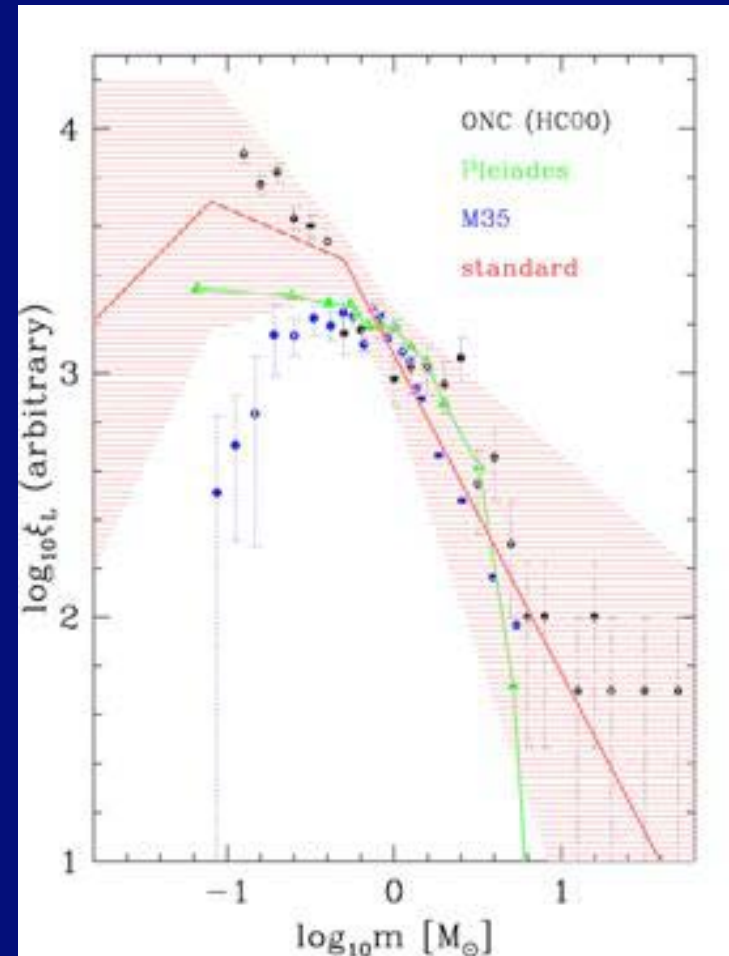
Modelos de evolução química usam dois parâmetros especialmente importantes:

- Função de massa inicial (IMF)
- Taxa de formação estelar (SFR, SFH).

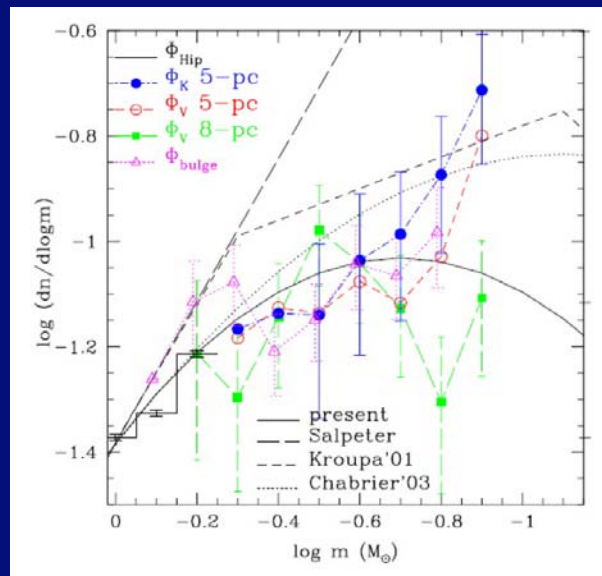
Função de massa inicial (IMF)



Salpeter (1955)

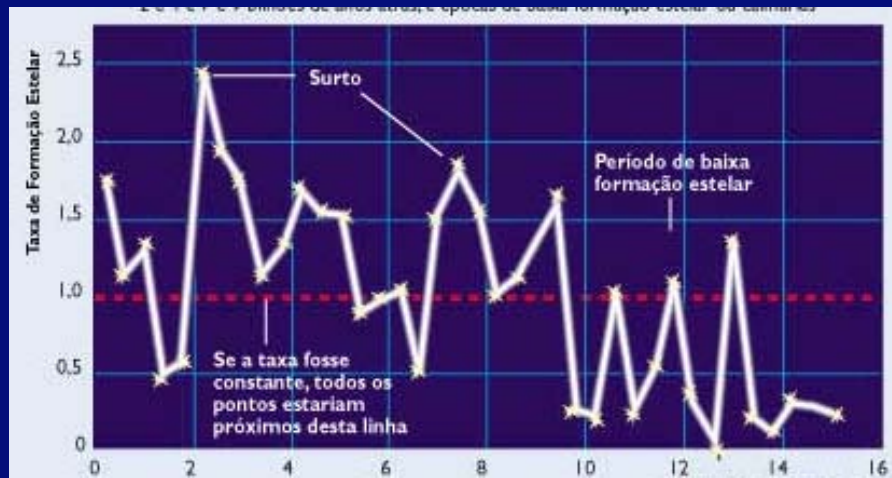


Kroupa (2002)

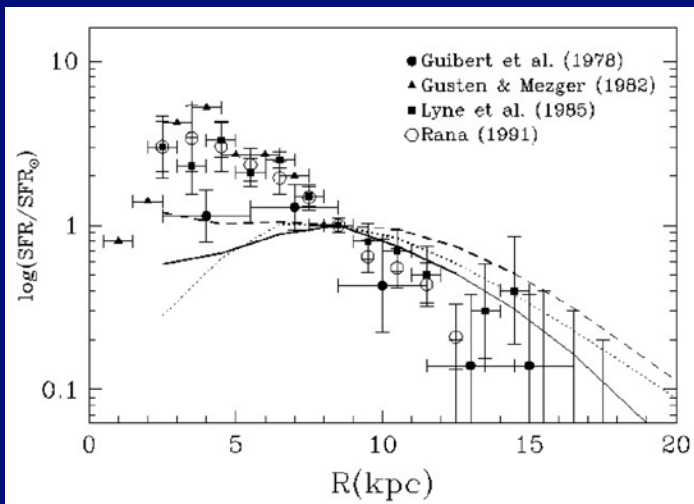


Chabrier (2005)

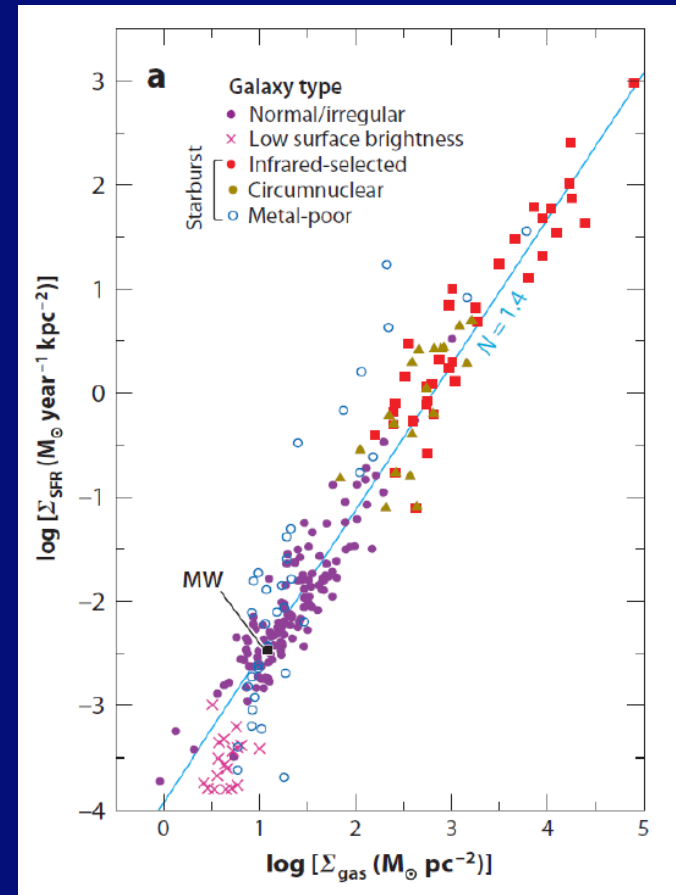
Taxa de formação estelar (SFR)



Rocha-Pinto & Maciel (2000)



Portinari & Chiosi (1999)



Kennicutt & Evans (2012)

★ Vínculos observacionais

O estudo da evolução química está baseado na existência de diversos vínculos observacionais, isto é, evidências observacionais que devem ser satisfeitas pelos modelos de evolução química.

Abundâncias: definições

$$\epsilon(X) = \log \frac{n_X}{n_H} + 12$$

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \epsilon(\text{Fe})_* - \epsilon(\text{Fe})_{\odot}$$

Valores solares

$$\epsilon(\text{He}) = 10.93$$

$$\frac{n_{\text{He}}}{n_{\text{H}}} \simeq 0.09$$

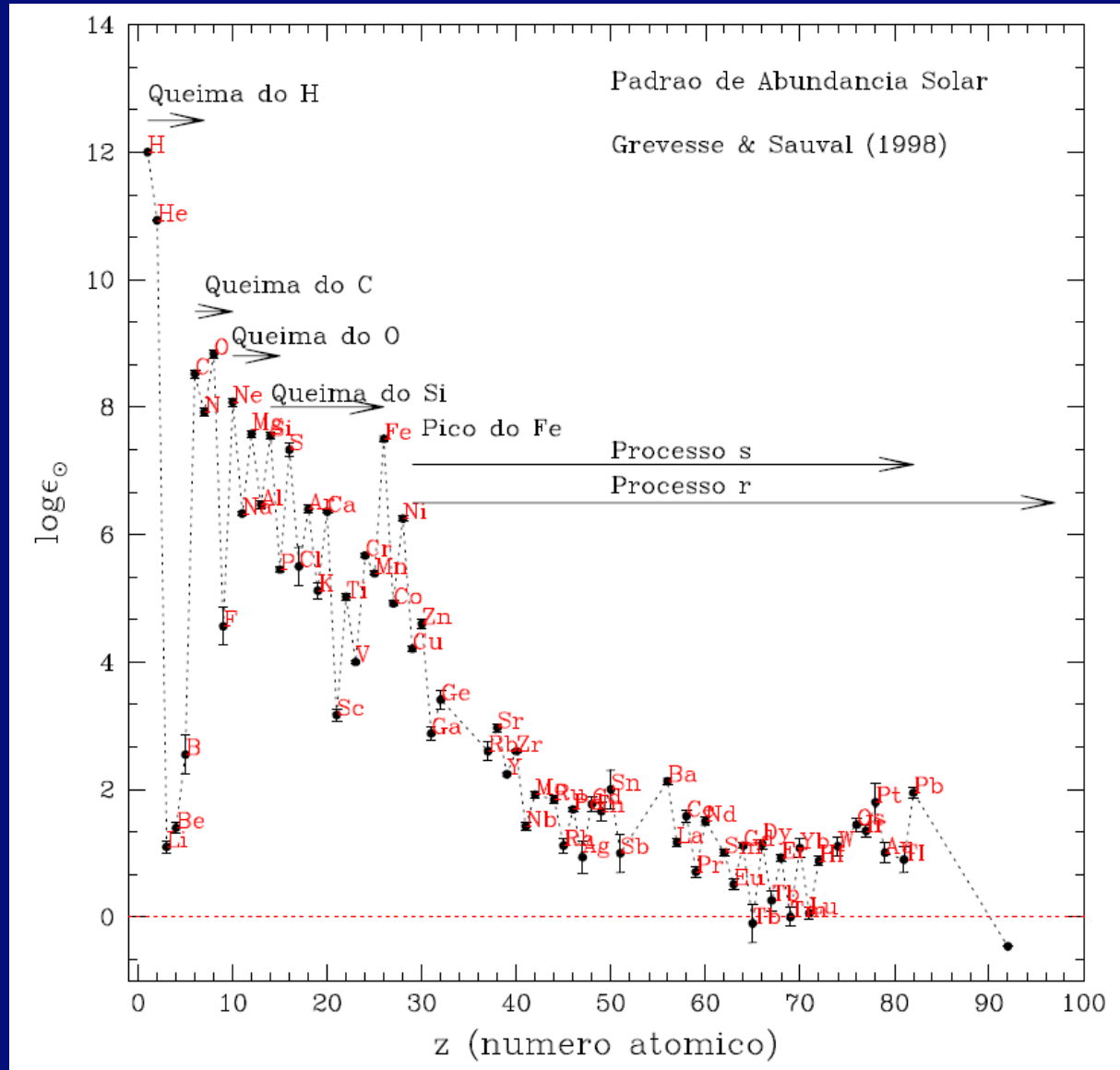
$$\epsilon(\text{O}) = 8.69$$

$$\frac{n_{\text{O}}}{n_{\text{H}}} \simeq 4.90 \times 10^{-4} \simeq \frac{1}{2040}$$

$$\epsilon(\text{Fe}) = 7.50$$

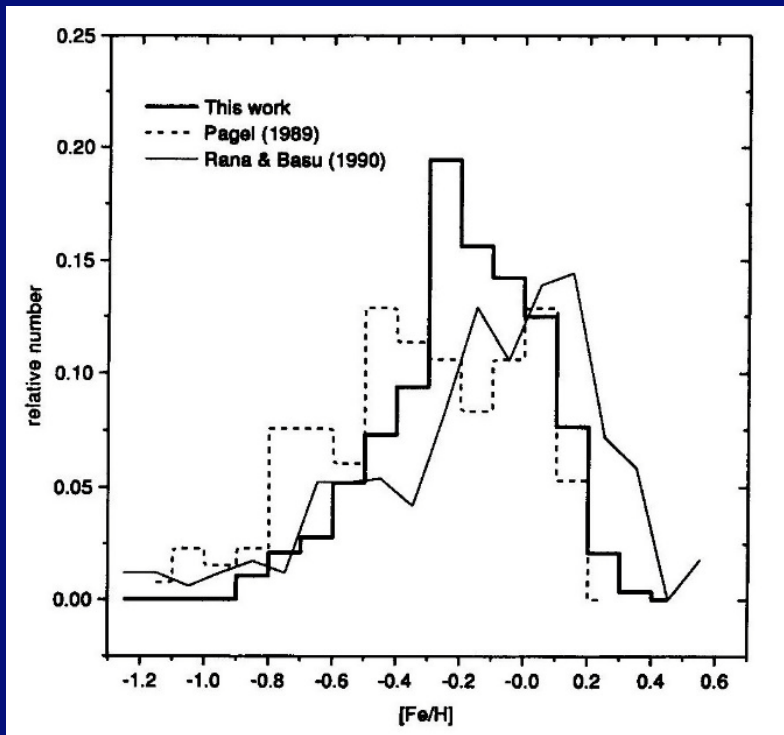
$$\frac{n_{\text{Fe}}}{n_{\text{H}}} \simeq 3.16 \times 10^{-5} \simeq \frac{1}{31600}$$

Abundâncias solares



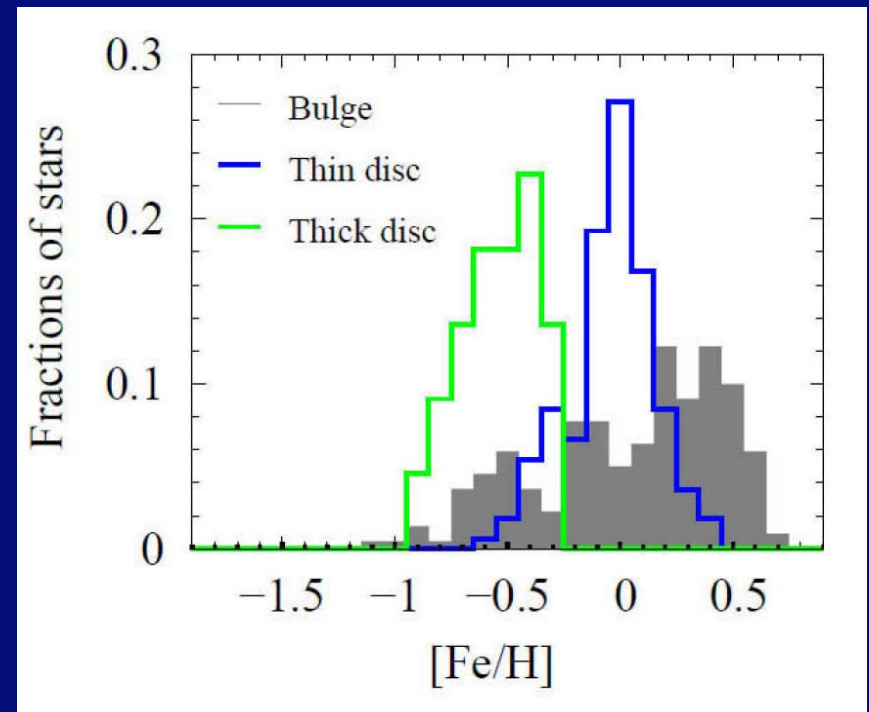
Exemplos de vínculos observacionais

Distribuição de metalicidades das anãs G

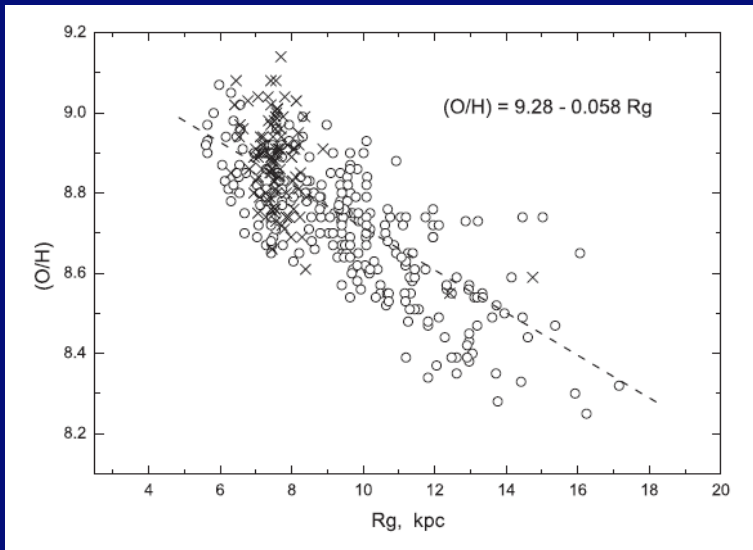


Rocha-Pinto & Maciel (1996)

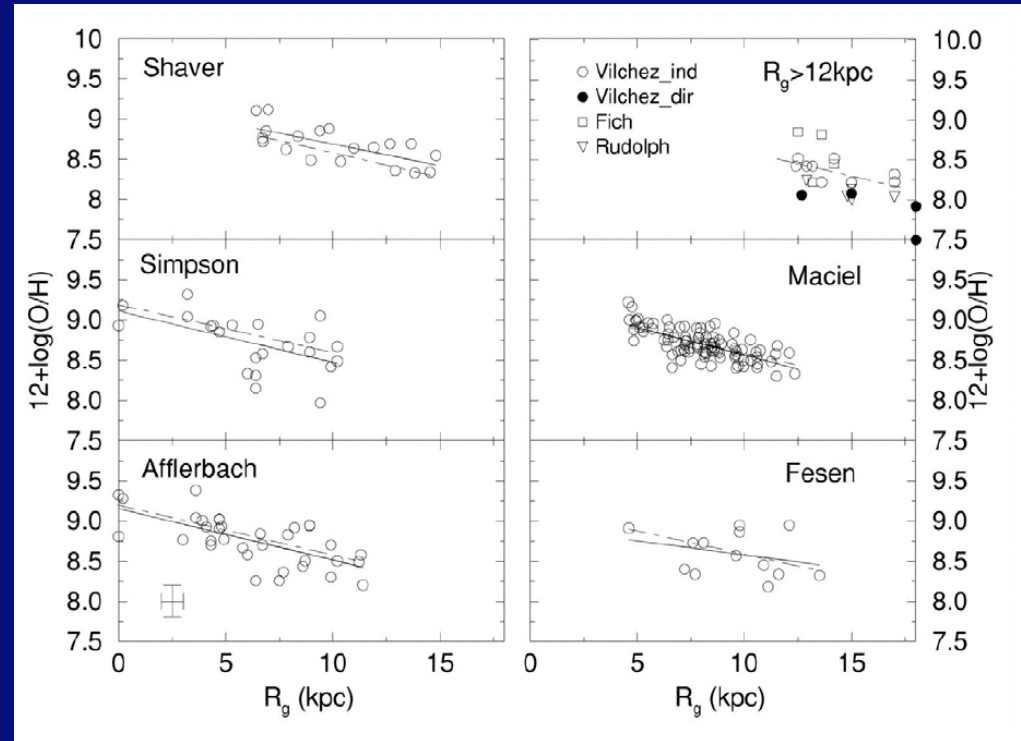
Hill et al. (2011)



Gradientes radiais de abundâncias

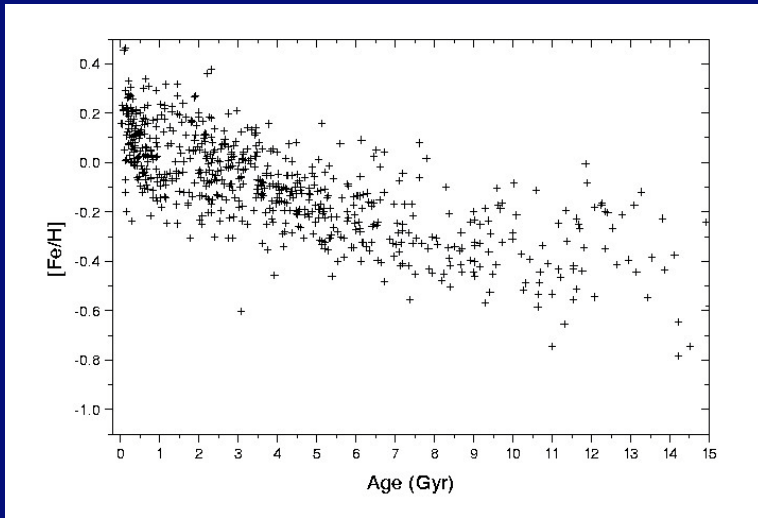


Korotin et al. (2014)

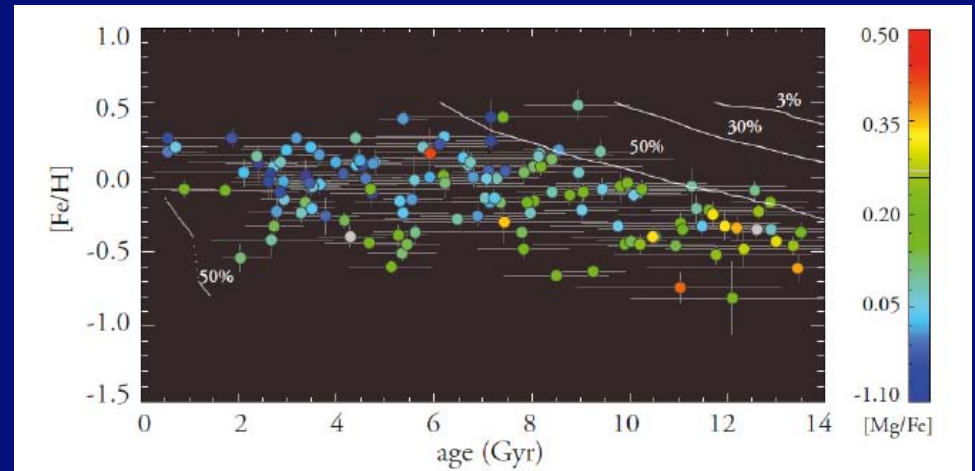


Henry & Worthey (1999)

Relação idade-metalicidade



Rocha-Pinto et al. (2000)



Bergemann et al. (2014)

★ Nucleossíntese

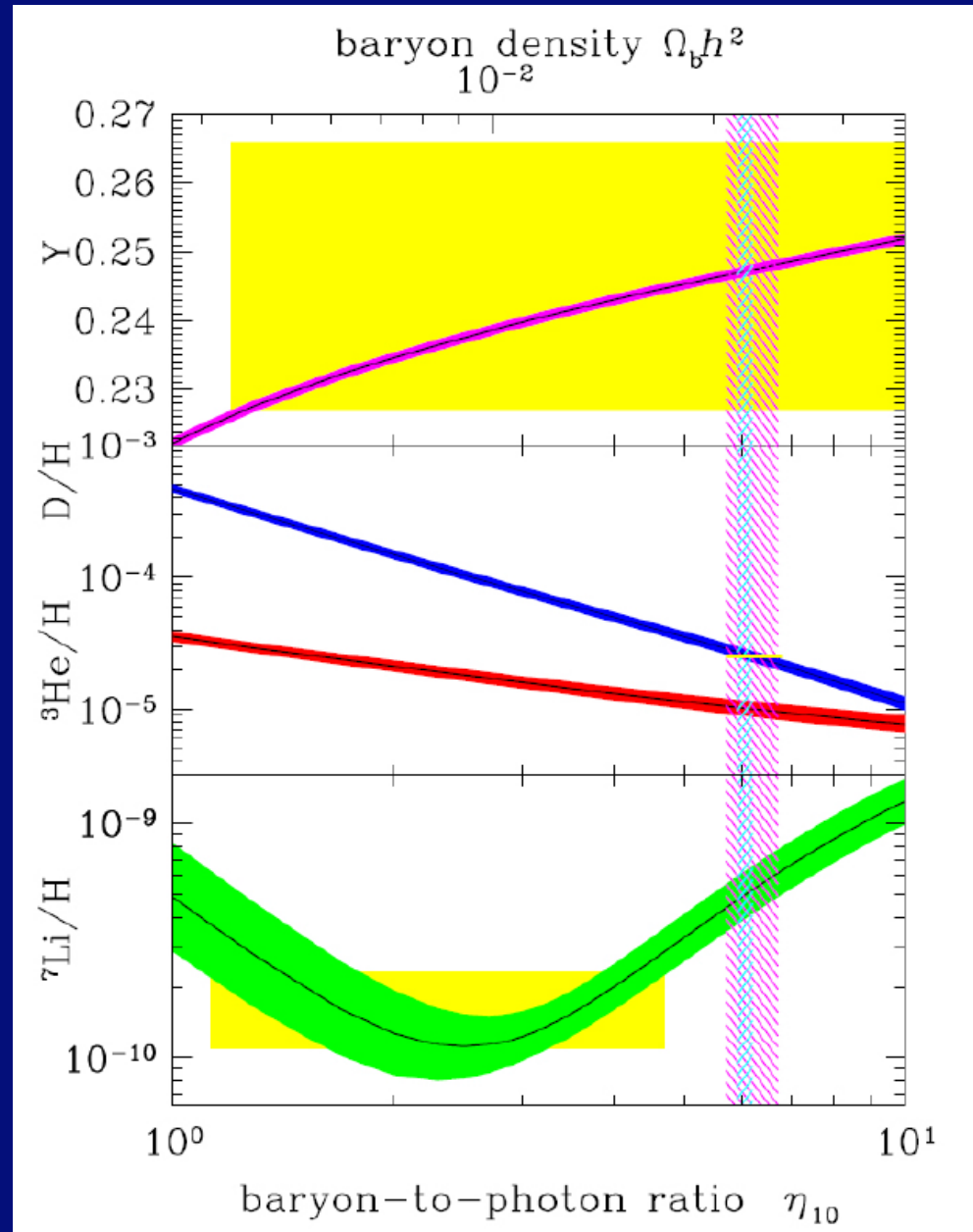
A nucleossíntese dos elementos da tabela periódica pode ser classificada de maneira esquemática em:

- Primordial
- Estelar
- Interestelar

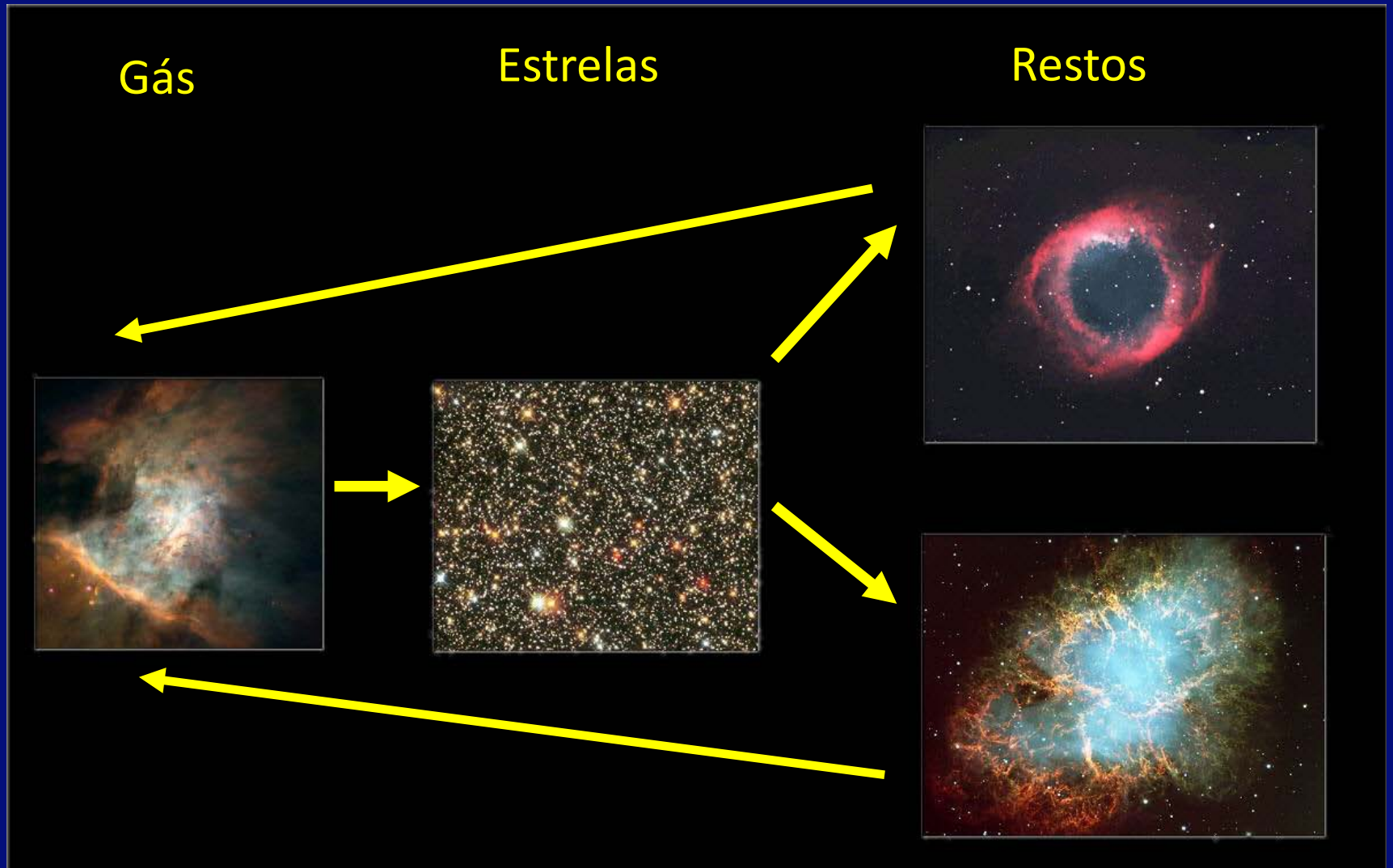
Nucleossíntese primordial

Primeiros minutos após o Big Bang

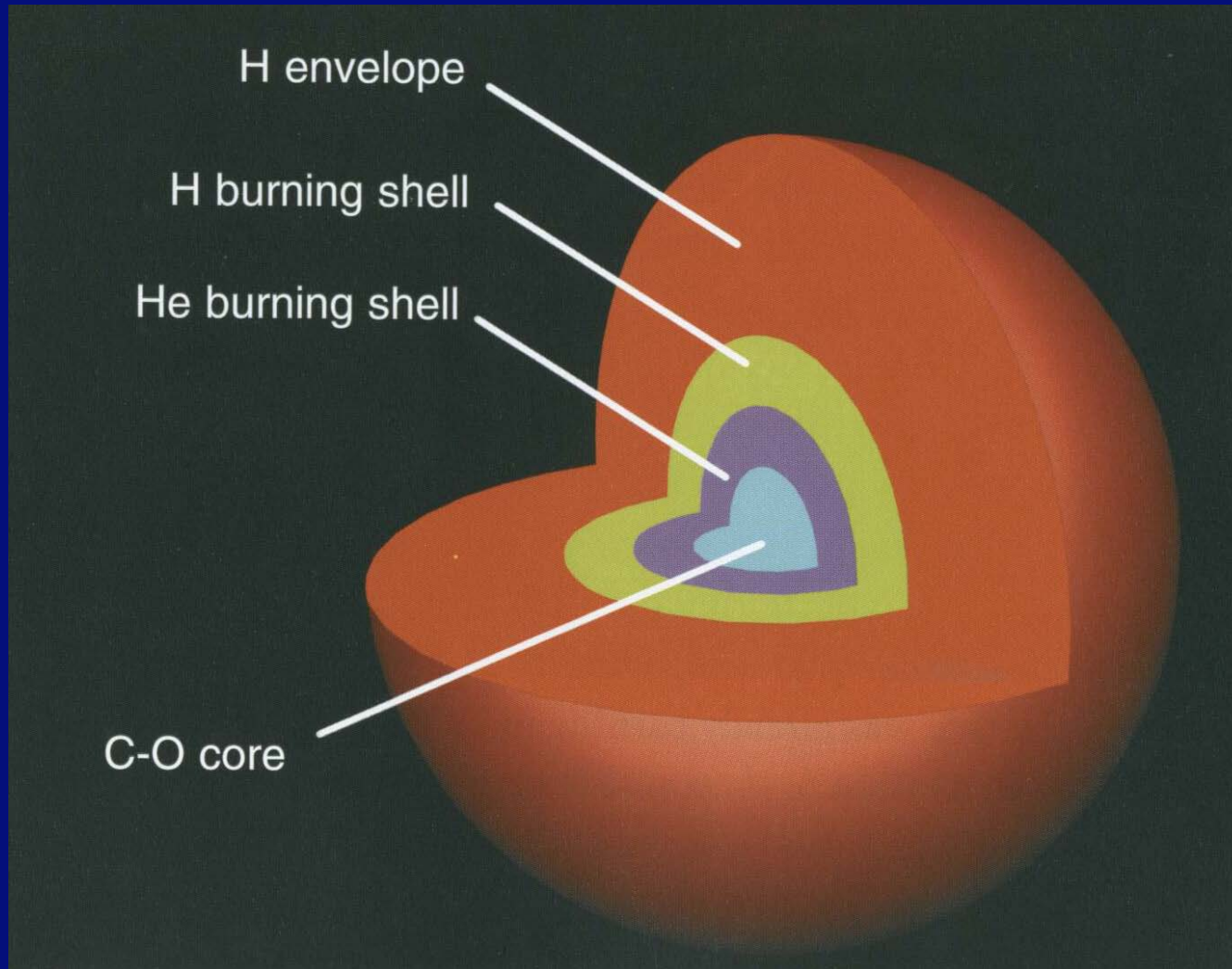
D, ^3He , ^4He , ^7Li



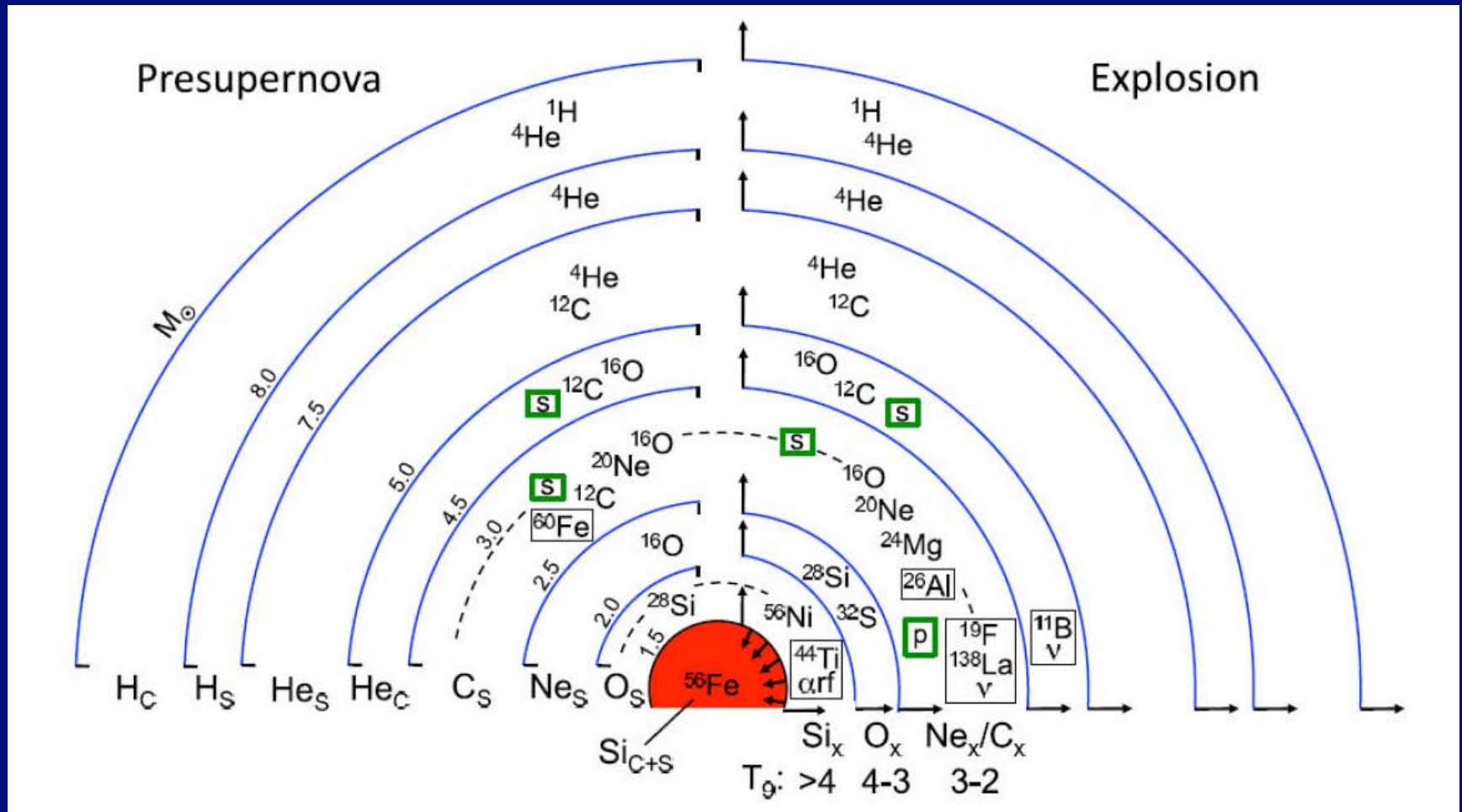
Nucleossíntese estelar



Estrelas de massa pequena/intermediária

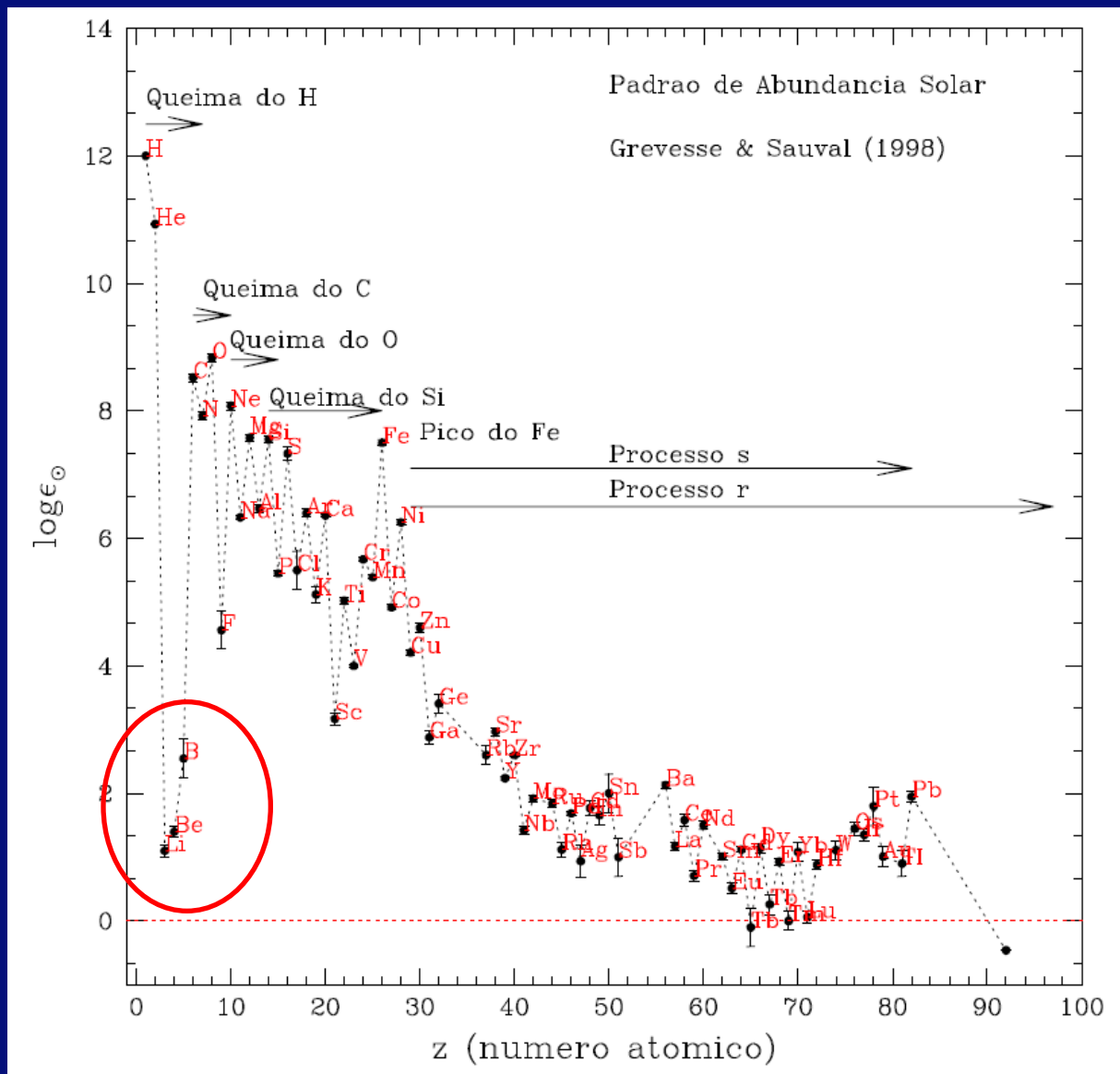


Estrelas de grande massa



Nucleossíntese interestelar

Interação de raios cósmicos com o meio Interestelar
Spallation



3. O que são nebulosas fotoionizadas

Na Via Láctea podemos distinguir 4 tipos de nebulosas, com diferentes origens e propriedades:

- Regiões HII
- Nebulosas planetárias
- Nebulosas escuras
- Restos de supernovas



Região HII



Nebulosa planetária



Nebulosa escura



Resto de supernova

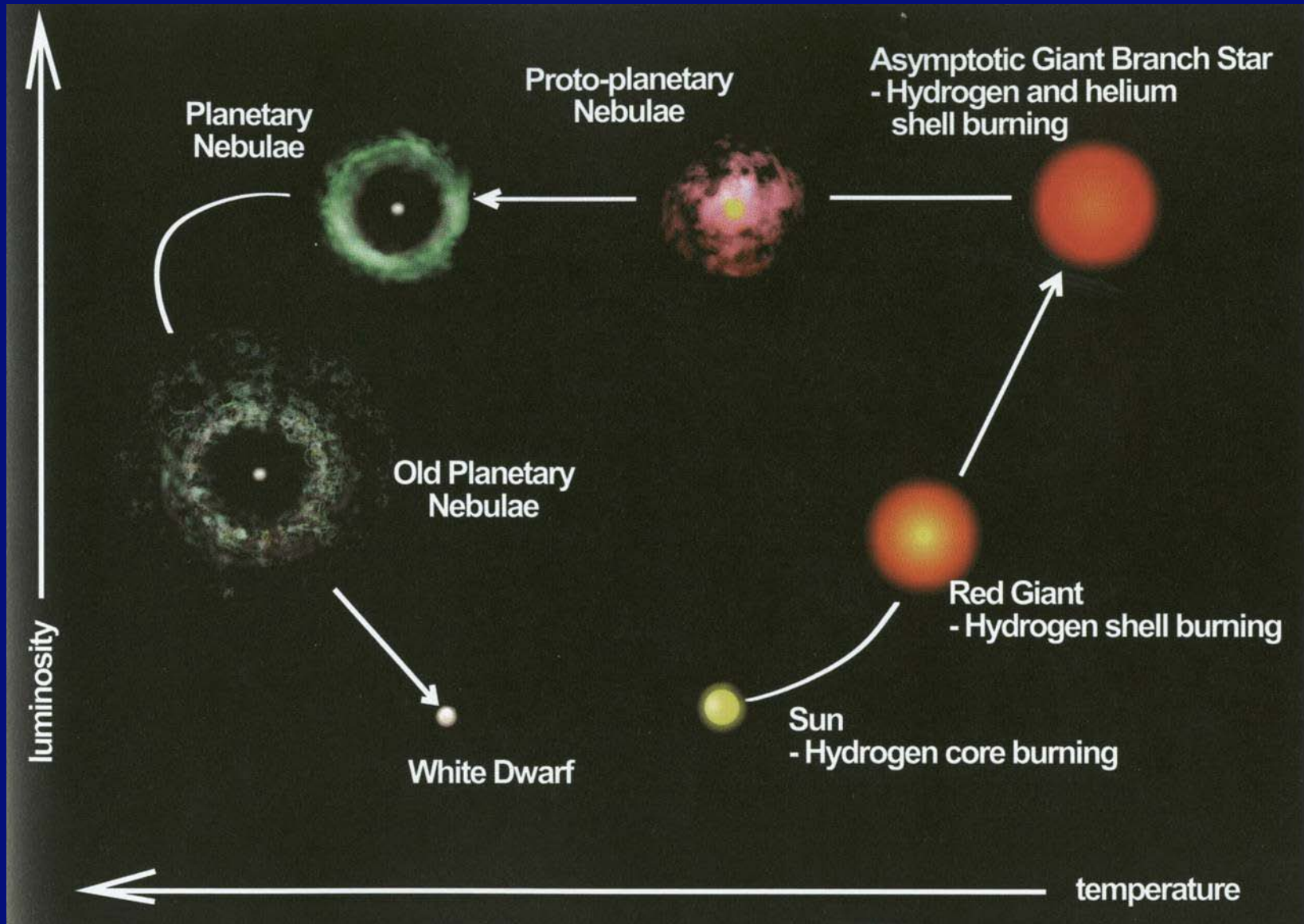
Regiões HII são nebulosas fotoionizadas associadas com estrelas jovens e massivas

Nebulosas planetárias são nebulosas fotoionizadas produzidas pela ejeção de camadas externas de estrelas de massa intermediária

Regiões HII e Nebulosas planetárias estão associadas com estrelas quentes, que possuem um grande número de fótons com energias superiores a 13.6 eV, que é o potencial de ionização do hidrogênio, ou seja, são fótons ionizantes.

Regiões HII são associadas a estrelas jovens, sendo portanto objetos jovens, com idades da ordem de alguns milhões de anos.

Nebulosas planetárias são o resultado da ejeção das camadas externas de estrelas do ramo assintótico das gigantes (AGB), ou seja, são objetos mais velhos, com idades típicas acima de 1 bilhão de anos.



Propriedades das nebulosas fotoionizadas

	Regiões H II	Nebulosas planetárias
Tipo espectral	O, B	O, W
Temperatura efetiva	30 000–50 000 K	30 000–300 000 K
População	I jovem	I velha – II
Temperatura eletrônica	10^4 K	10^4 K
Densidade eletrônica	$10\text{--}10^2 \text{ cm}^{-3}$	$10^2\text{--}10^4 \text{ cm}^{-3}$
Massa total	$10^2\text{--}10^4 M_{\odot}$	$0,01\text{--}1 M_{\odot}$
Dimensão típica	10 pc	$\lesssim 0,5$ pc
Estado do H	H^+	H^+
Estado do He	He^+	$\text{He}^+, \text{He}^{++}$
Elementos pesados	ionizados	ionizados
Velocidade típica	10 km/s (térmica)	25 km/s (expansão)

Propriedades das nebulosas fotoionizadas

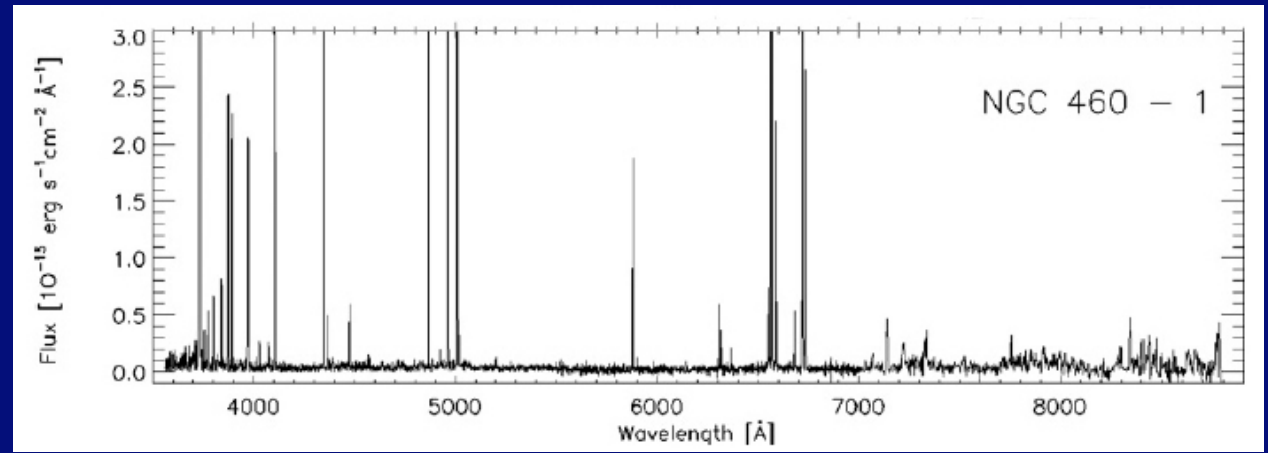
	Regiões H II	Nebulosas planetárias
Tipo espectral	O, B	O, W
Temperatura efetiva	30 000–50 000 K	30 000–300 000 K
População	I jovem	I velha – II
Temperatura eletrônica	10^4 K	10^4 K
Densidade eletrônica	$10\text{--}10^2 \text{ cm}^{-3}$	$10^2\text{--}10^4 \text{ cm}^{-3}$
Massa total	$10^2\text{--}10^4 M_{\odot}$	$0,01\text{--}1 M_{\odot}$
Dimensão típica	10 pc	$\lesssim 0,5$ pc
Estado do H	H^+	H^+
Estado do He	He^+	$\text{He}^+, \text{He}^{++}$
Elementos pesados	ionizados	ionizados
Velocidade típica	10 km/s (térmica)	25 km/s (expansão)

4. Motivação

As nebulosas planetárias e as regiões HII têm intensas linhas de emissão de elementos como H, He, O, N, Ne, S, Ar, etc., incluindo linhas proibidas e linhas de recombinação. A análise destas linhas resulta em abundâncias com incertezas da ordem de 0.2 a 0.3 dex.

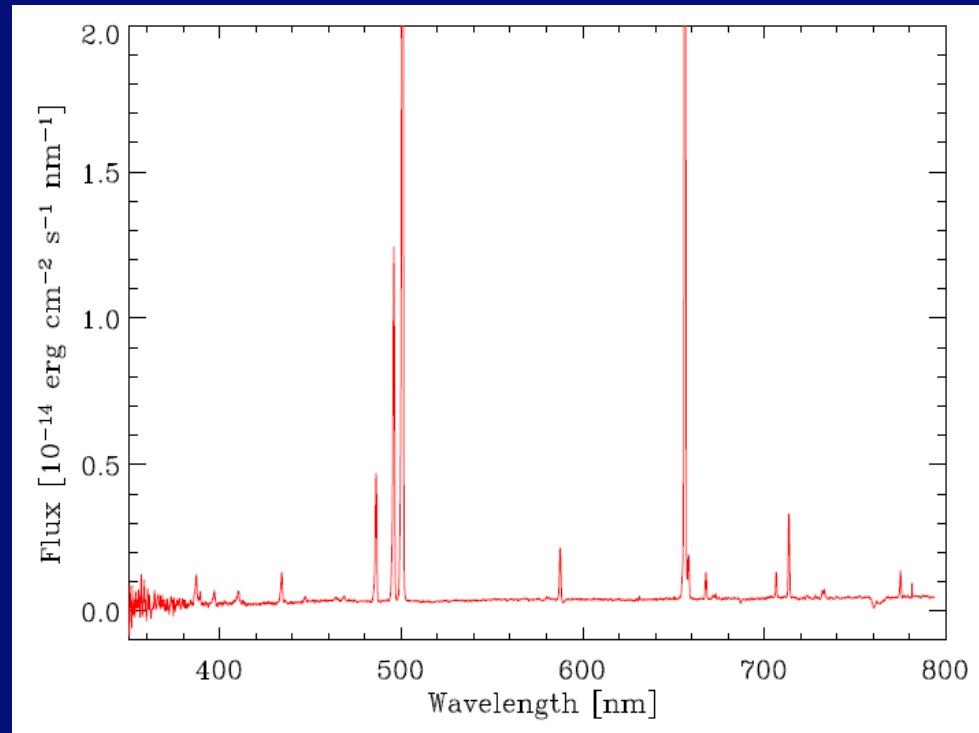
NGC 460 (SMC)

Peña-Guerrero et al.
(2012)



Pe 1-5 (MW)

Cavichia et al. (2010)



As regiões HII são objetos jovens, e suas abundâncias refletem a composição química atual do disco galáctico.

As nebulosas planetárias são mais velhas, e permitem obter abundâncias precisas de:

- Elementos que não são produzidos por suas estrelas progenitoras (O, S, Ne, Ar)
- Elementos que são produzidos pela evolução das estrelas progenitoras (He, N, C)

Em consequência, as nebulosas fotoionizadas têm um papel importante no estudo da

→ Evolução química das galáxias

→ Nucleossíntese das estrelas de massa intermediária

A análise das abundâncias de nebulosas planetárias e regiões HII é útil para



Investigar as diferenças devidas à idade e origem destes objetos



Comparar a evolução de diferentes sistemas do Grupo Local



Investigar a contribuição da nucleossíntese das progenitores das nebulosas planetárias para as abundâncias observadas

5. Dados utilizados

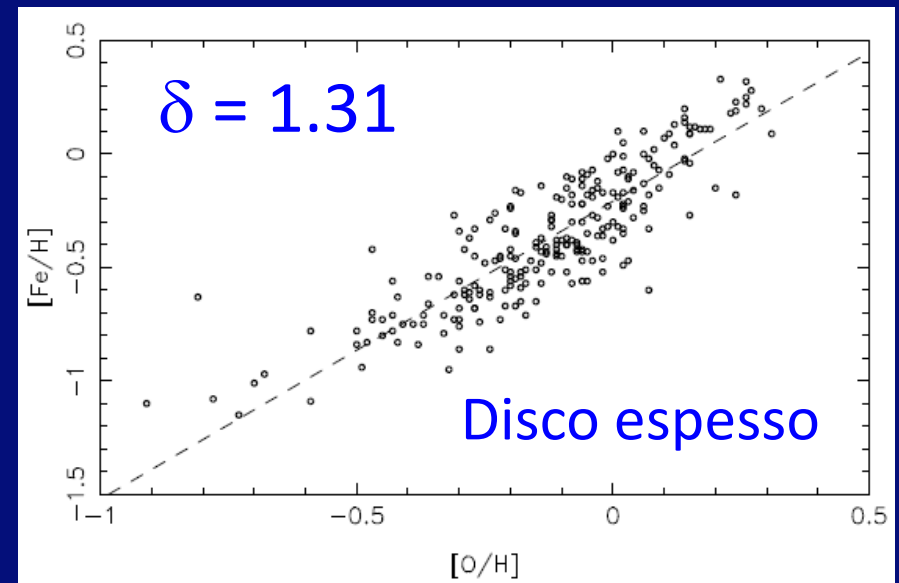
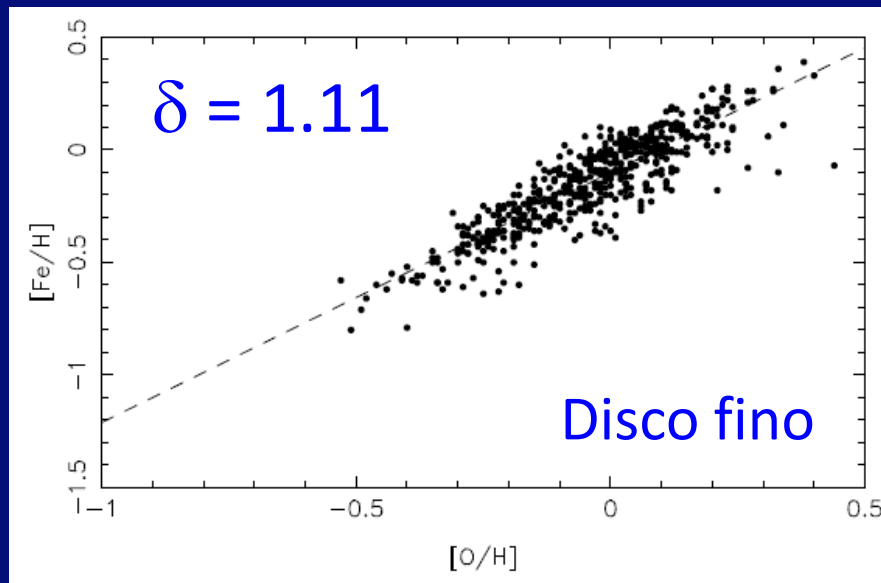
PLANETARY NEBULAE	Number
Milky Way Disk	347
Milky Way Bulge	249
Milky Way	596
Magellanic Clouds	511
Other Galaxies	193
Total External Galaxies	704
TOTAL	1300
HII REGIONS	Number
Milky Way	216
Magellanic Clouds	35
Other Galaxies	325
BCG, ELG	360
Total External Galaxies	720
TOTAL	936

6. Elementos que não são produzidos pelas estrelas de massa intermediária

As abundâncias de O, Ne, S, Ar não são provavelmente afetadas pela evolução das estrelas progenitoras das nebulosas planetárias. Portanto, as abundâncias medidas refletem as abundâncias interestelares na época de formação das estrelas.

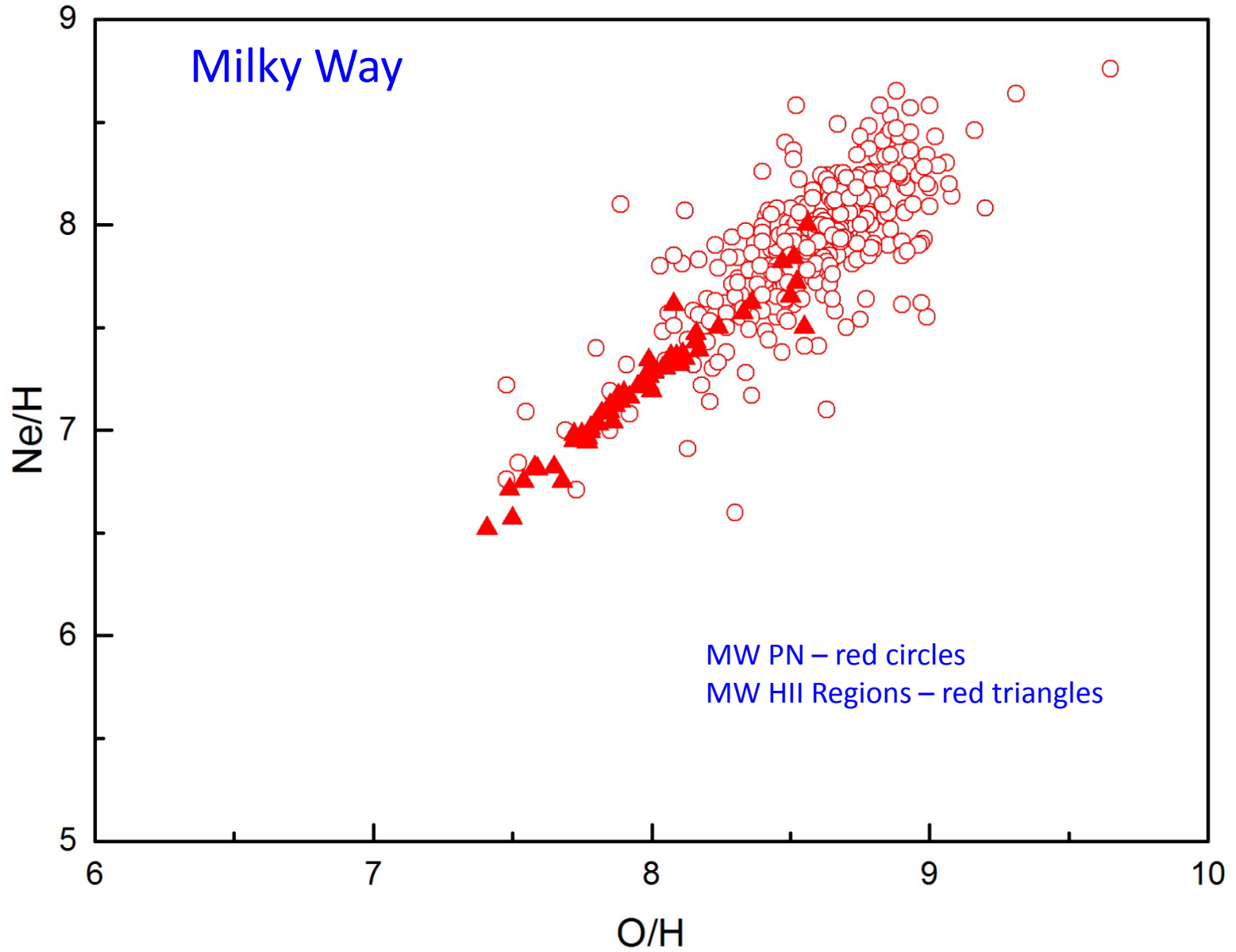
Usamos correlações independentes da distância, uma vez que as distâncias das nebulosas planetárias não são bem conhecidas.

O oxigênio pode ser usado como índice de metalicidade, pois o Fe está essencialmente condensado em grãos interestelares. Existe uma excelente correlação entre O e Fe na Galaxia.

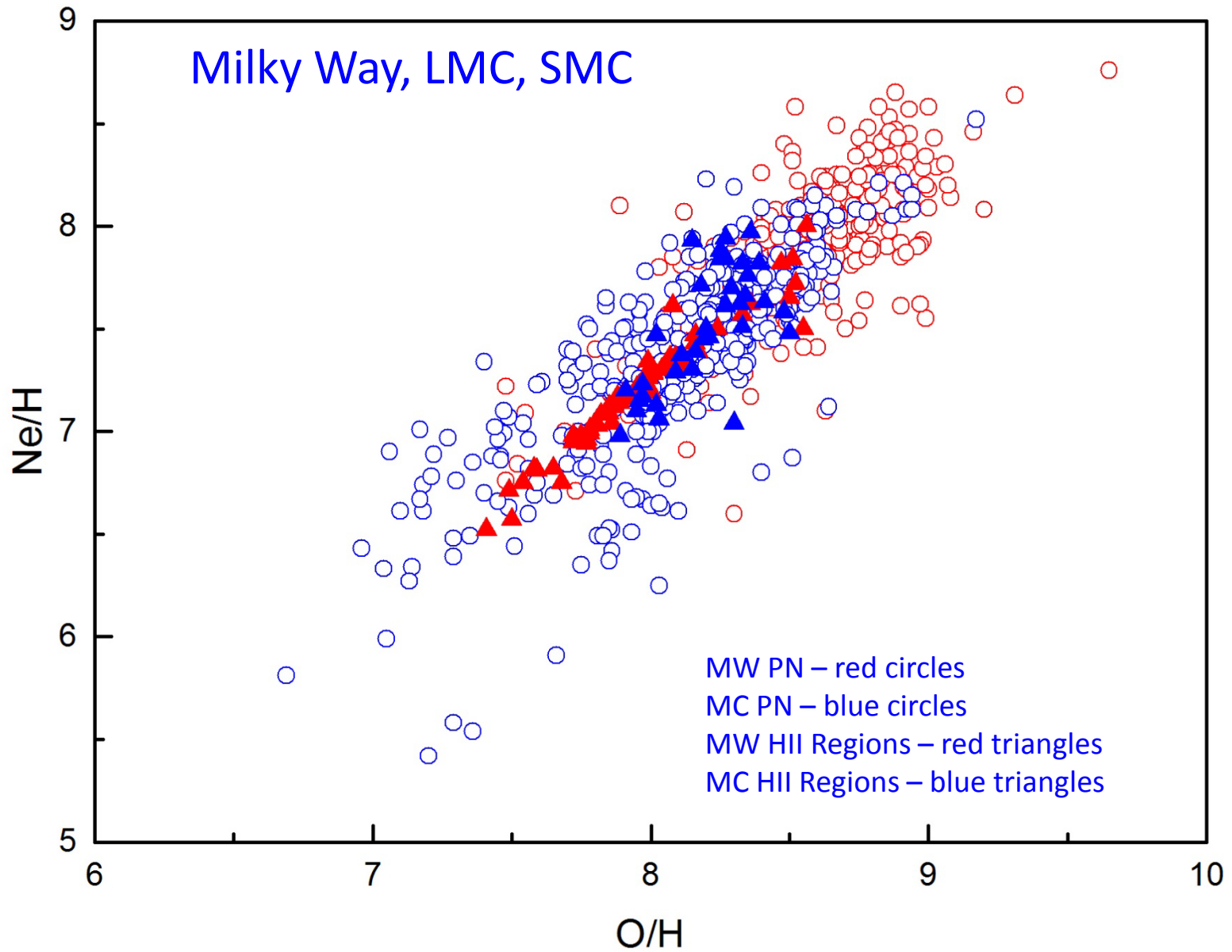


Ramirez et al. (2013)

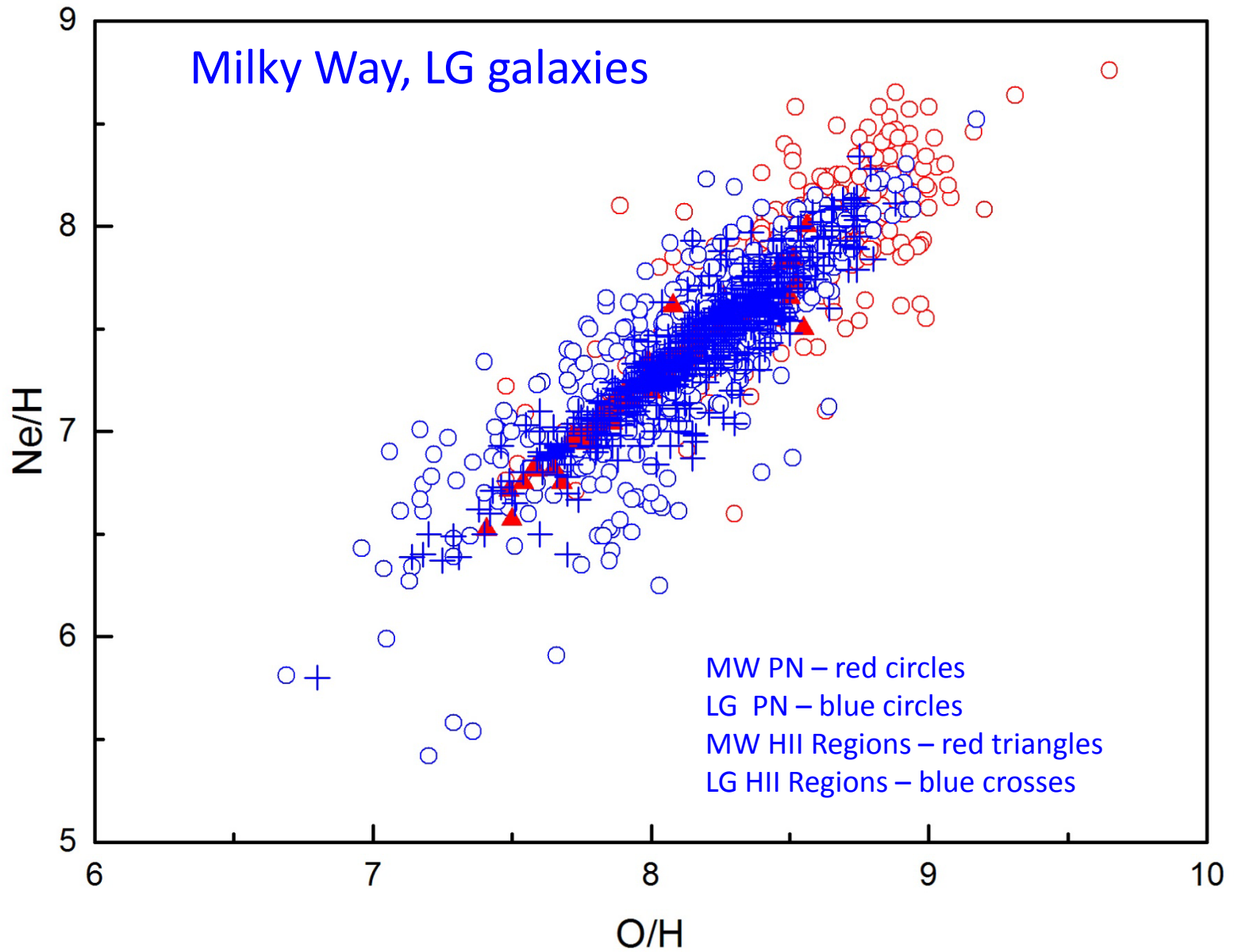
NEON

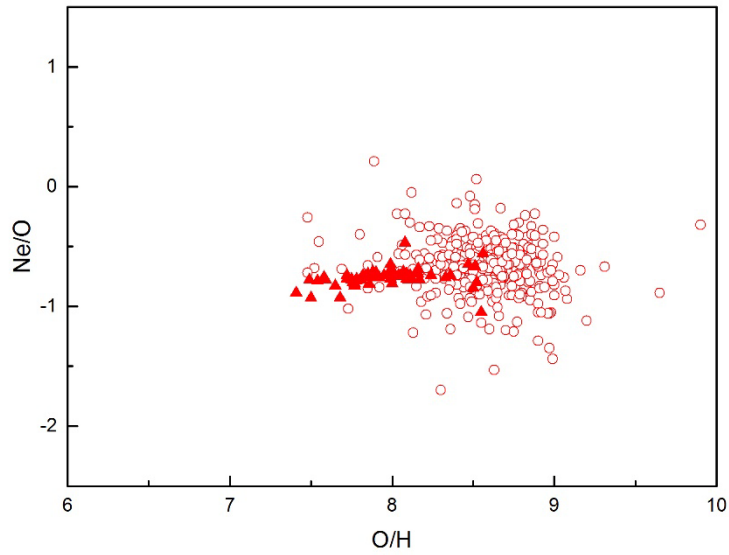


NEON



NEON

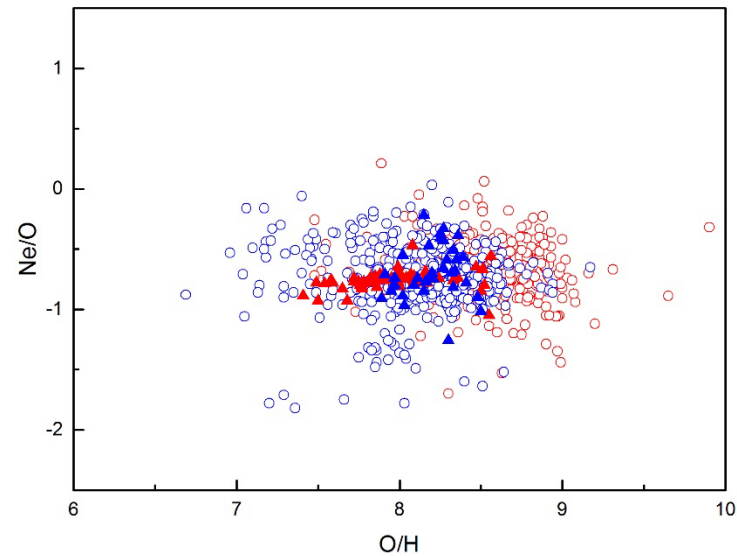
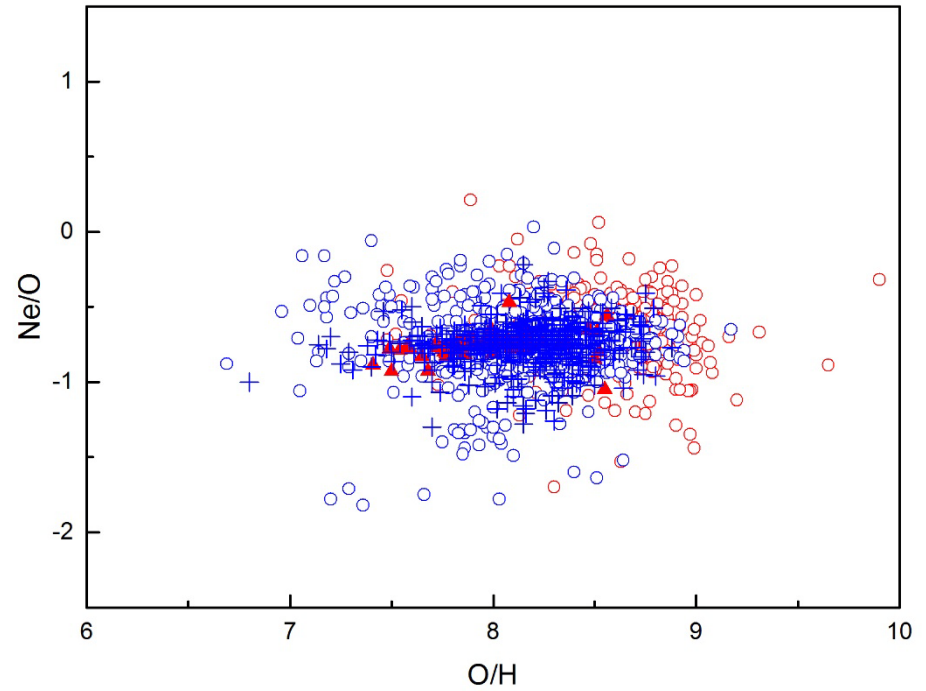




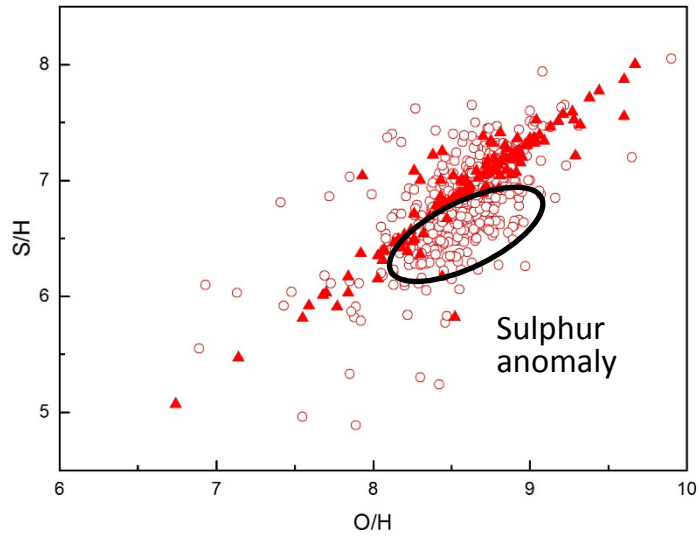
Milky Way

NEON

Milky Way, LG galaxies



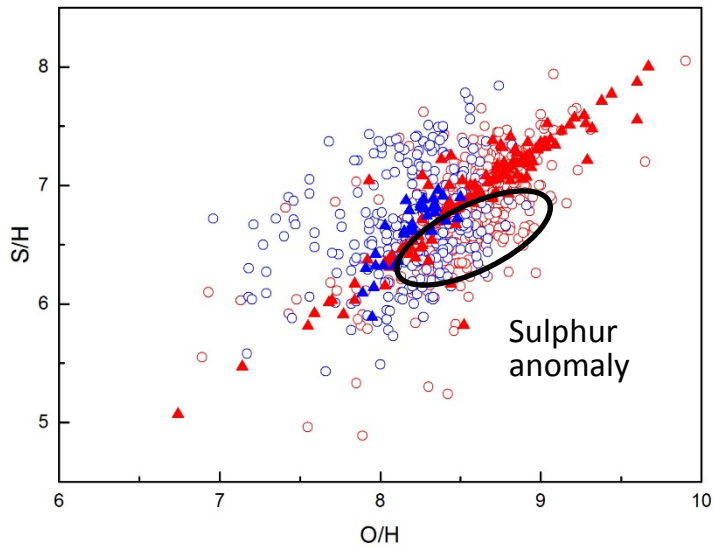
Milky Way, LMC, SMC



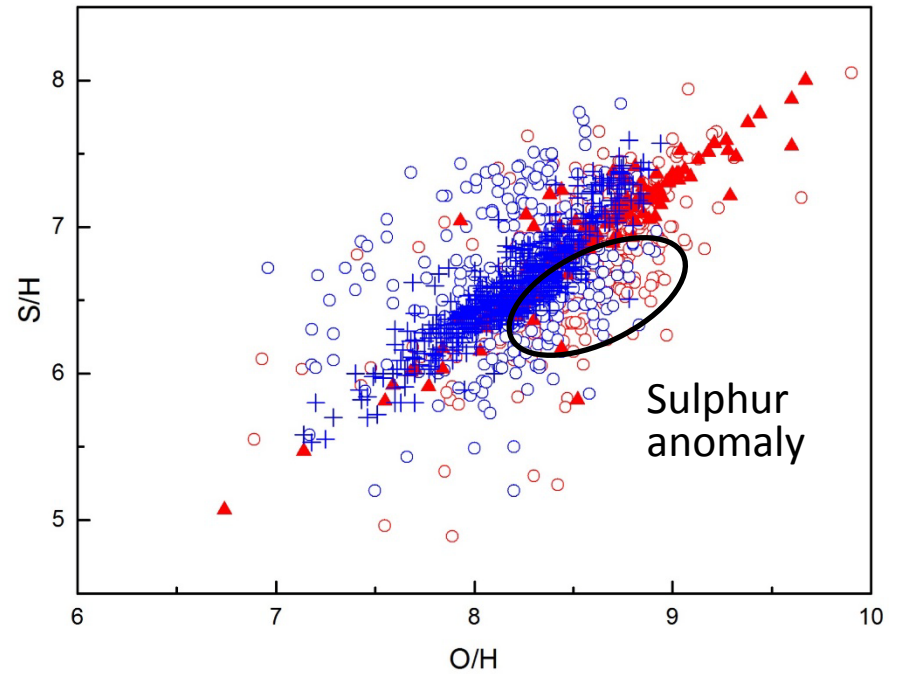
Milky Way

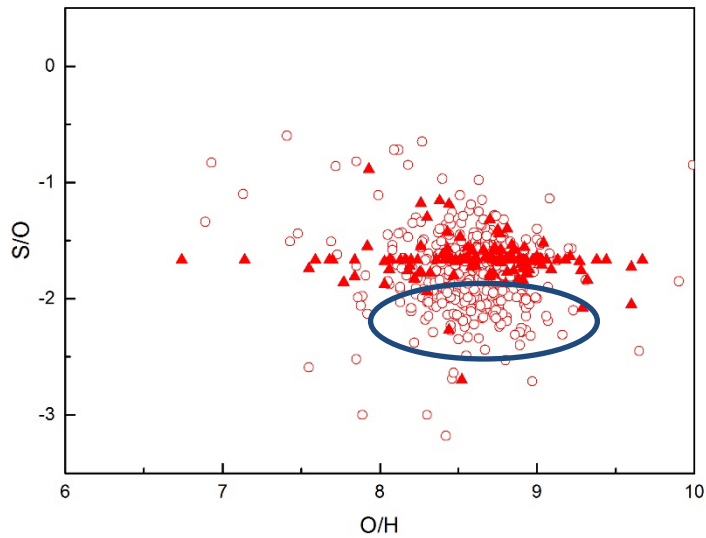
SULPHUR

Milky Way, LG galaxies



Milky Way, LMC, SMC

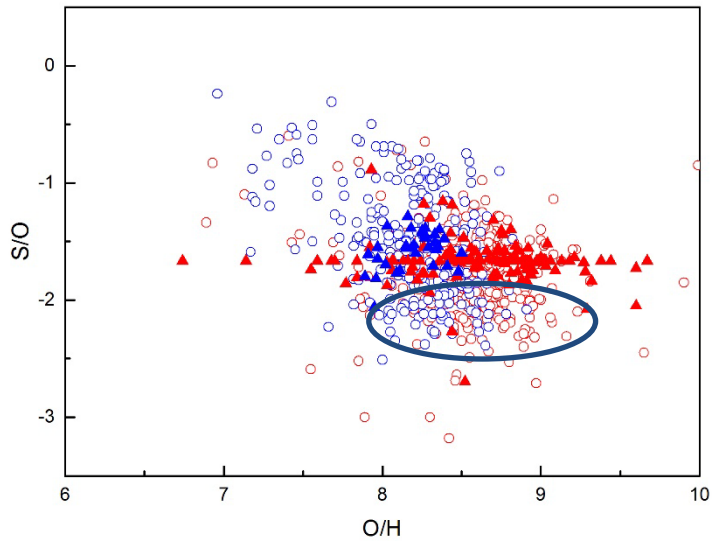




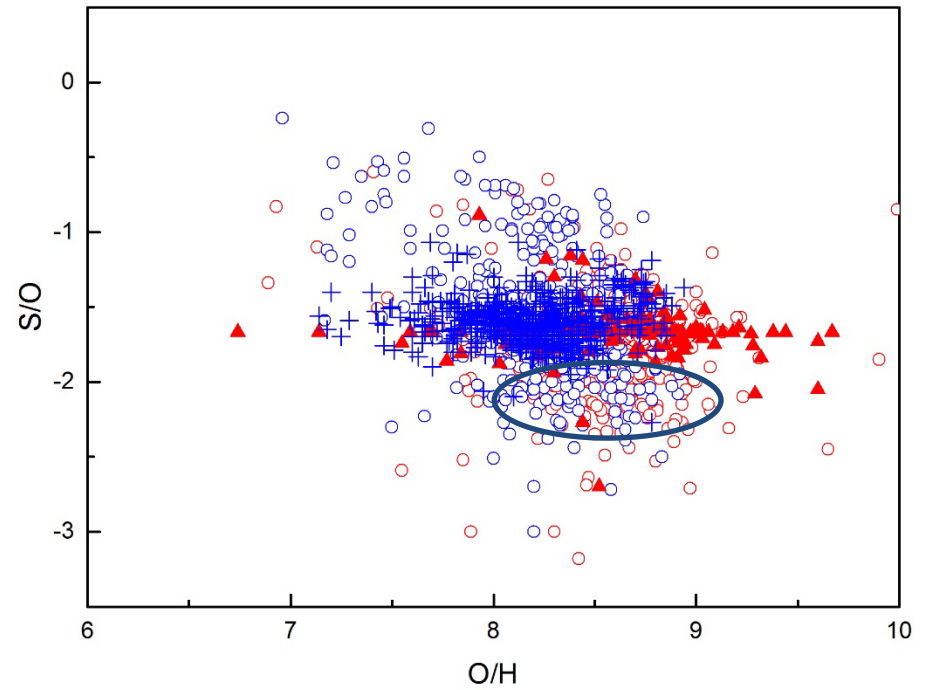
Milky Way

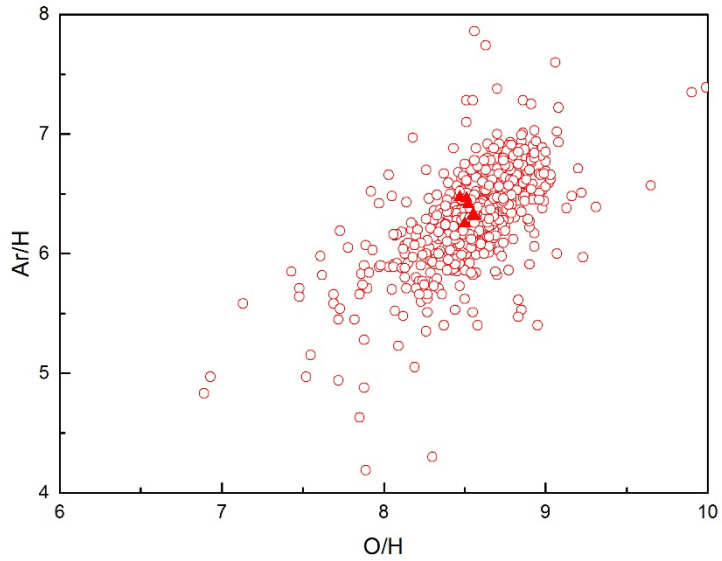
SULPHUR

Milky Way, LG galaxies



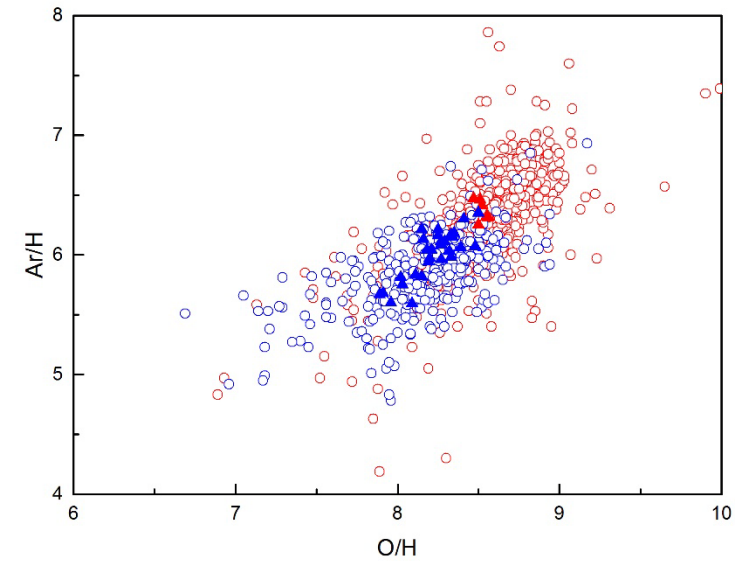
Milky Way, LMC, SMC



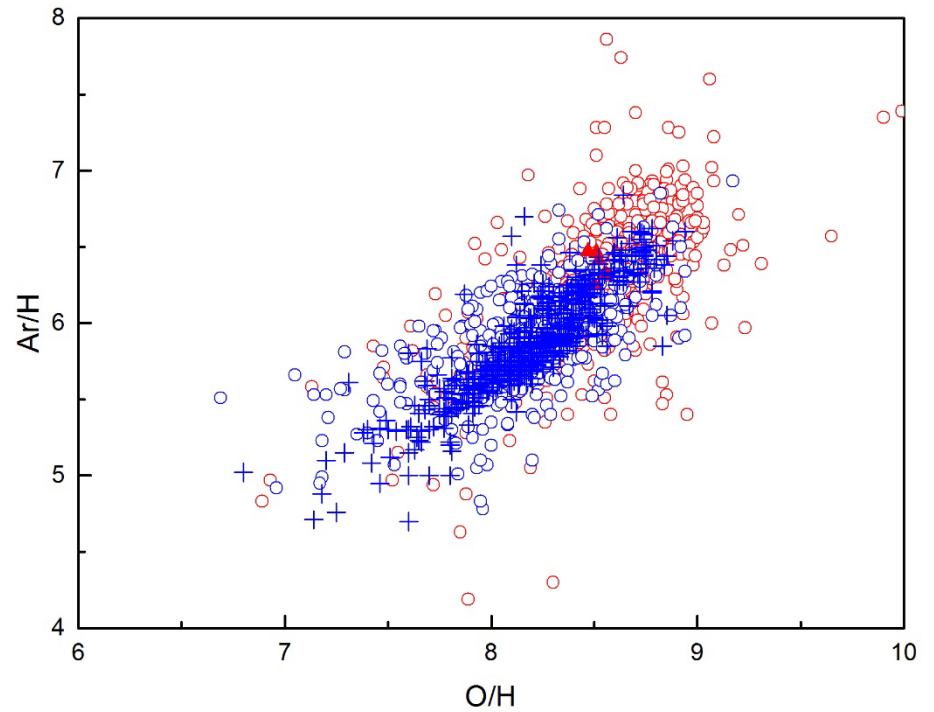


Milky Way

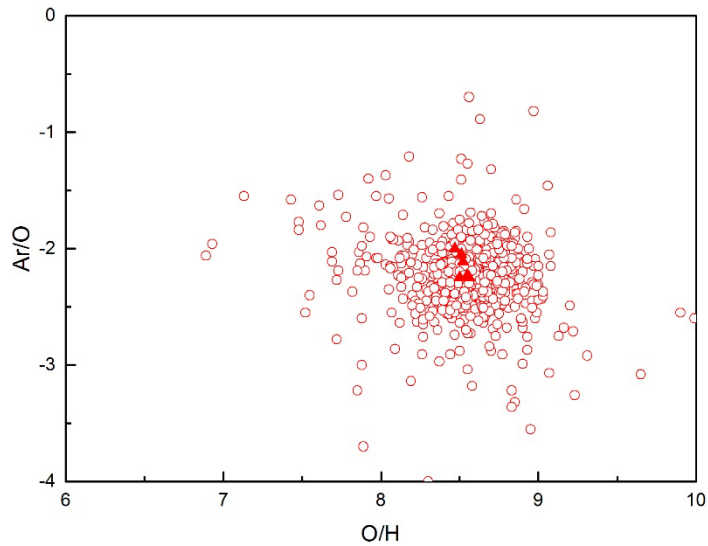
ARGON



Milky Way, LG galaxies



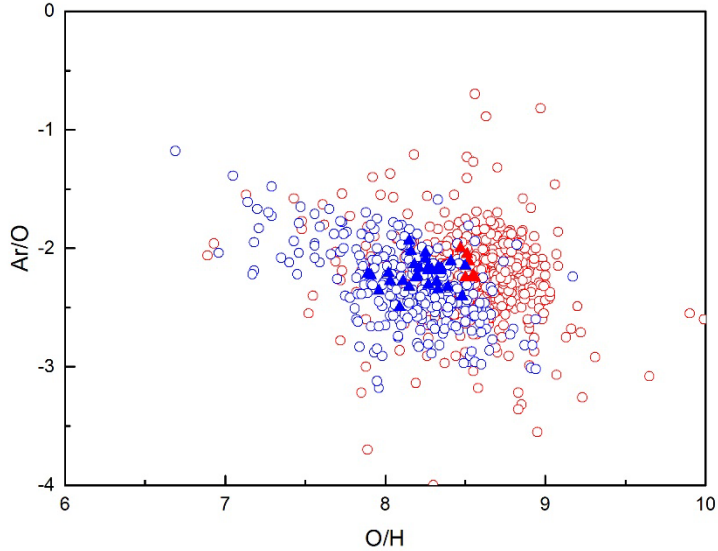
Milky Way, LMC, SMC



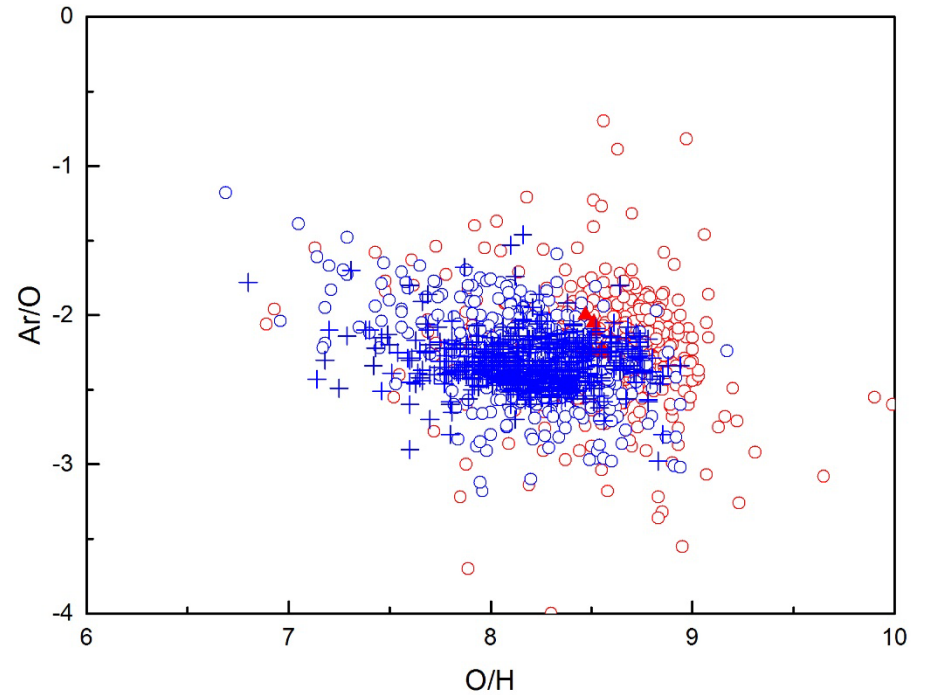
Milky Way

ARGON

Milky Way, LG galaxies



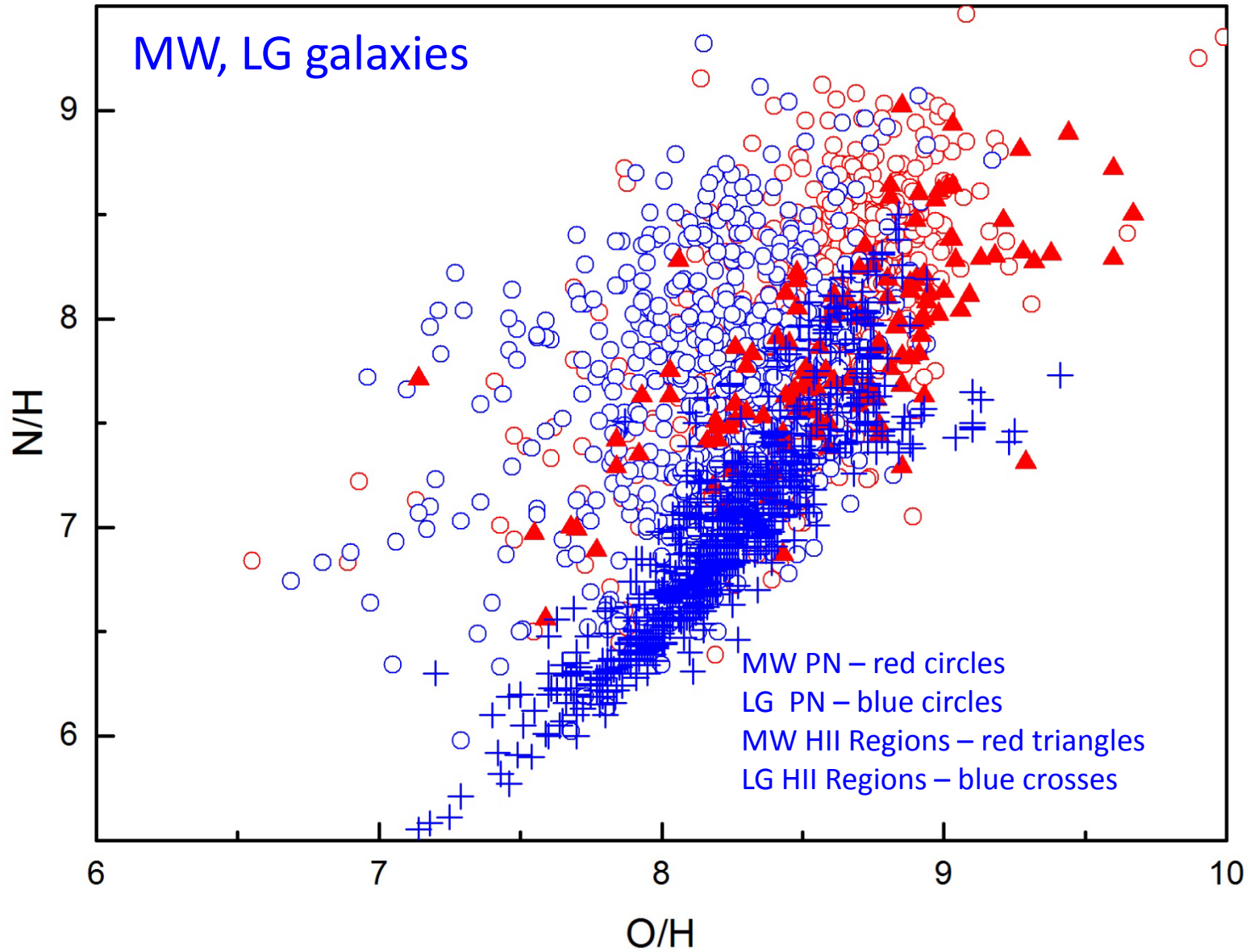
Milky Way, LMC, SMC



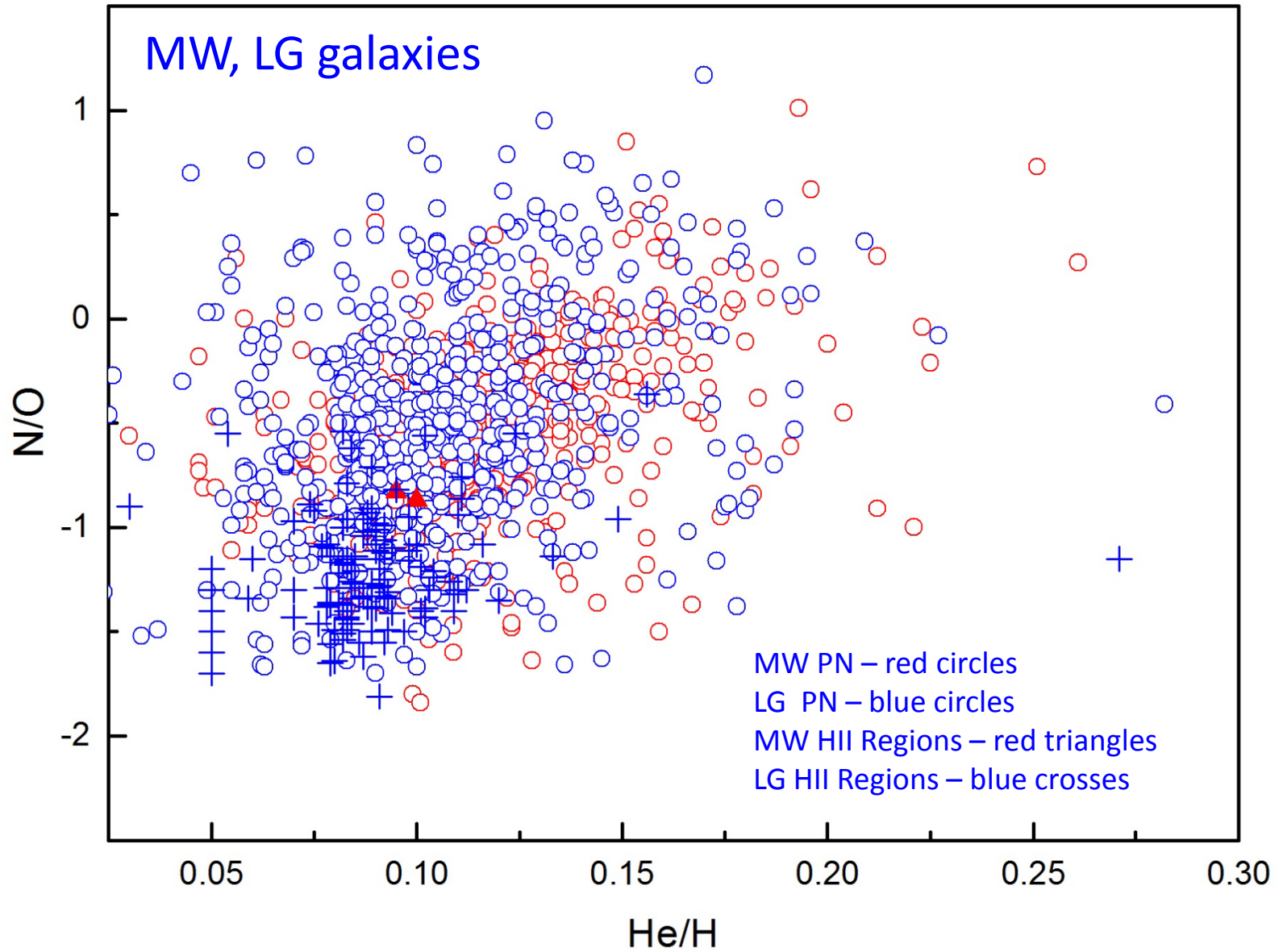
7. Elementos que podem ser produzidos pelas estrelas de massa intermediária

As abundâncias de He, N, e C são modificadas pela evolução das estrelas progenitoras das nebulosas planetárias, em particular nos processos de dragagem (dredge up) que ocorrem nas estrelas de massa intermediária.

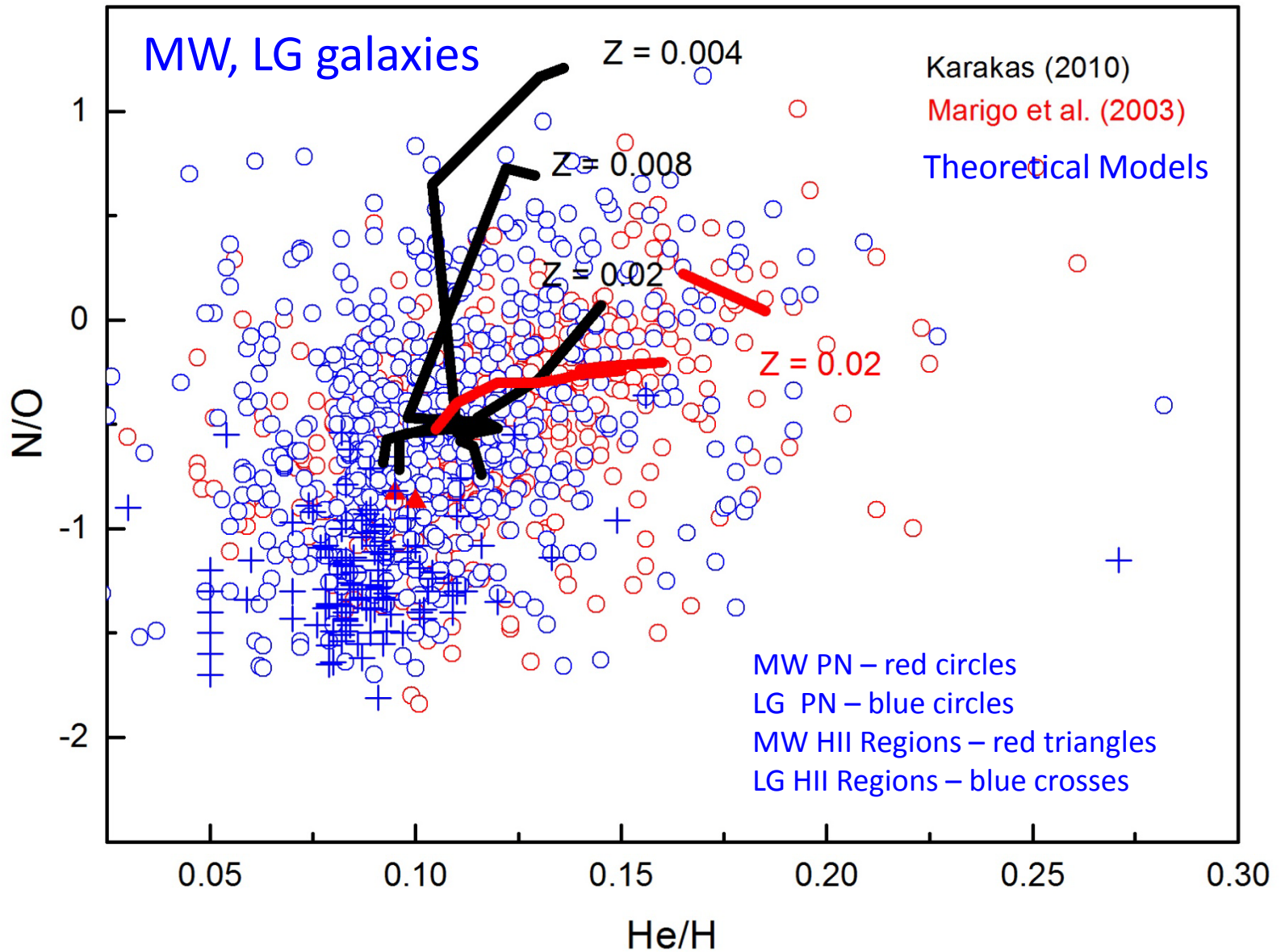
NITROGEN



NITROGEN



NITROGEN

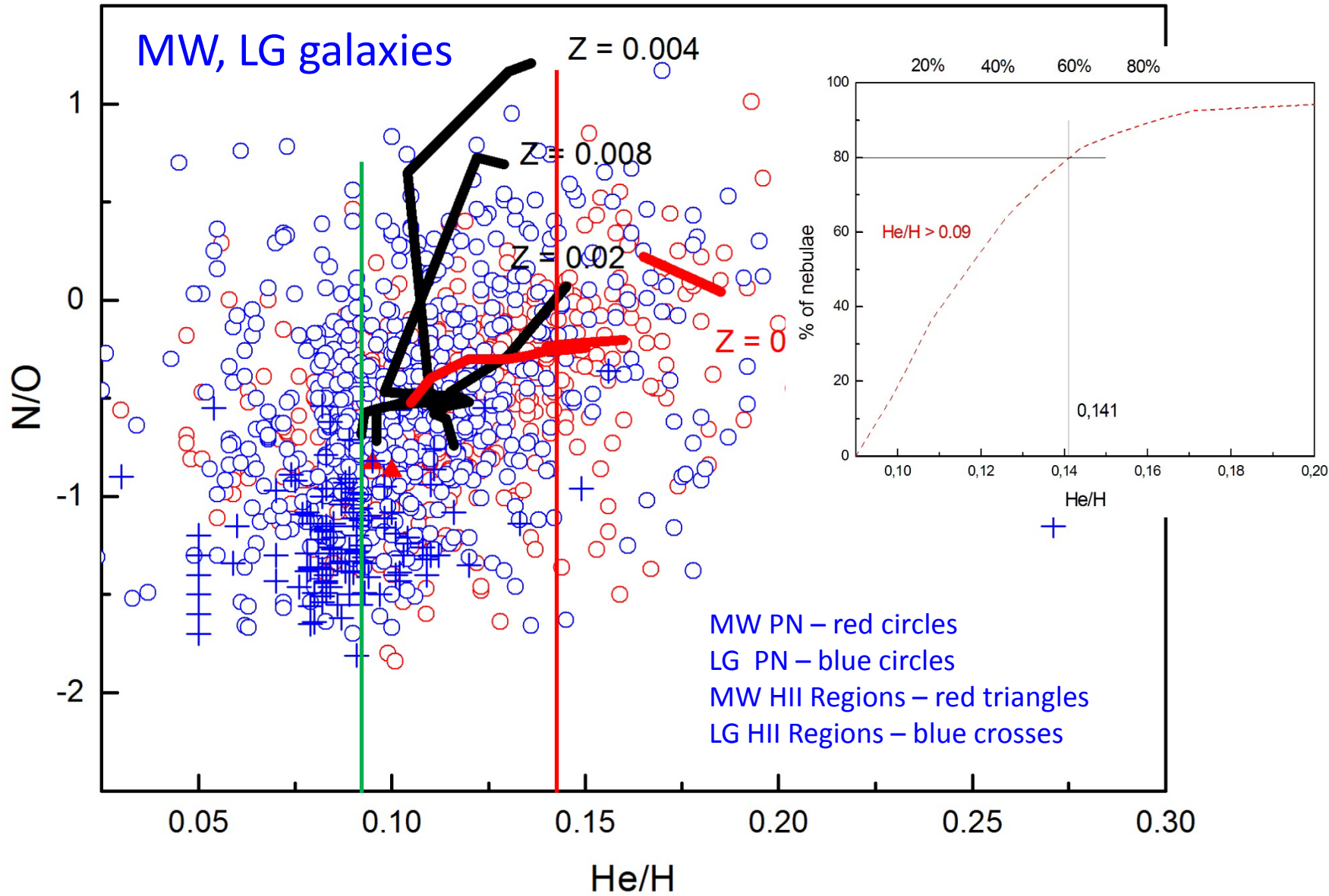


Os modelos de Karakas e Marigo são modelos evolutivos sintéticos para estrelas AGB com pulsos térmicos e massas iniciais entre 1 e 6 massas solares, nos quais ocorrem três episódios de dragagem, além dos processos *hot-bottom burning* (HBB) no caso das estrelas mais massivas.

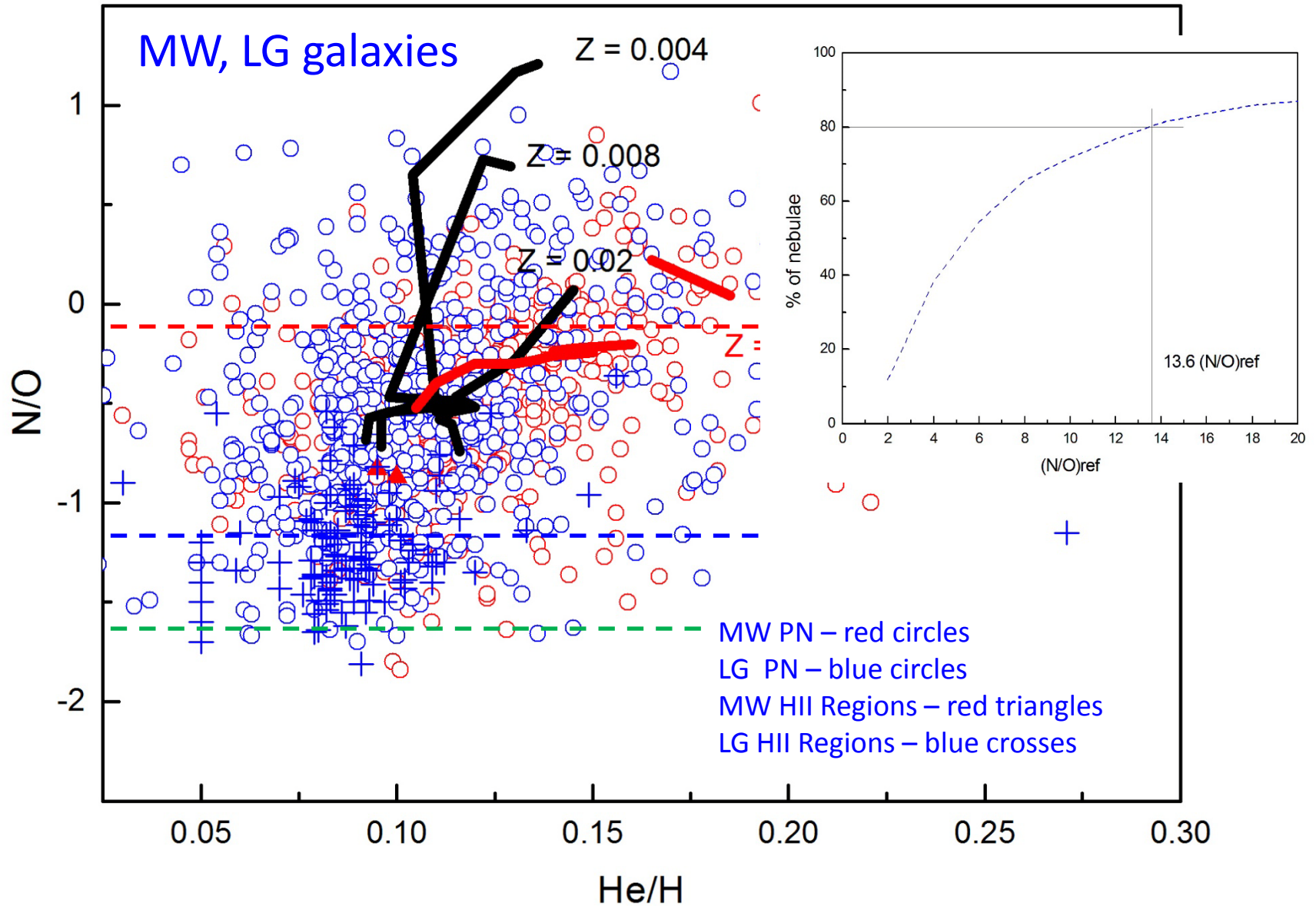
De acordo com estes modelos, estrelas progenitoras com massas de 0.9 a 4 massas solares e composição química solar podem explicar as abundâncias “normais” ($\text{He}/\text{H} < 0.15$), enquanto que para os objetos com maiores excessos ($\text{He}/\text{H} > 0.15$) são necessárias massas de 4 a 5 massas solares, além de um HBB eficiente.

Podemos então estimar a contribuição das estrelas progenitoras para as abundâncias de He e N, comparando os resultados das abundâncias das nebulosas planetárias com objetos jovens, como as regiões HII.

NITROGEN



NITROGEN



ALGUMAS CONCLUSÕES

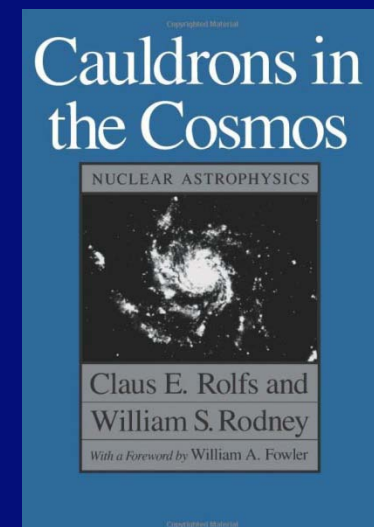
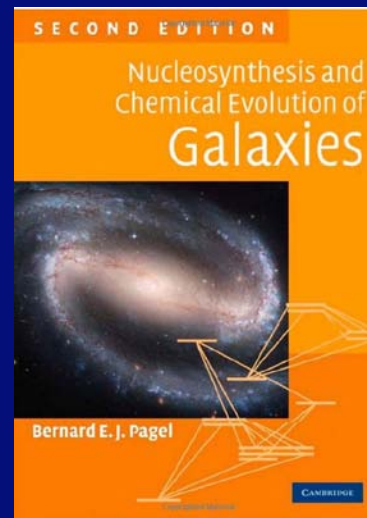
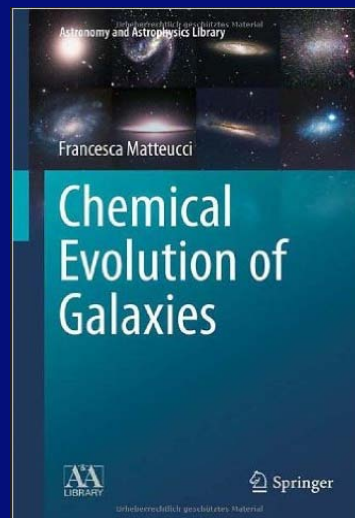
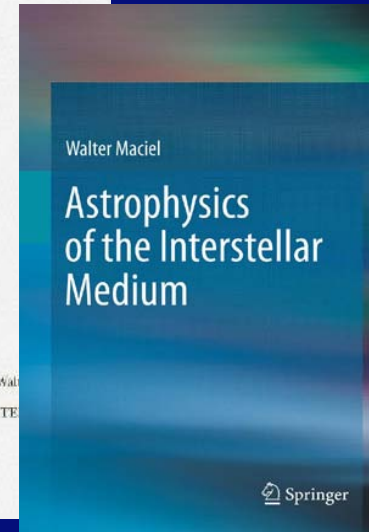
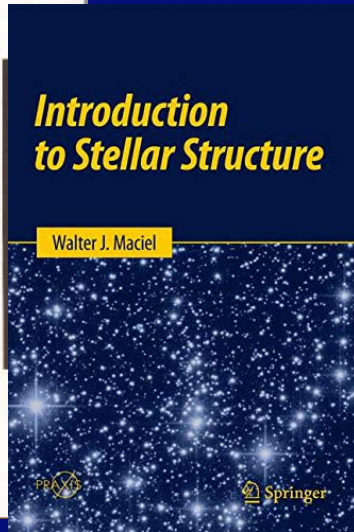
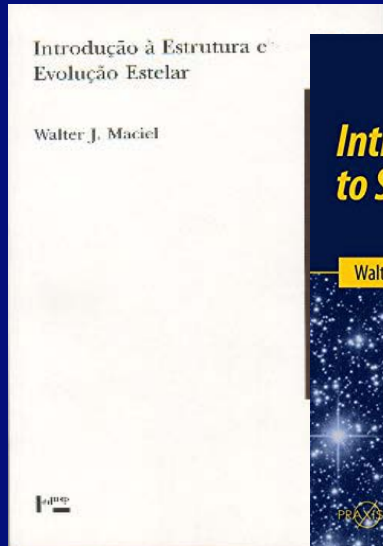
→ As abundâncias de O, Ne, S, e Ar em nebulosas planetárias mostram boas correlações. As abundâncias relativas ao O são essencialmente constantes, dentro das incertezas estimadas. As abundâncias de S em planetárias da Via Láctea apresentam a anomalia do enxofre, provavelmente devido ao uso de fatores de correção de ionização (ICFs) inadequados.

→ Todas as correlações para regiões HII, BCG, e ELG apresentam dispersões mais baixas, como esperado, mas as mesmas tendências são observadas em ambos os tipos de nebulosas fotoionizadas.

→ A dispersão observada nas nebulosas planetárias é provavelmente real, e reflete as diferentes idades das estrelas progenitoras. Não foi detectada nenhuma contribuição importante de Ne nos dados das nebulosas planetárias.

→ Para N e He observa-se alguma dispersão mesmo para as regiões HII, de modo que parte de seu N é provavelmente secundária. Para estrelas de massa intermediária, o acordo com os modelos teóricos é razoável, mas as determinações de abundância ainda precisam ser melhoradas.

BIBLIOGRAFIA



Introdução à estrutura e evolução estelar, W. J. Maciel, Edusp, 1999
(*Introduction to stellar structure*, Springer, 2015)

Astrofísica do meio interestelar, W. J. Maciel, Edusp, 2002
(*Astrophysics of the interstellar medium*, Springer, 2013)

Evolução química da Galáxia, W. J. Maciel, IAG/USP, 2016

The chemical evolution of the Galaxy, F. Matteucci, Springer, 2012

Nucleosynthesis and chemical evolution of galaxies, B. E. J. Pagel,
Cambridge, 2009

Cauldrons in the cosmos, C. E. Rolfs, W. S. Rodney, University of
Chicago Press, 2005

Obrigado