

# O conceito de populações estelares

---

# Populações Estelares

---

- ❖ Conceito introduzido por Baade (1944). Walter Baade é um contemporâneo de Edwin Hubble e trabalhou com ele nas observações de M31
- ❖ “I believe that Baade’s diagram of the two stellar populations is the second most important astronomical diagram of this century. It opened up the whole fields of stellar evolution and galactic evolution, as Hubble’s velocity-distance diagram opened up the study of the whole universe.” Donald E. Osterbrock, 1995IAUS..164...21O.
- ❖ Populações estelares tornou-se um tema unificador que relaciona evolução estelar e evolução galáctica

# THE RESOLUTION OF MESSIER 32, NGC 205, AND THE CENTRAL REGION OF THE ANDROMEDA NEBULA\*

W. BAADE

Mount Wilson Observatory

*Received April 27, 1944*

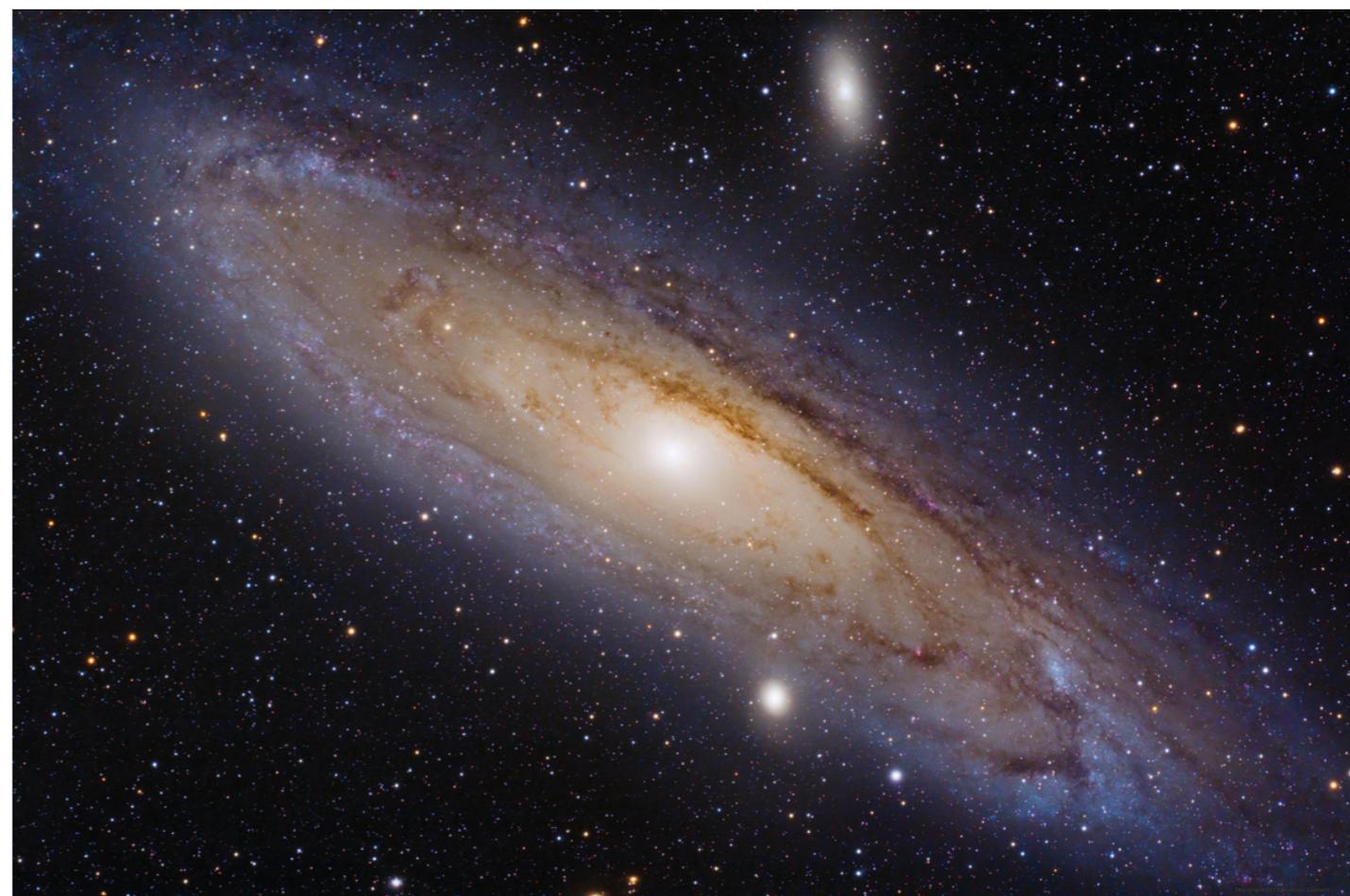
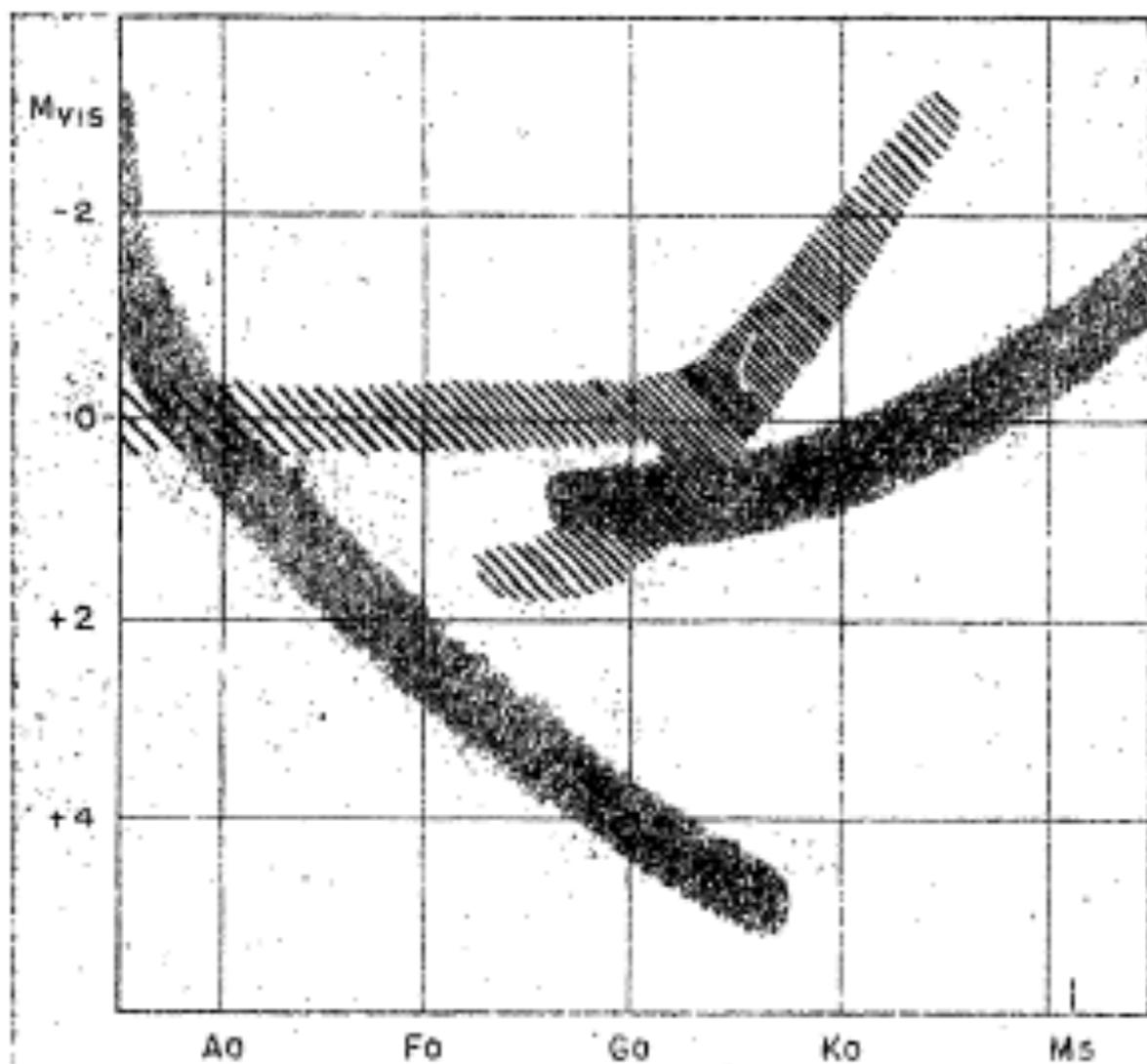


FIG. 1.—Shaded areas: ordinary H-R diagram (type I). Hatched area: H-R diagram of stars in globular clusters (type II).

The Hertzsprung-Russell diagram of the stars in the early-type nebulae is shown to be closely related to, if not identical with, that of the globular clusters. This leads to the further conclusion that the stellar populations of the galaxies fall into two distinct groups, one represented by the well-known H-R diagram of the stars in our solar neighborhood (the slow-moving stars), the other by that of the globular clusters. Characteristic of the first group (type I) are highly luminous O- and B-type stars and open clusters; of the second (type II), short-period Cepheids and globular clusters. Early-type nebulae (E-Sa) seem to have populations of the pure type II. Both types seem to coexist in the intermediate and late-type nebulae.

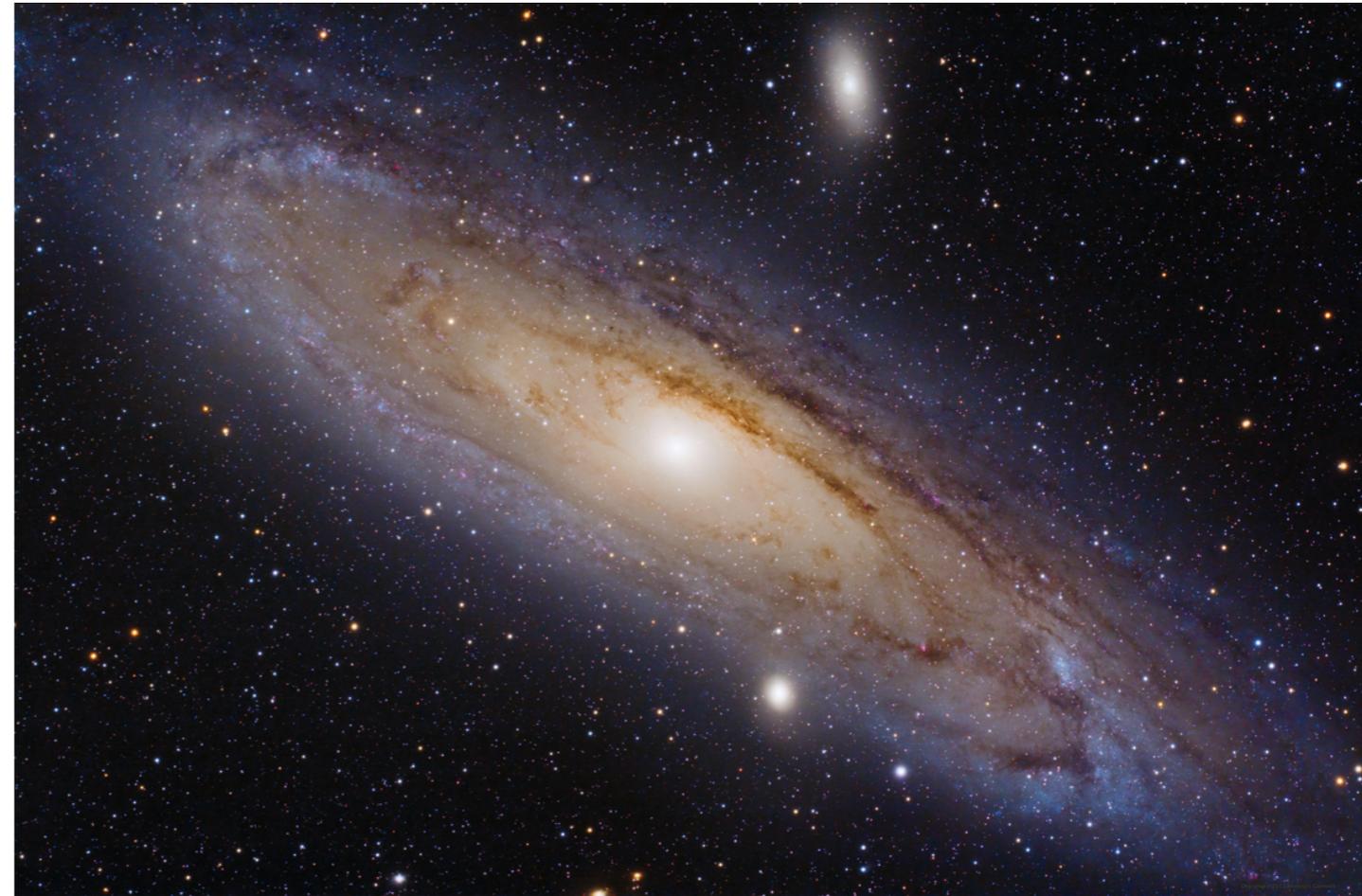
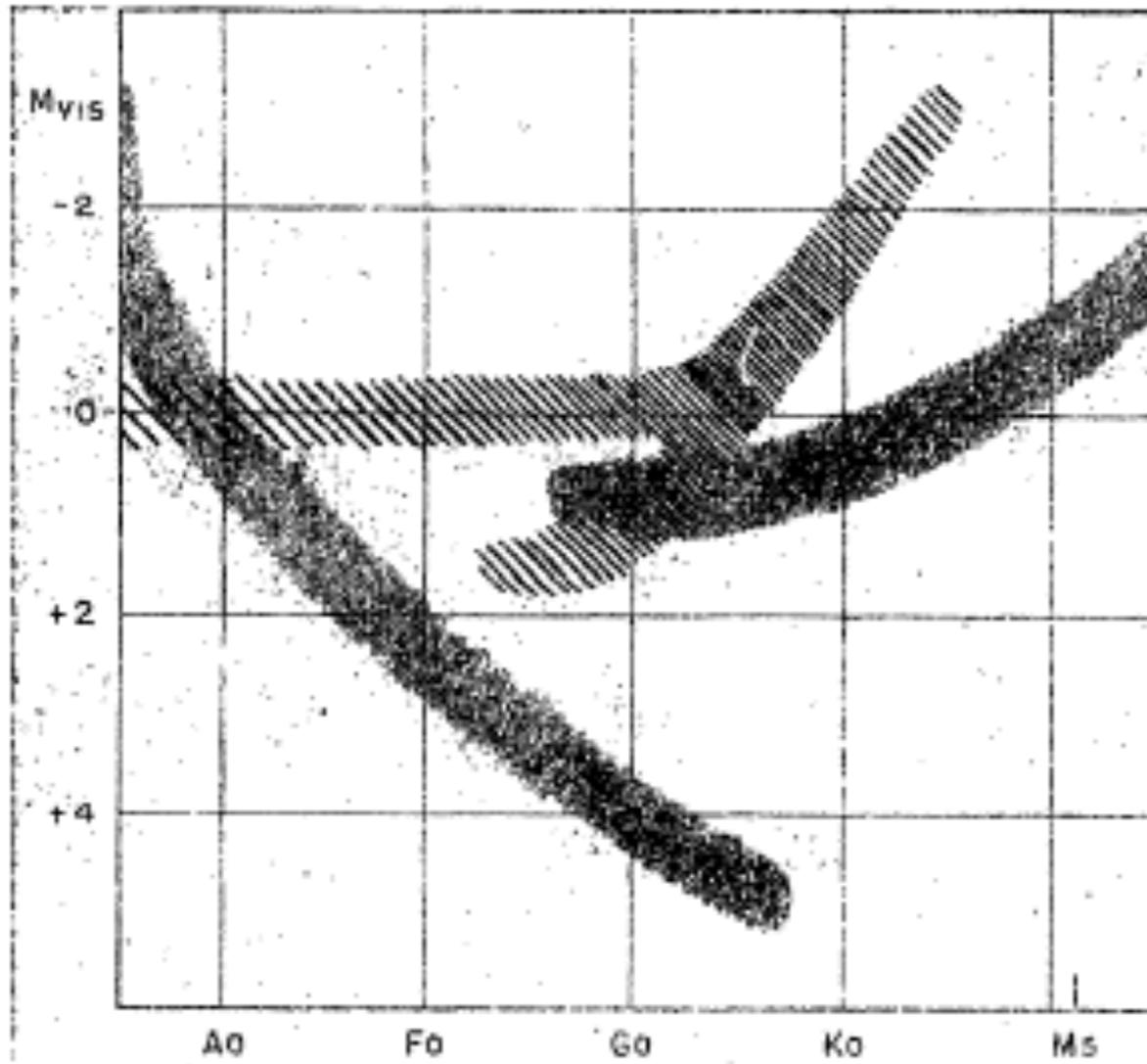
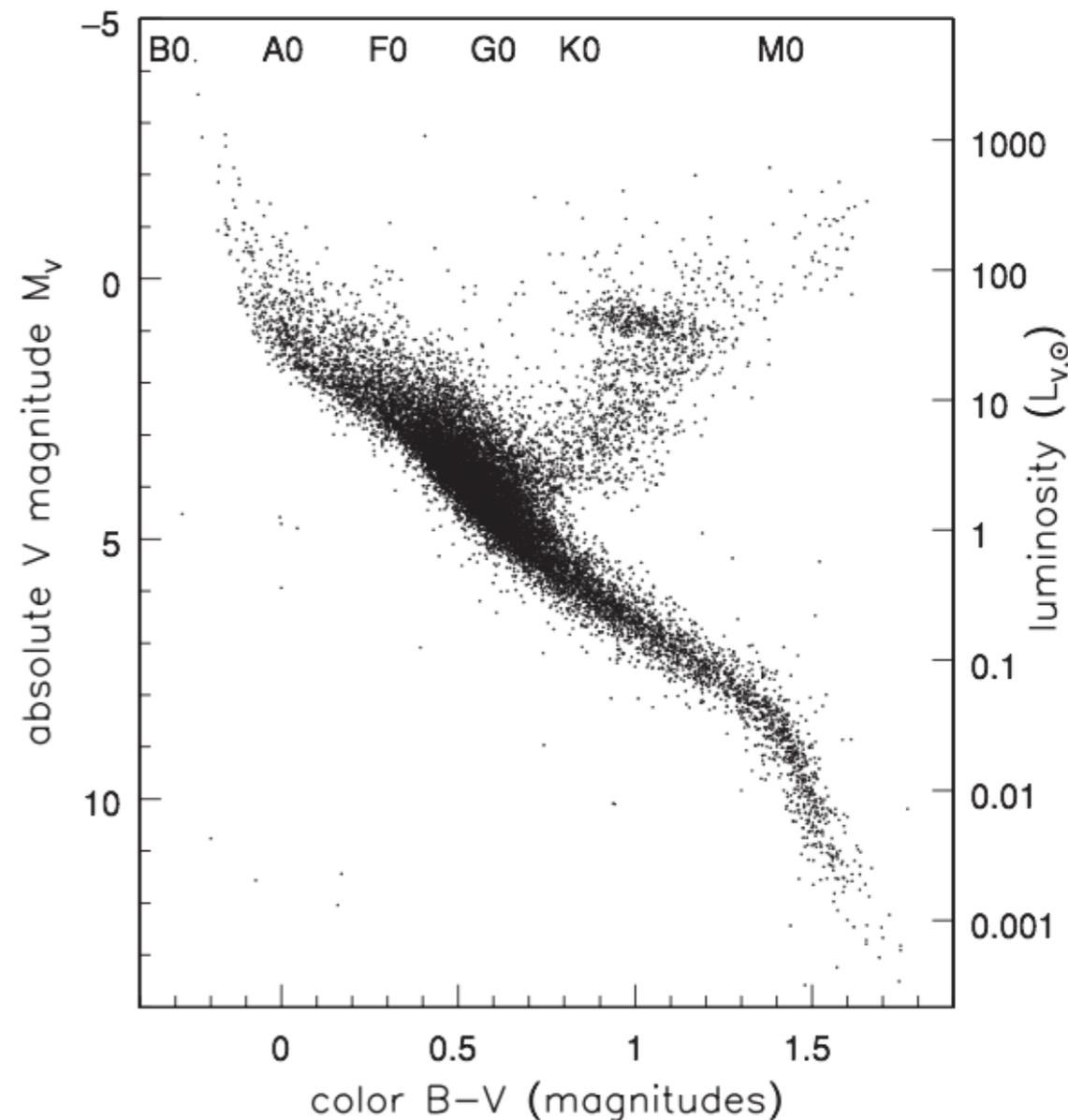
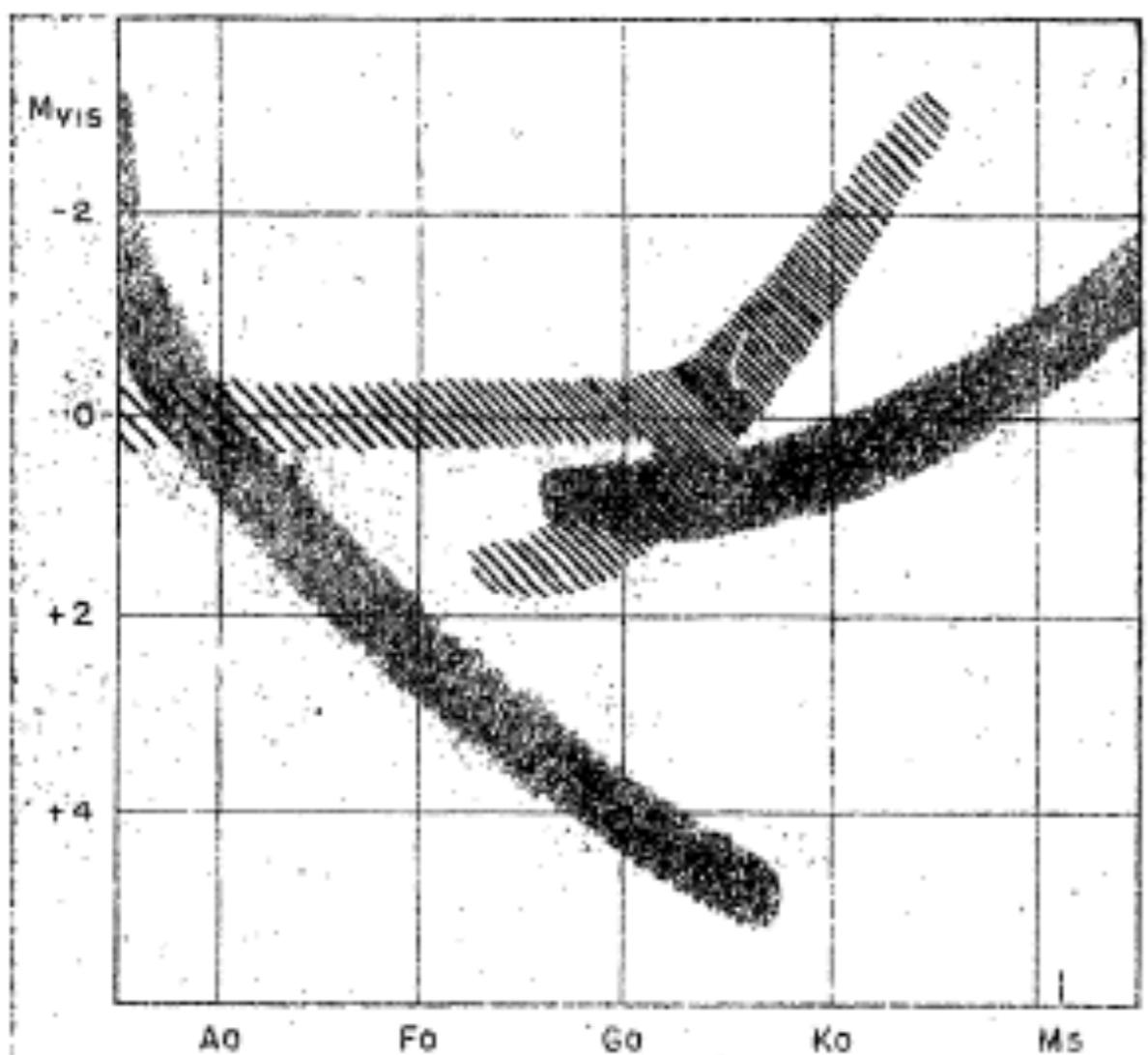


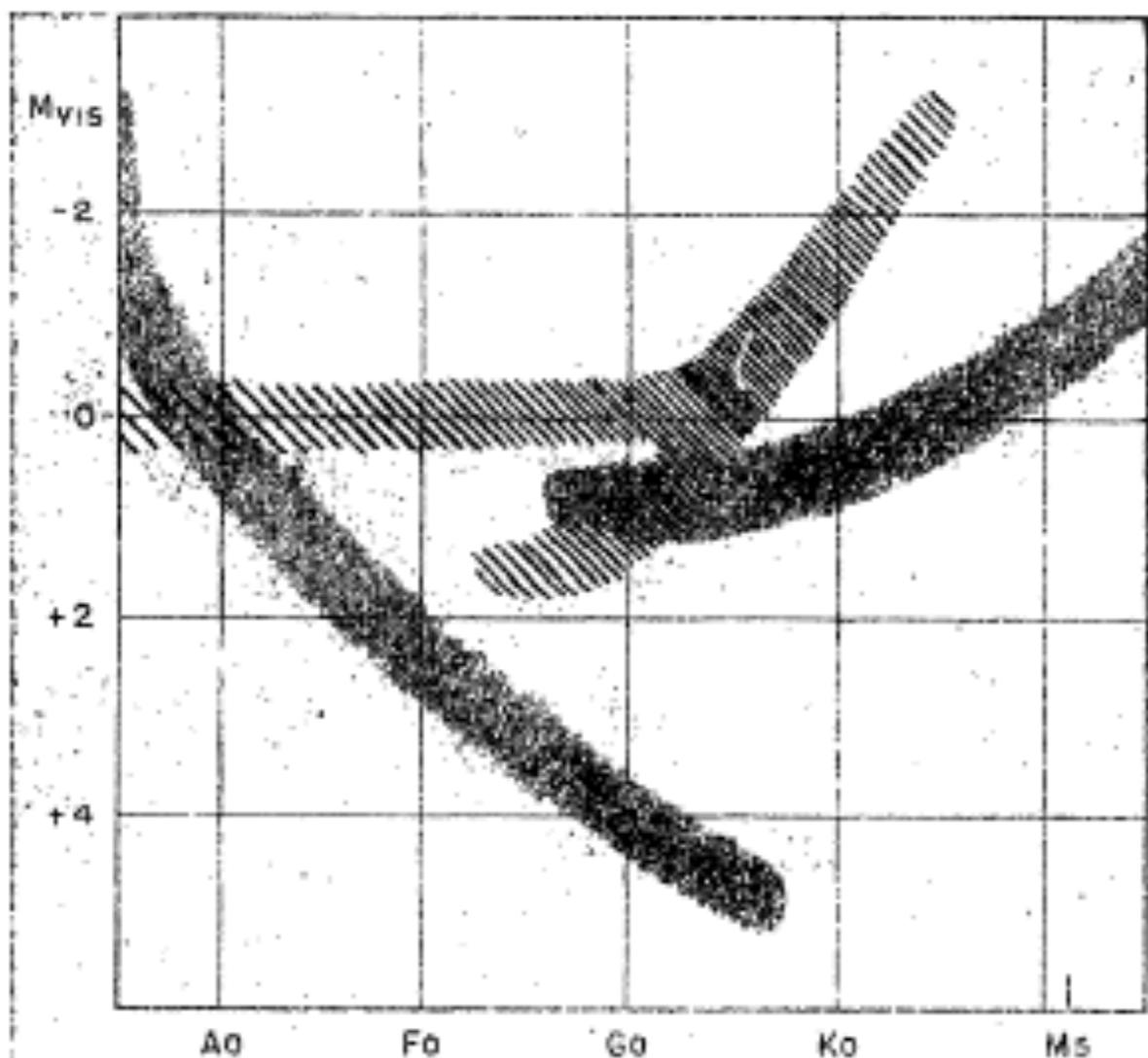
FIG. 1.—Shaded areas: ordinary H-R diagram (type I). Hatched area: H-R diagram of stars in globular clusters (type II).

# População I

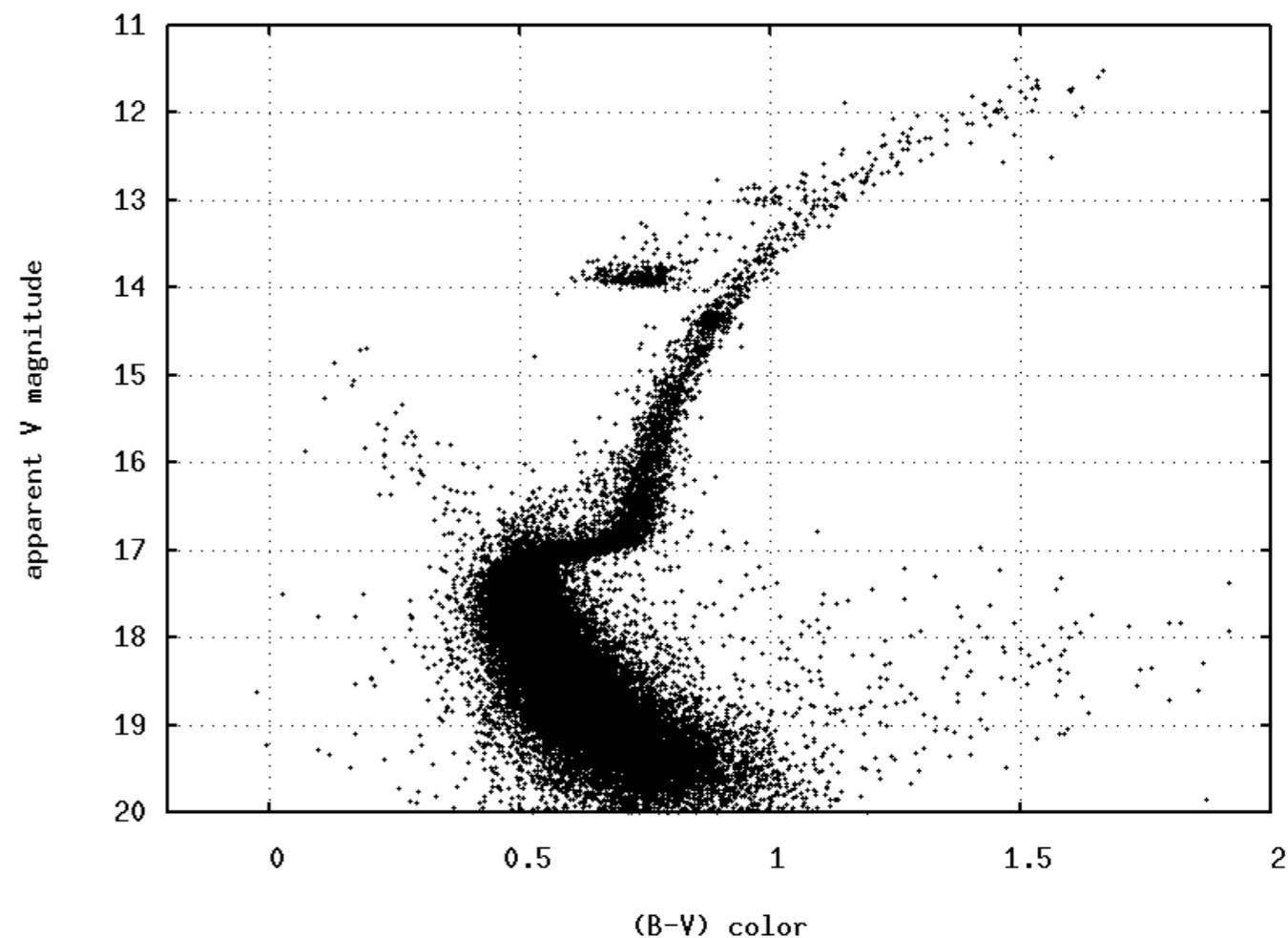


- ❖ Estrelas que populavam o disco de galáxias espirais, caracterizadas pelo diagrama cor-magnitude de aglomerados abertos e estrelas jovens e *slow-moving stars*

# População II

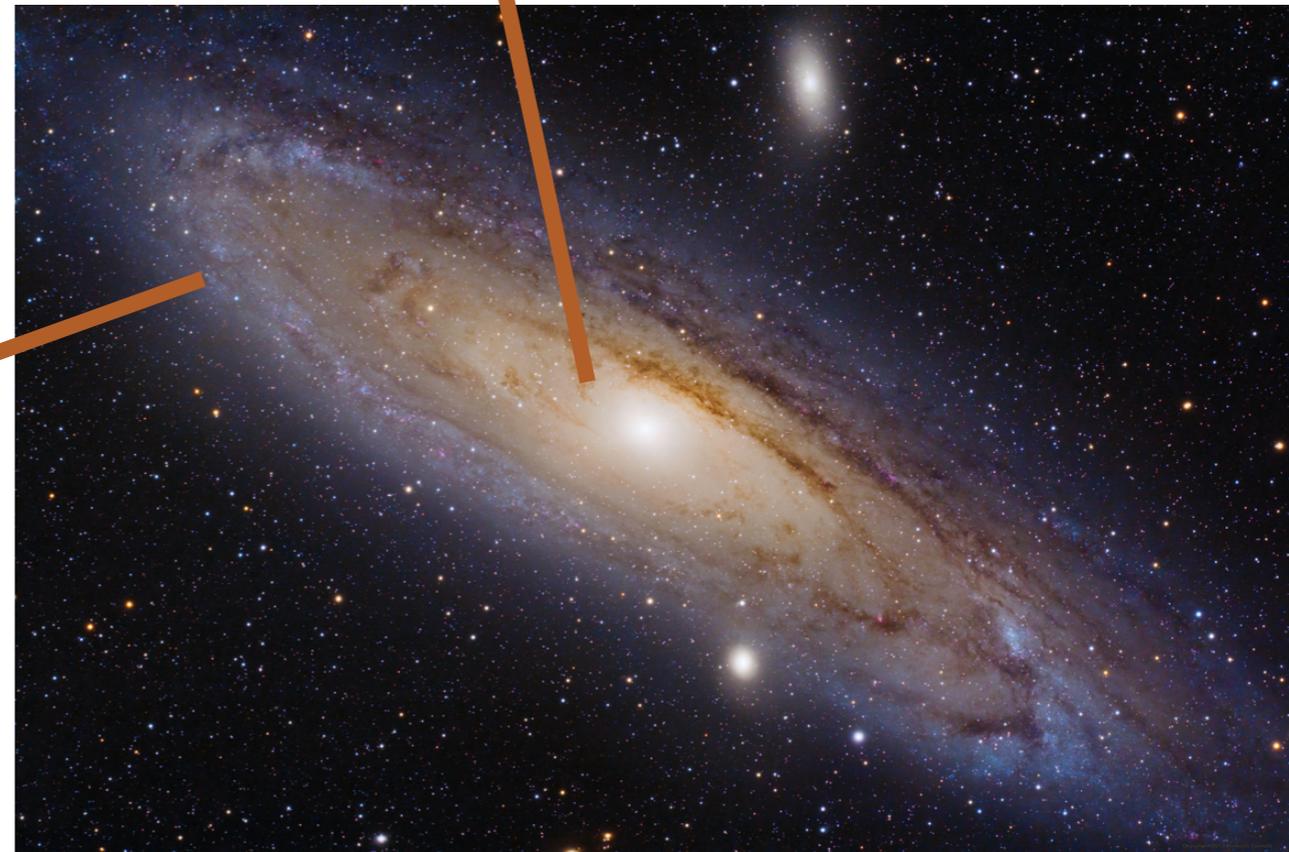
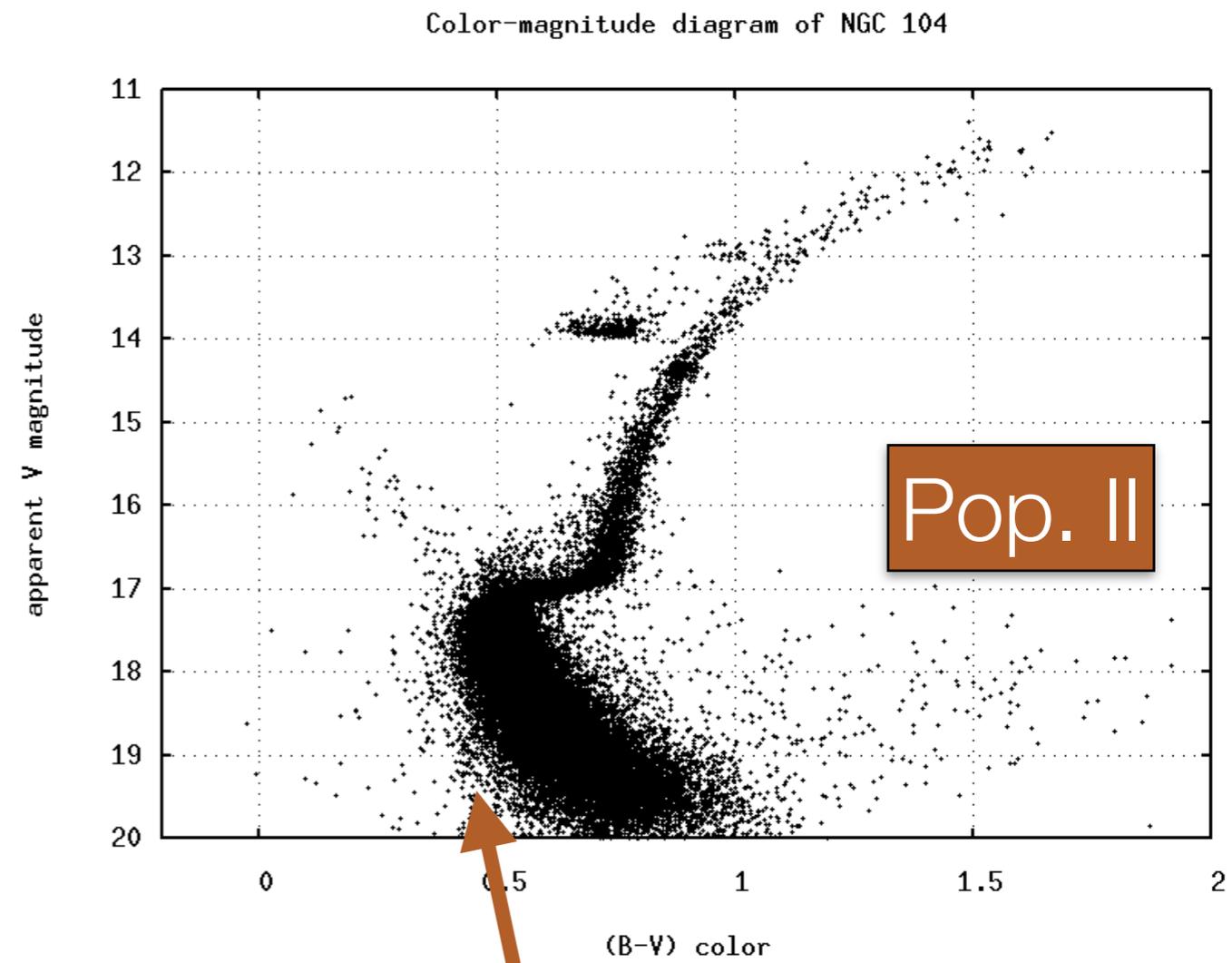
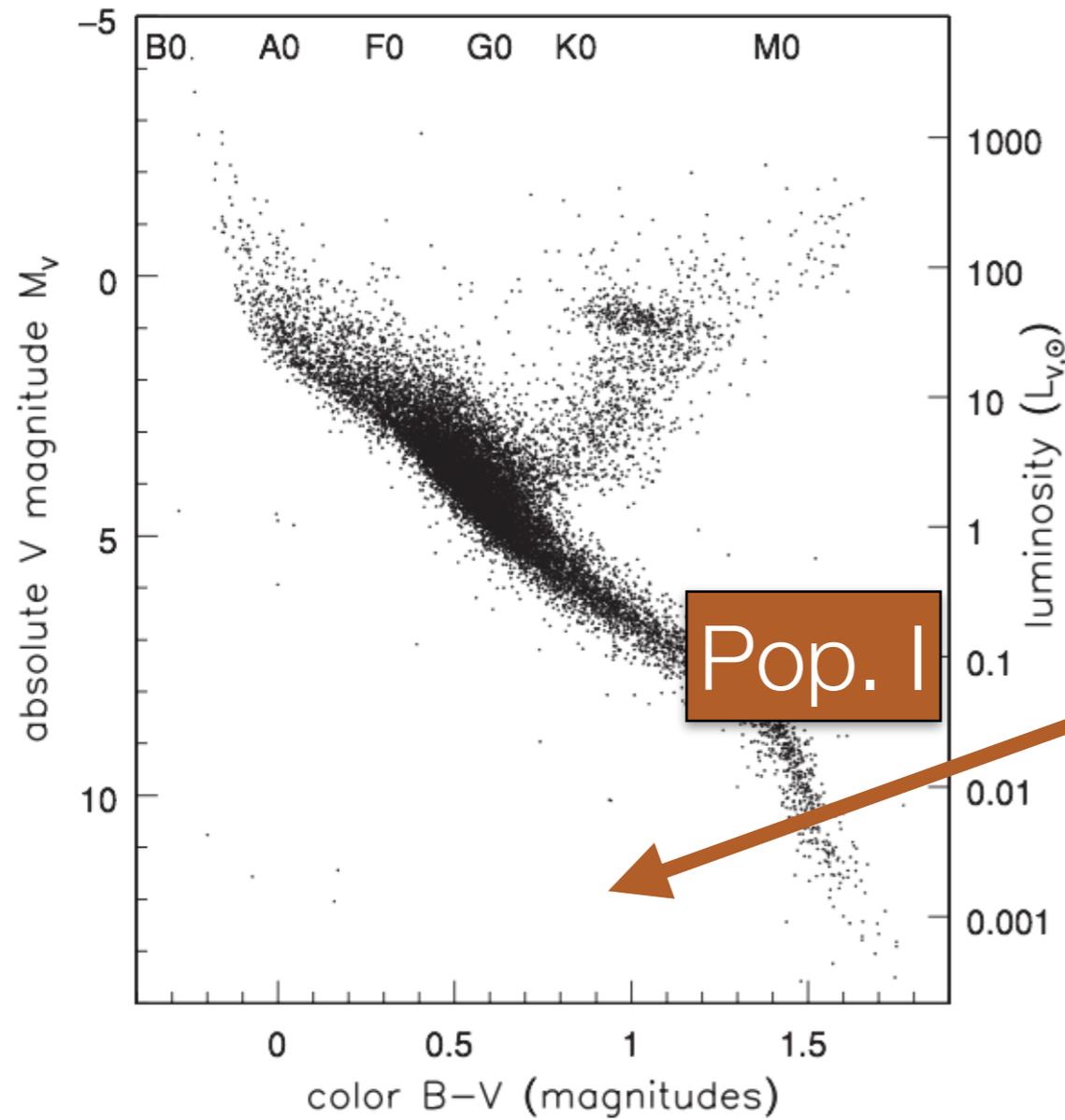


Color-magnitude diagram of NGC 104



- ✿ Estrelas que populavam o halo de galáxias espirais e as galáxias elípticas, caracterizadas pelo diagrama cor-magnitude de aglomerados globulares.

# Populações estelares



# Populações Estelares

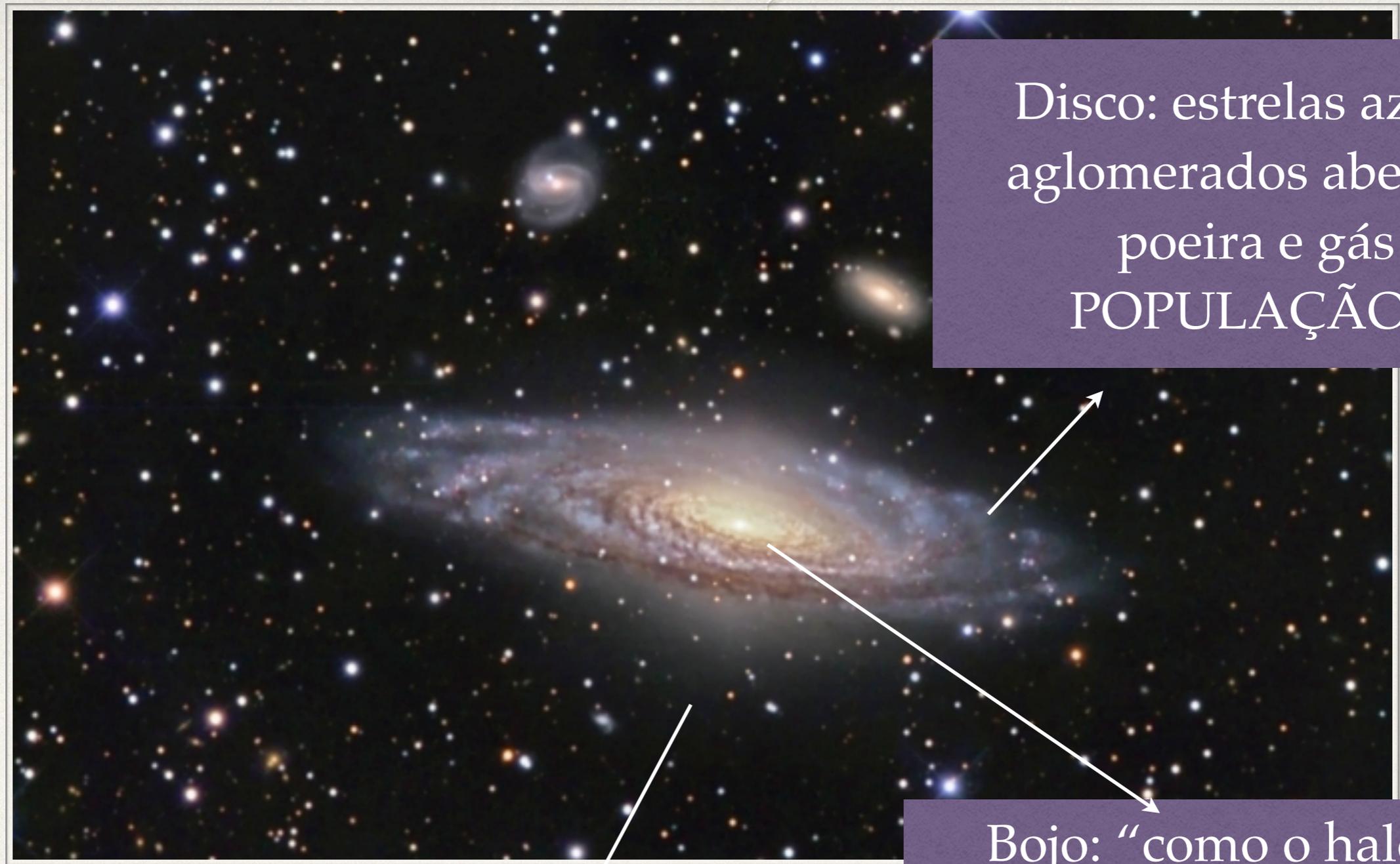
---

- ❖ Conceito hoje expandiu além do original
- ❖ Pretende distinguir os diversos componentes de uma galáxia e relacionar esses componentes com estrelas de diferentes idades, composições químicas, propriedades cinemáticas e posições.
- ❖ Principal objetivo hoje do estudo de Pop. Estelares: compreensão da formação e evolução das galáxias.

# Populações Estelares

---

- ❖ População Estelar : um conjunto de estrelas que compartilham uma história evolutiva em comum. Uma galáxia pode conter diversas populações.
- ❖ Pop I : estrelas que habitam o disco de galáxias espirais, caracterizadas pelo diagrama cor-magnitude de aglomerados abertos e estrelas jovens e *slow-moving stars*
- ❖ Pop II : estrelas que habitam o halo de galáxias espirais e as galáxias elípticas, caracterizadas pelo diagrama cor-magnitude de aglomerados globulares.
- ❖ Pop III : a primeira geração de estrelas que se formou no Universo, com composição química primordial (H, He e traços de elementos leves)



Disco: estrelas azuis,  
aglomerados abertos,  
poeira e gás  
POPULAÇÃO I

Bojo: "como o halo"???  
veremos...

Halo: estrelas vermelhas,  
aglomerados globulares  
POPULAÇÃO II

NGC 7331

# Evolução Química

---

Conceitos

Nuvens moleculares dão origem a estrelas, que enriquecem quimicamente outras nuvens, que geram novas estrelas...



estrelas se formam



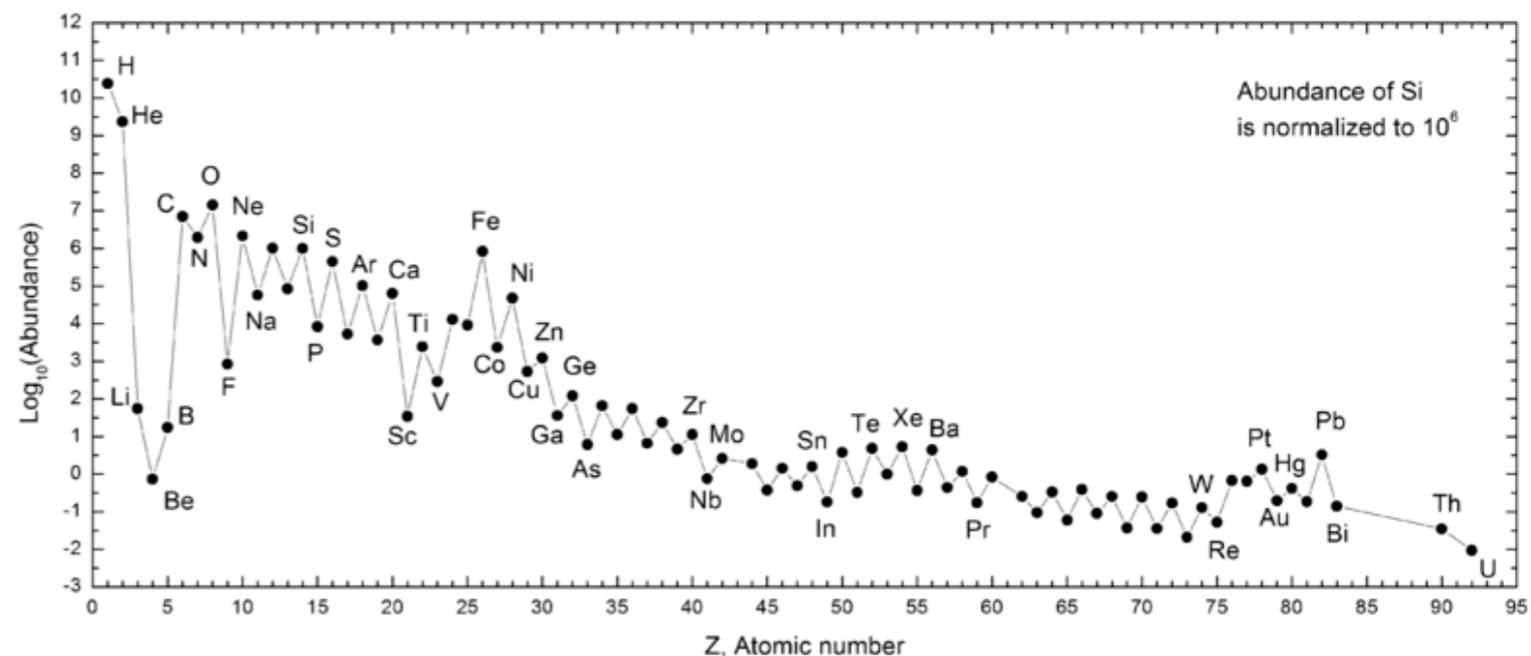
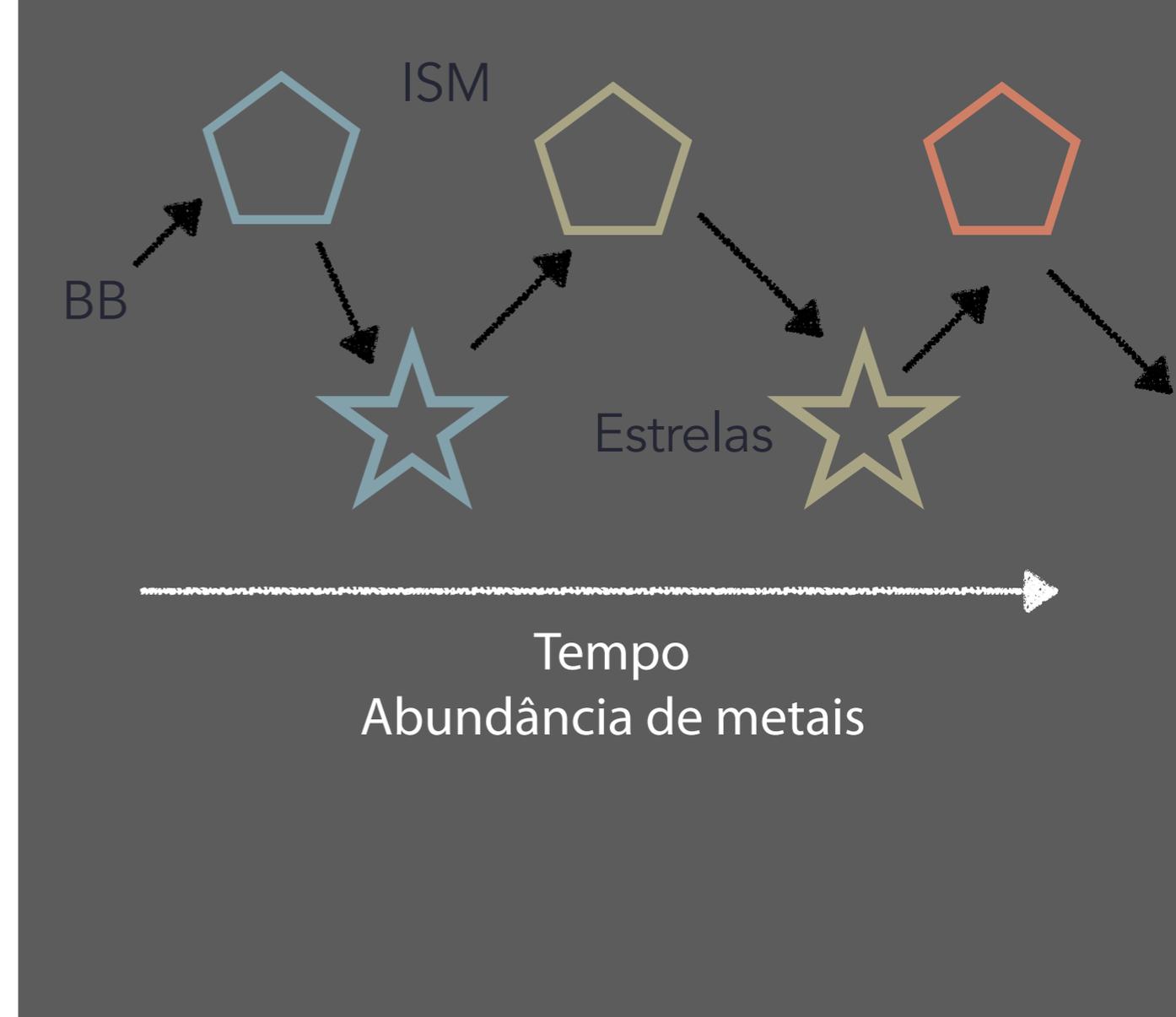
e morrem



enriquecendo novas nuvens

# Evolução química

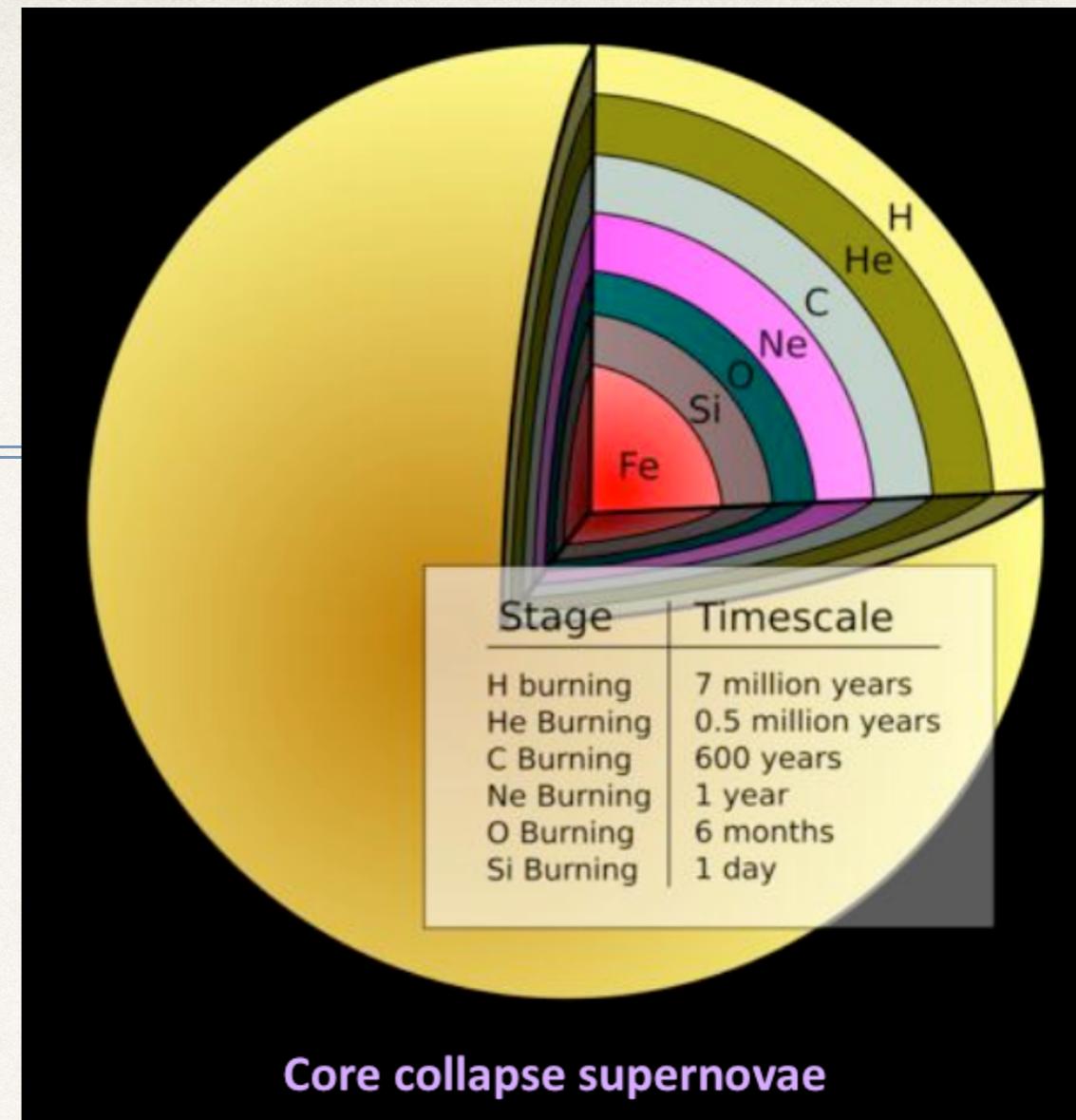
- Nucleossíntese:
  - primordial: produziu H (~75%), He (~25%) e traços de metais leves (Li)
  - cosmogênica: espalação por raios cósmicos produz Litio, Berílio e Boro
  - estelar (e explosiva): todos os elementos mais pesados são formados por reações nucleares que ocorrem em estrelas
- quando as estrelas perdem massa (ventos estelares, explosões em supernova), liberam no meio interestelar parte do material processado no seu interior, enriquecendo o meio.



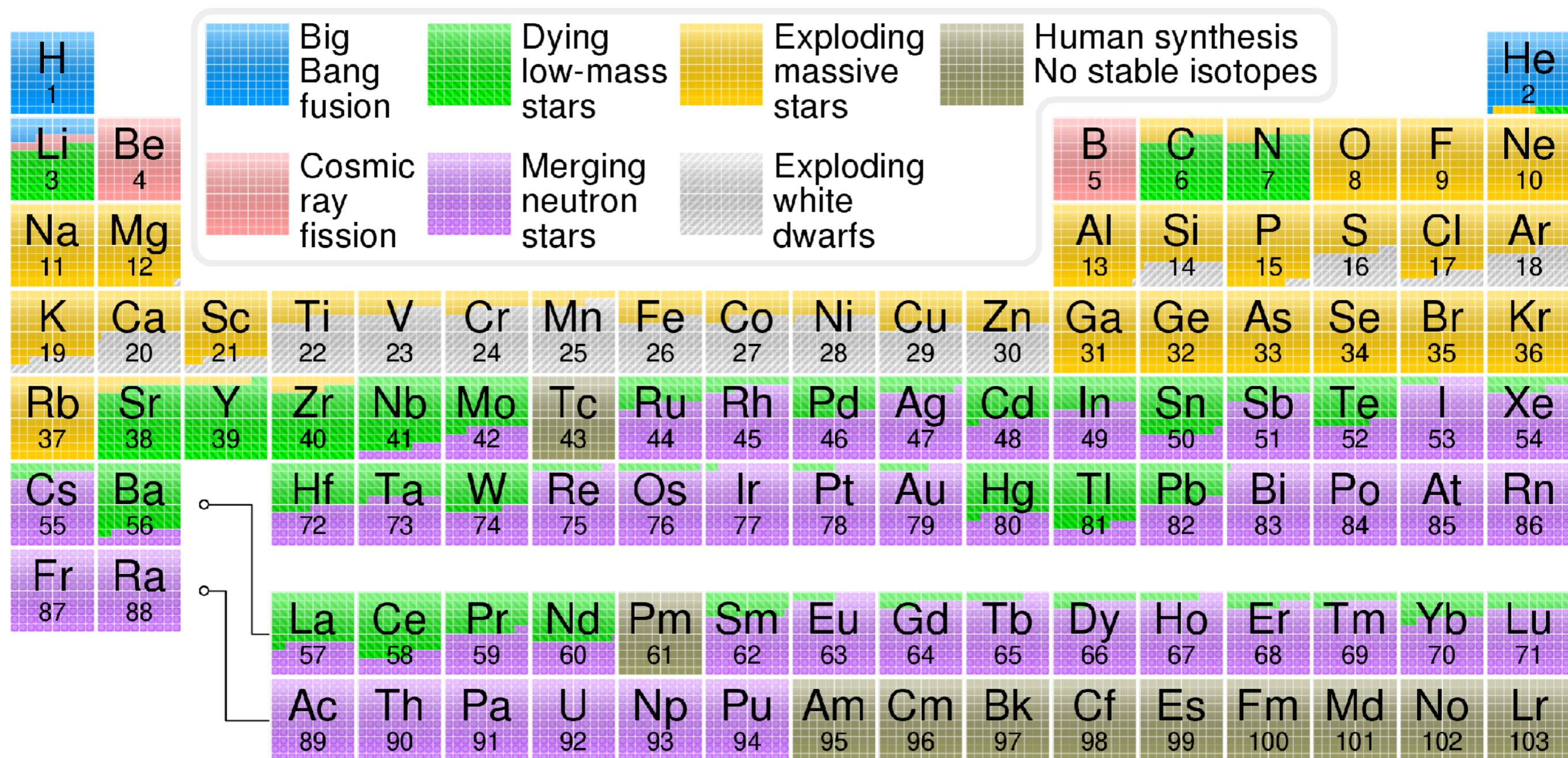
Abundâncias químicas no Sistema Solar

# Enriquecimento químico

- ❖ Ao final de sua evolução, a estrela retorna ao meio interestelar parte do material que foi processado
- ❖ Novas estrelas se formam a partir desse material enriquecido. As novas estrelas (mais jovens) são mais ricas em metais do que a população anterior.
- ❖ Os elementos precisam ser devolvidos ao meio-interestelar. Os principais processos são ventos estelares (eg. AGB) ou eventos explosivos, principalmente Supernovas.



# Sítios de formação dos elementos químicos



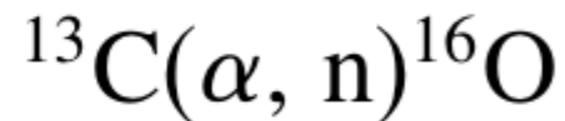
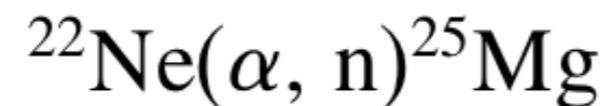
# Grupos de elementos em evolução química de galáxias

- ◆ Elementos leves (C, N, Al, Na, Li)
- ◆ Elementos  $\alpha$  (Ne, Mg, O, Si, S, Ar, Ca, Ti)
- ◆ Pico do Ferro (V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni)
- ◆ Elementos do processo  $s$  (Sr, Y, Zr, Ba, La, Ce, Pr e Nd)
- ◆ Elementos do processo  $r$  (elementos radioativos e os elementos pesados ricos em nêutrons)

## Formação de elementos s (s de *slow*)

---

- Elementos mais pesados do que o Fe, formados através da captura lenta de nêutrons (*lenta* comparada com a escala de tempo do decaimento beta).
- Sr, Y, Zr, Ba, La, Ce, Pr e Nd
- Durante algumas fases das pulsações TP-AGB, entre camadas de queima ocorrem condições particulares de temperatura e densidade ocorrem (thermonuclear runaway).
- Nessas fases, podem ocorrer reações nucleares que promovem um fluxo de nêutrons, como:



# Formação de elementos r (r de *rapid*)

- Supernovas de colapso (Tipo Ib, Ic and II) de núcleo são consideradas os sítios prováveis dos elementos-r (elementos radioativos e os elementos pesados ricos em nêutrons), que precisam de altos fluxos de neutrons pra serem produzidos

		<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; background-color: #f0f0f0;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="background-color: #ccccff; padding: 5px;">B</td> <td style="padding: 5px;"><b>Big Bang</b></td> <td style="background-color: #90ee90; padding: 5px;">L</td> <td style="padding: 5px;"><b>Large stars</b></td> <td style="background-color: #ffcc99; padding: 5px;">s</td> <td style="padding: 5px;"><b>Super-novae</b></td> </tr> <tr> <td style="background-color: #add8e6; padding: 5px;">C</td> <td style="padding: 5px;"><b>Cosmic rays</b></td> <td style="background-color: #ffff99; padding: 5px;">s</td> <td style="padding: 5px;"><b>Small stars</b></td> <td style="background-color: #ccccff; padding: 5px;">M</td> <td style="padding: 5px;"><b>Man-made</b></td> </tr> </table> </div> </div>																B	<b>Big Bang</b>	L	<b>Large stars</b>	s	<b>Super-novae</b>	C	<b>Cosmic rays</b>	s	<b>Small stars</b>	M	<b>Man-made</b>	
B	<b>Big Bang</b>	L	<b>Large stars</b>	s	<b>Super-novae</b>																									
C	<b>Cosmic rays</b>	s	<b>Small stars</b>	M	<b>Man-made</b>																									
H																	He													
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne													
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar													
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr													
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe													
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn													
Fr	Ra		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu													
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr													

# Yield

### 3. The yield per stellar generation

The “yield per stellar generation” of a single chemical element, can be defined as (Tinsley 1980):

$$y_i = \frac{\int_1^\infty m p_{im} \phi(m) dm}{(1 - R)} \quad (3)$$

where  $p_{im}$  is the mass of the newly produced element  $i$  ejected by a star of mass  $m$ , and  $R$  is the returned fraction. The yield  $y_i$  is therefore the mass fraction of the element  $i$  newly produced by a generation of stars relative to the fraction of mass in remnants (white dwarfs, neutron stars and black holes) and never dying low mass stars ( $M < 0.1M_\odot$ ).

We define “returned fraction” the fraction of mass ejected into the ISM by an entire stellar generation, namely:

$$R = \int_1^\infty (m - M_{rem}) \phi(m) dm \quad (4)$$

Matteucci (2016), “*Introduction to Galactic Chemical Evolution*”

<https://arxiv.org/pdf/1602.01004.pdf>

# Notação de abundância química

---

- ❖ Em espectroscopia estelar, a notação mais usada para a metalicidade é

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log_{10} \left( \frac{N_{\text{Fe}}}{N_{\text{H}}} \right) - \log_{10} \left( \frac{N_{\text{Fe}\odot}}{N_{\text{H}\odot}} \right)$$

- ❖ i.e., o logaritmo da razão entre as abundâncias do Fe e do H (densidade numérica: número de átomos por unidade de volume), comparado ao valor solar.
- ❖ Para o Sol,  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$  (por definição)
- ❖ Estrelas com mais metais do que o Sol tem  $[\text{Fe}/\text{H}] > 0$ , e estrelas com menos metais do que o Sol tem  $[\text{Fe}/\text{H}] < 0$

# Notação de abundância química

---

- ❖ Para os outros elementos, por exemplo os elementos  $\alpha$  (O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Ti):

$$[\alpha/\text{Fe}] = \log_{10} \left( \frac{N_{\alpha}}{N_{\text{Fe}}} \right) - \log_{10} \left( \frac{N_{\alpha\odot}}{N_{\text{Fe}\odot}} \right)$$

- ❖ Em outros contextos (ex, modelos de evolução estelar), metalicidade é dada em frações de massa

- ❖ X: massa de Hidrogênio

Y: massa de Hélio

- ❖ Z: massa de Metais

$$X + Y + Z = 1$$

[Fe/H]

---

$[\text{Fe}/\text{H}]$

---

- ❖ O Ferro é o “metal” mais abundante em uma estrela?

# [Fe/H]

---

- ❖ O Ferro é o “metal” mais abundante em uma estrela?
- ❖ Não, Oxigênio é.

Most abundant nuclides in the Solar System<sup>[8]</sup>

Nuclide	A	Mass fraction in parts per million	Atom fraction in parts per million
Hydrogen-1	1	705,700	909,964
Helium-4	4	275,200	88,714
Oxygen-16	16	5,920	477
Carbon-12	12	3,032	326
Nitrogen-14	14	1,105	102

# [Fe/H]

- ❖ O Ferro é o “metal” mais abundante em uma estrela?
- ❖ Não, Oxigênio é.

Most abundant nuclides in the Solar System<sup>[8]</sup>

Nuclide	A	Mass fraction in parts per million	Atom fraction in parts per million
Hydrogen-1	1	705,700	909,964
Helium-4	4	275,200	88,714
Oxygen-16	16	5,920	477
Carbon-12	12	3,032	326
Nitrogen-14	14	1,105	102

Então porque o usamos como padrão de medida de metalicidade em espectros de estrelas?

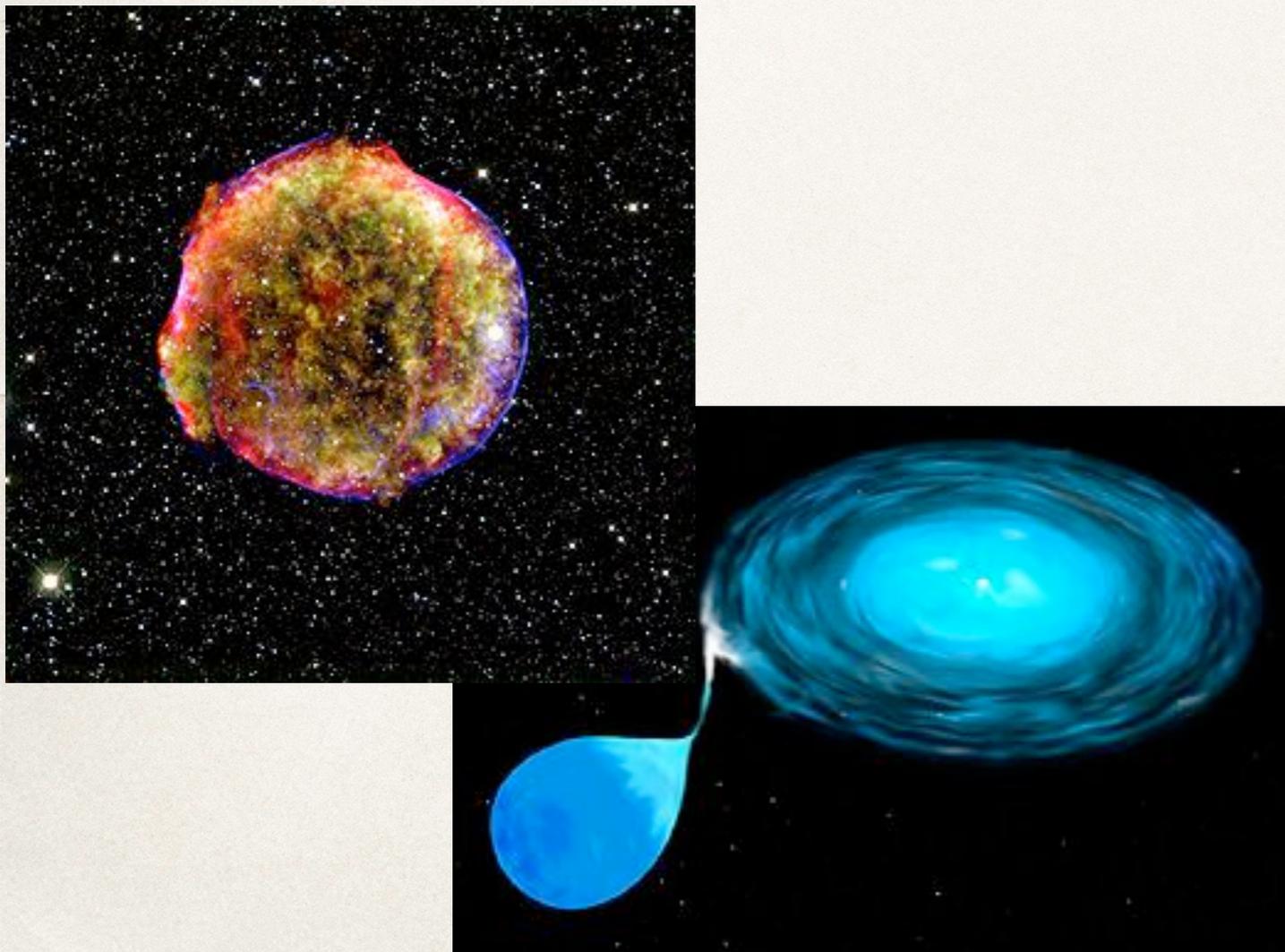
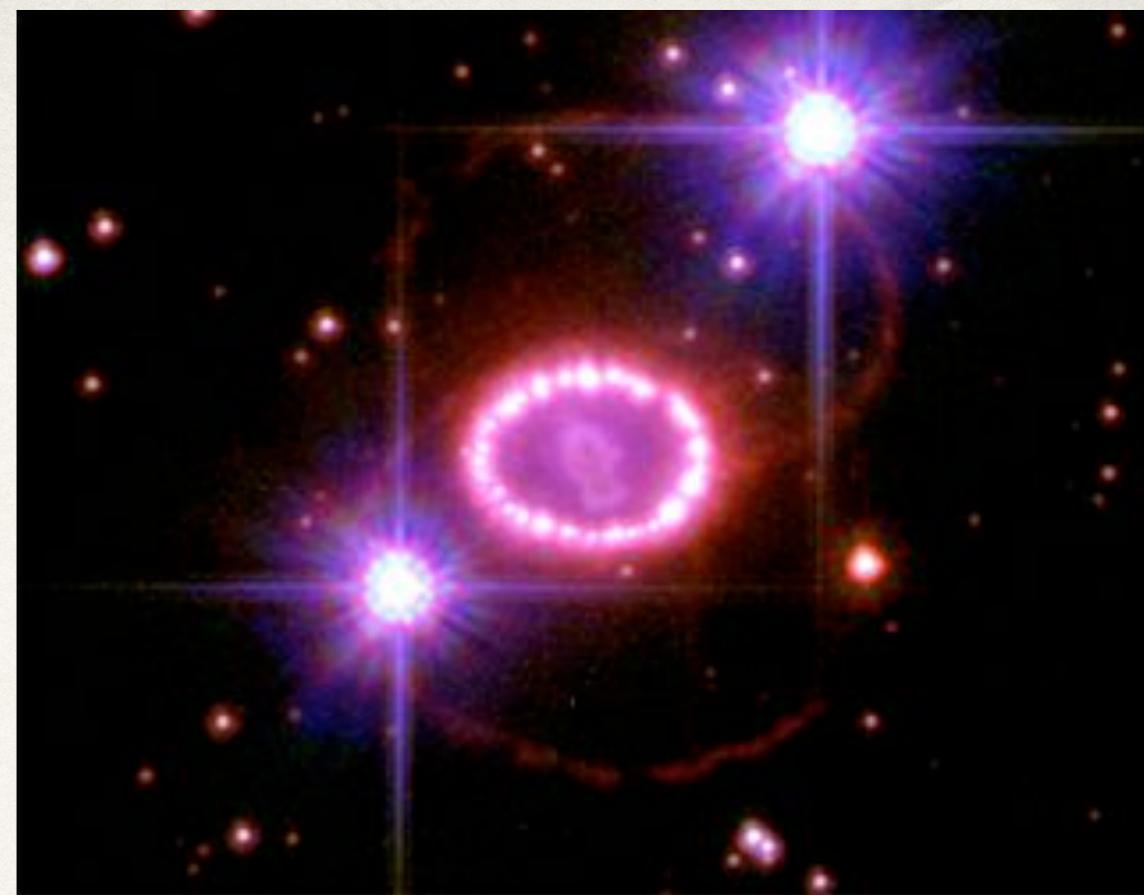
# A razão $[\alpha/\text{Fe}]$ como um relógio cósmico

---

## SN II, Ib e Ic

### Core-collapse Supernovas

“Morte” de estrelas de alta massa. Jogam no meio interestelar elementos do pico do Ferro (V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni) e grandes quantidades de elementos  $\alpha$  (Ne, Mg, O, Si, S, Ar, Ca, Ti)



## SN Ia

Anãs-brancas em sistemas binários que acretam matéria da estrela companheira. Explodem quando a massa ultrapassa o limite de Chandrasekar: jogam no meio interestelar quase que exclusivamente elementos do pico do Ferro

$$Z = 0$$

pop. primordial se forma e começa a evoluir

SN II explodem e contaminam o meio com elementos  $\alpha$  e pico do Fe

SN Ia surgem e contaminam o meio com elementos do pico do Fe

... ->

$$[\alpha/\text{Fe}] > 0$$

pop. se forma de um meio enriquecido por SN II

... ->

$$[\alpha/\text{Fe}] = 0$$

pop. se forma de um meio enriquecido por SN Ia

... ->

tempo

$$[\alpha/\text{Fe}] < 0$$



$Z = 0$

pop. primordial se forma e começa a evoluir

Pop III

SN II explodem e contaminam o meio com elementos  $\alpha$  e pico do Fe

SN Ia surgem e contaminam o meio com elementos do pico do Fe

... ->

$[\alpha/Fe] > 0$

pop. se forma de um meio enriquecido por SN II

Pop II

... ->

NO CASO DE NOSSA GALÁXIA...

$[\alpha/Fe] = 0$

pop. se forma de um meio enriquecido por SN Ia

Pop I

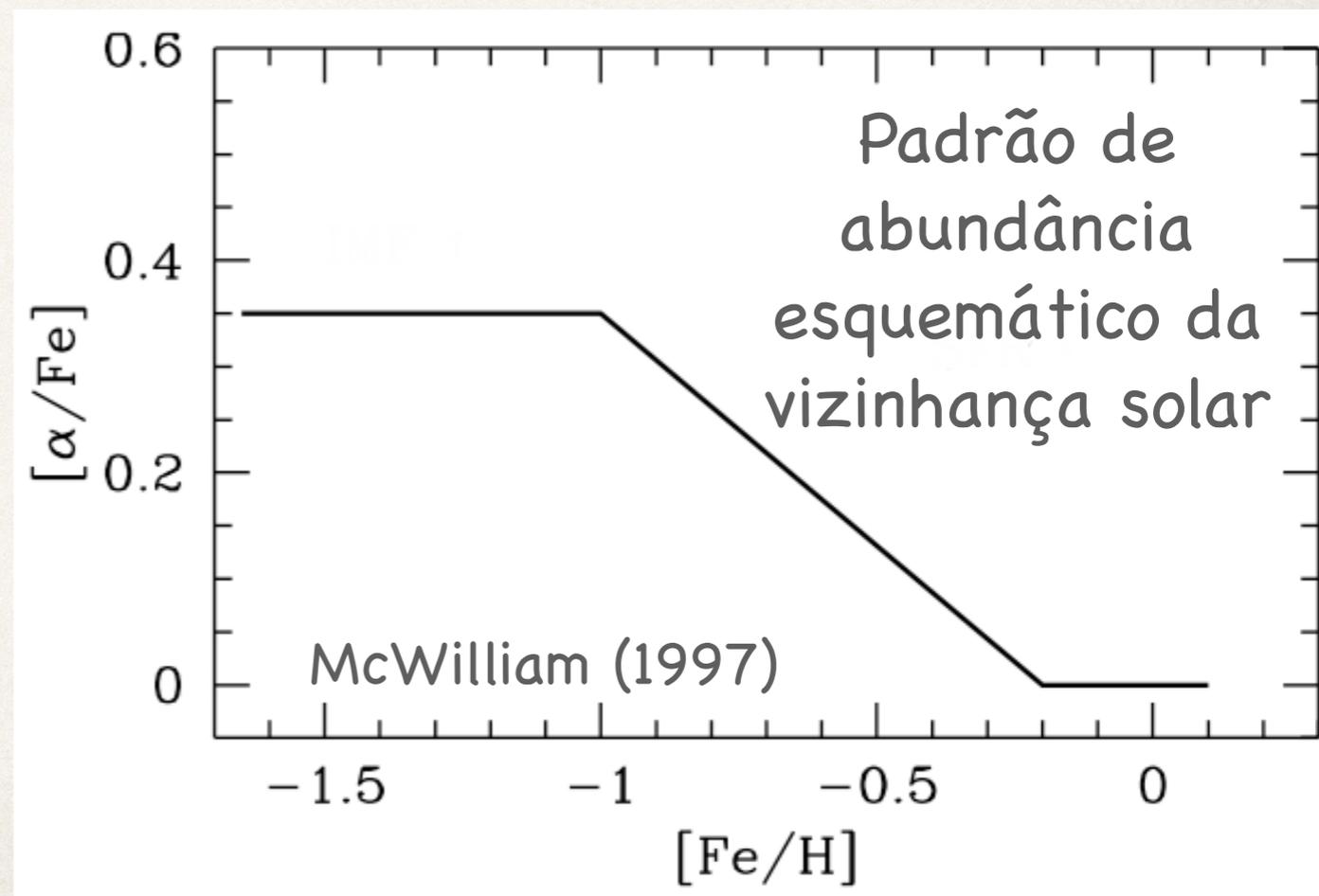
... ->

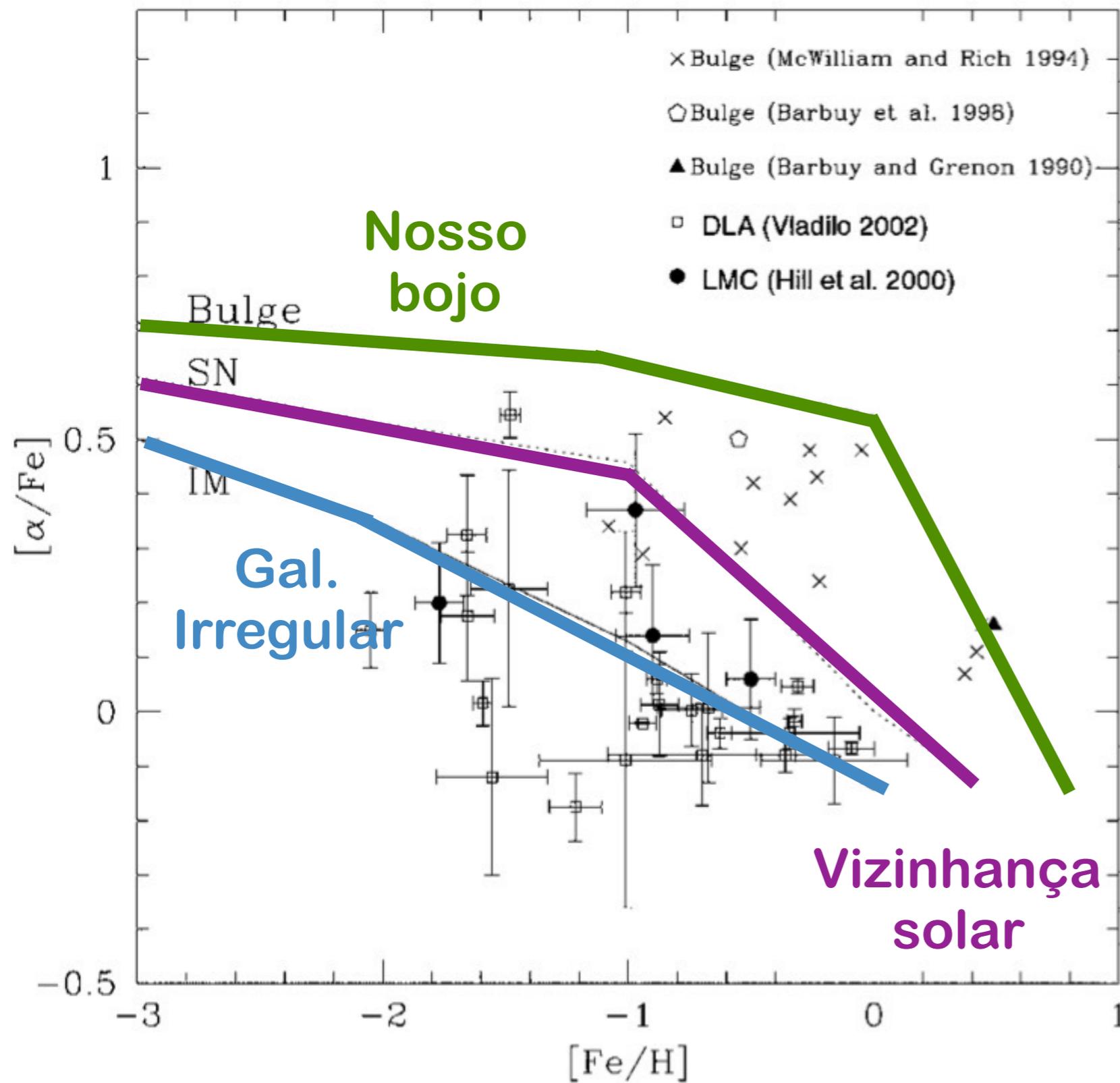
tempo



# Razões de abundâncias como relógios cósmicos

- ❖ estrelas com altos valores de  $[\alpha/\text{Fe}]$  foram formadas cedo na história da galáxia, quando a contribuição de SN II ao meio interestelar ainda era a mais importante
- ❖ Previsões teóricas de SN II mostram que  $[\alpha/\text{Fe}]$  aumenta com a massa da estrela progenitora
- ❖ populações estelares com altos  $[\alpha/\text{Fe}]$  são sistemas estrelas formaram-se “rápido”:  $[\alpha/\text{Fe}]$  é medida de quão longa foi estelar.





As razões  $[\alpha/\text{Fe}]$  para três histórias de formação estelar diferentes e mesma IMF e nucleossíntese  
 Crédito:  
 Matteucci '03.

# $[Fe/H]$ , $[\alpha/Fe]$ e formação estelar

---

- ❖ Uma nova geração de estrelas:
  - ❖ se nasce pouco após a geração anterior, vai se formar com uma razão  $\alpha/Fe$  alta
  - ❖ se nasce mais tarde (depois que SN Ia jogaram mais ferro no meio interestelar), terá uma abundância de  $\alpha$  em relação ao ferro mais baixa
- ❖ Populações com baixo  $[Fe/H]$  se formaram **cedo**, quando a Galáxia era jovem
- ❖ Populações com alto  $[\alpha/Fe]$  se formaram **rápido**, i.e. antes das SN Ia explodirem