

Capitulo 5: Evolucion estelar

5.1. Cumulos estelares y su diagramas magnitud - color

Messier 37 en Auriga – un cumulo "abierto"



cumulos estelares -
grupos de estrellas
de la misma edad y
"metalicidad"

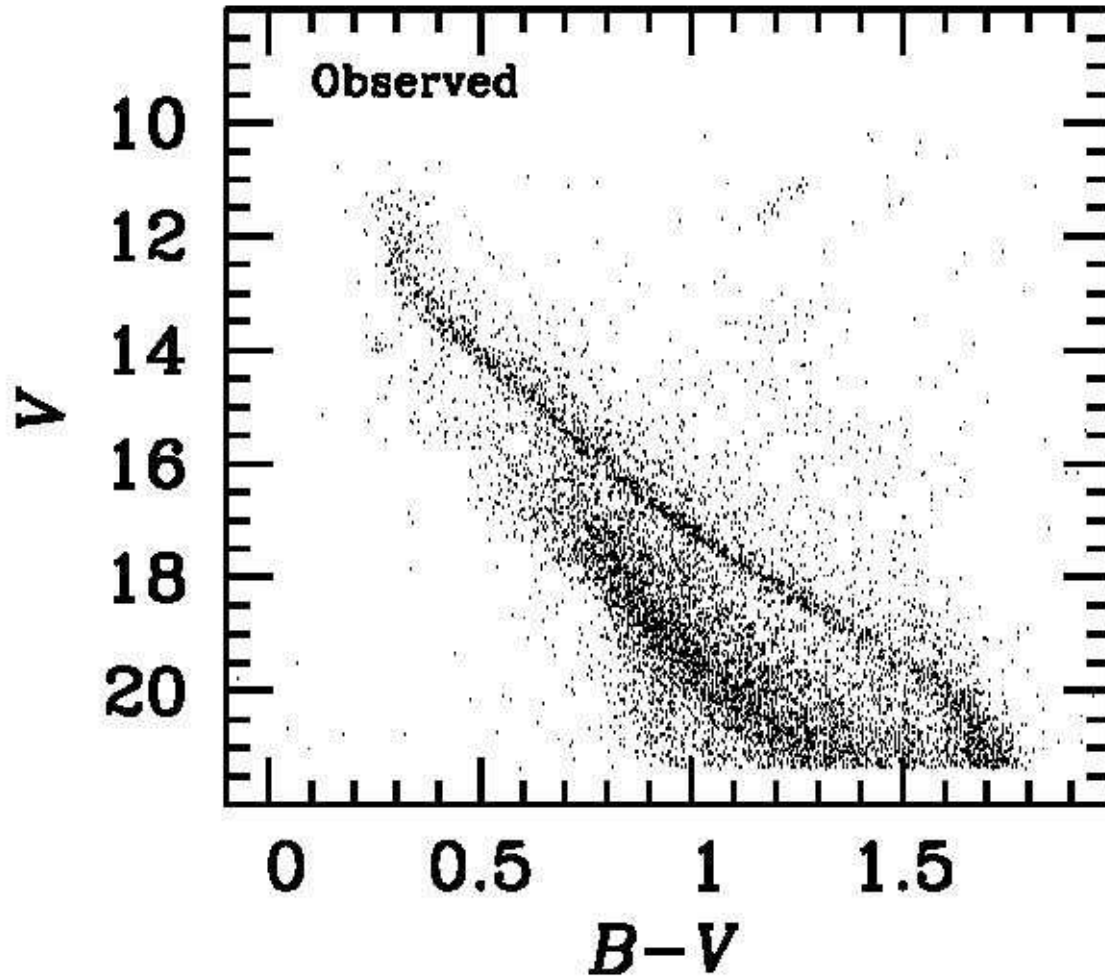
$$m-M = 10.4 \quad \text{o} \quad 1200 \text{ pc}$$

M_V

+1.6

+5.6

+9.6

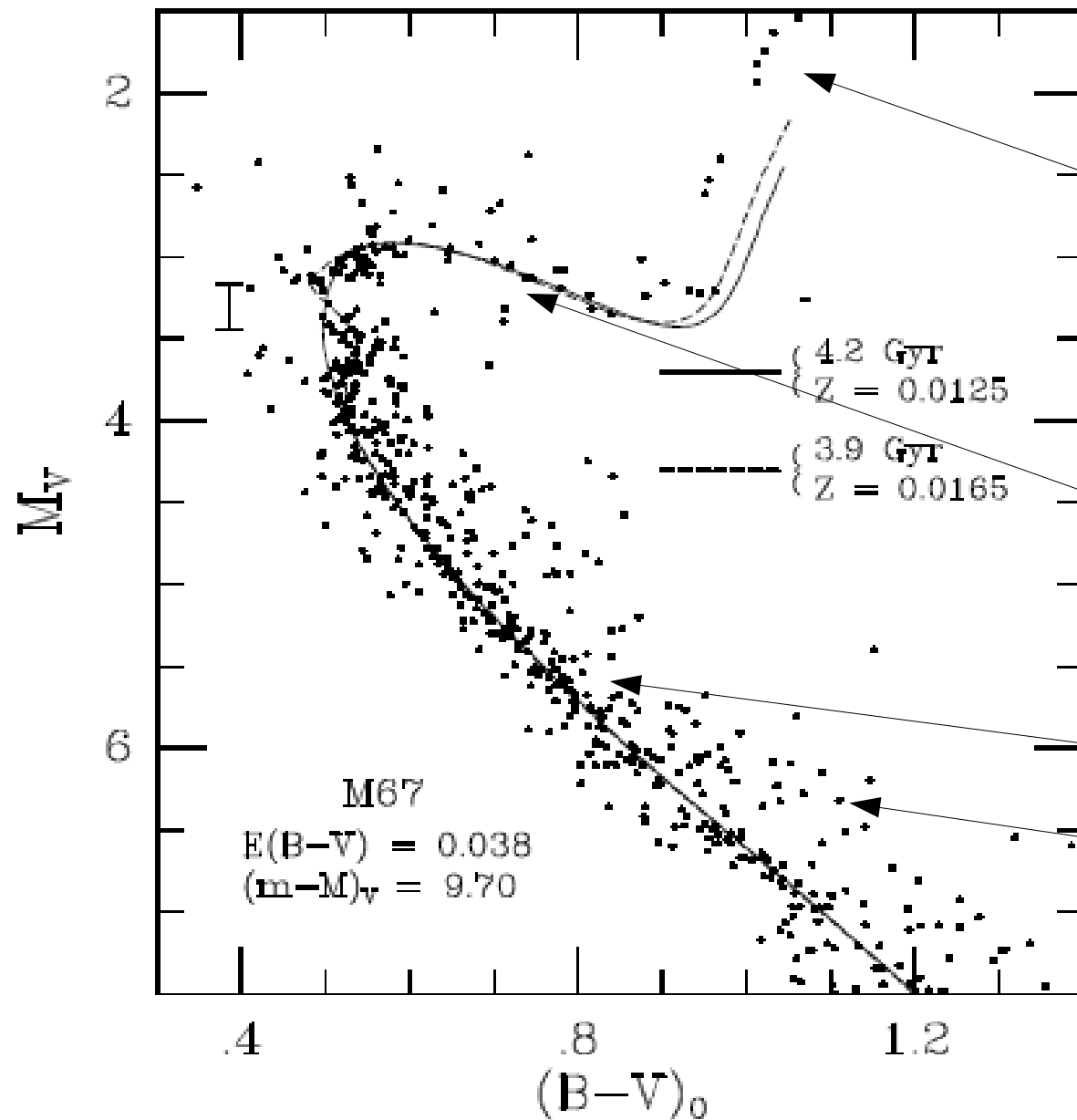


ningunas estrellas mas masivas que aprox. 2.2 masas solares

Otro cumulo abierto: M67



M67 – un cumulo abierto y viejo



ramo de
gigantes rojos

ramo de
subgigantes

S.P.

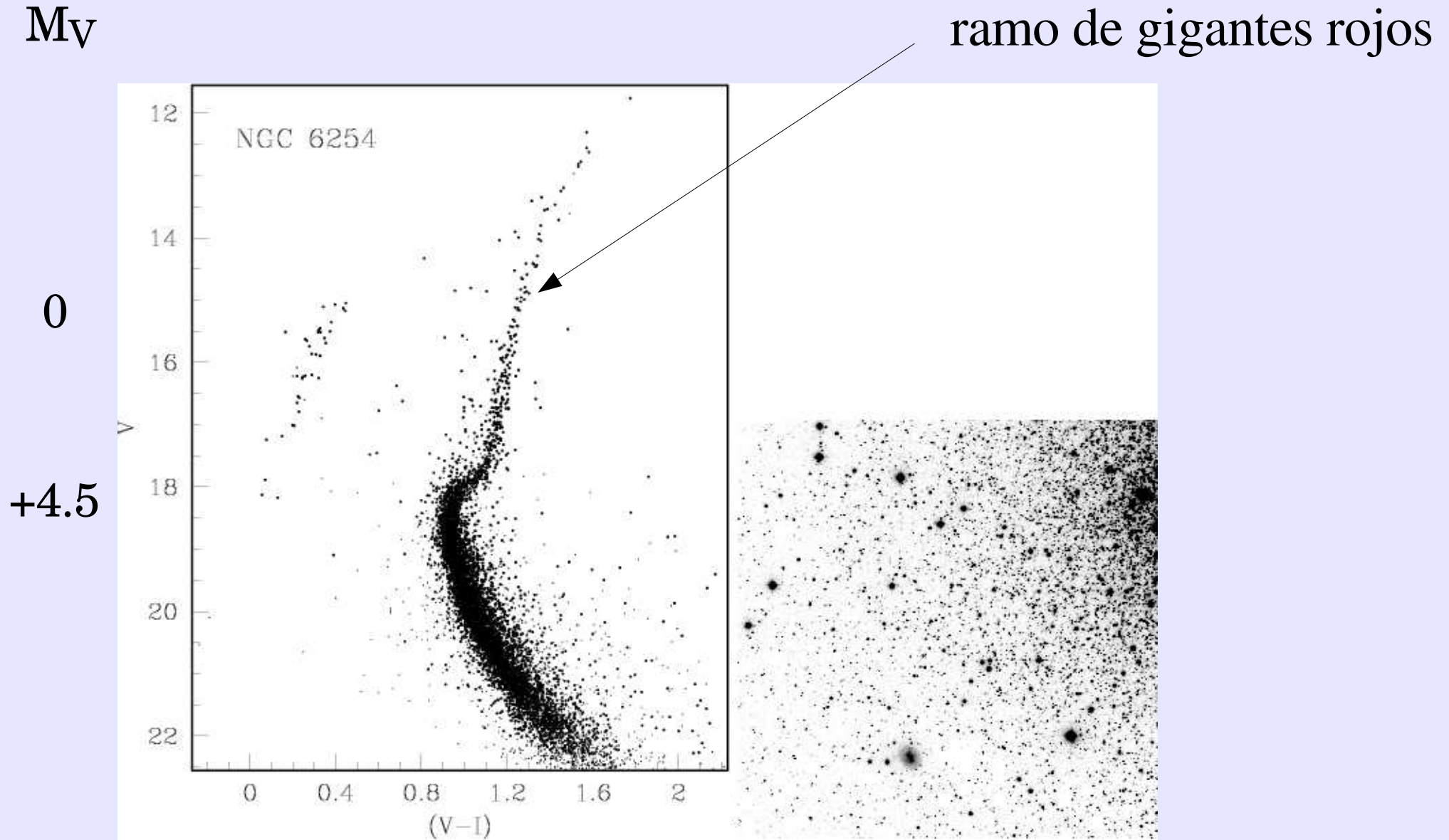
??

vandenBerg2007
ApJ 666, L105

Messier 10 - cumulo globular



diagrama magnitud-color de M10

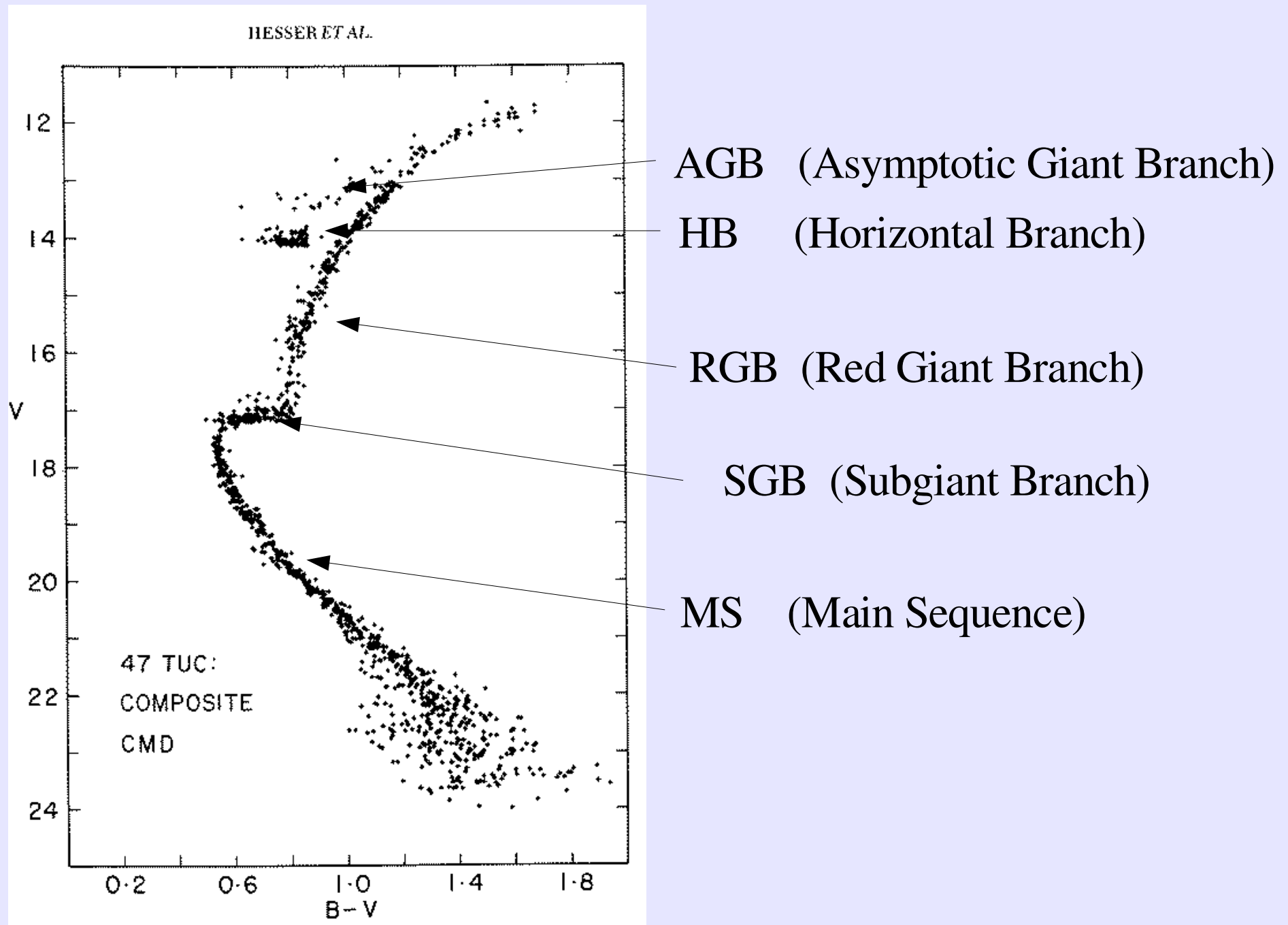


no estrellas mas masivas que 0.8 masas solares

47 Tucanae – cumulo globular



Cumulo globular galactico: 47 Tucanae $m-M = 13.3$ $[M/H] = -0.7$



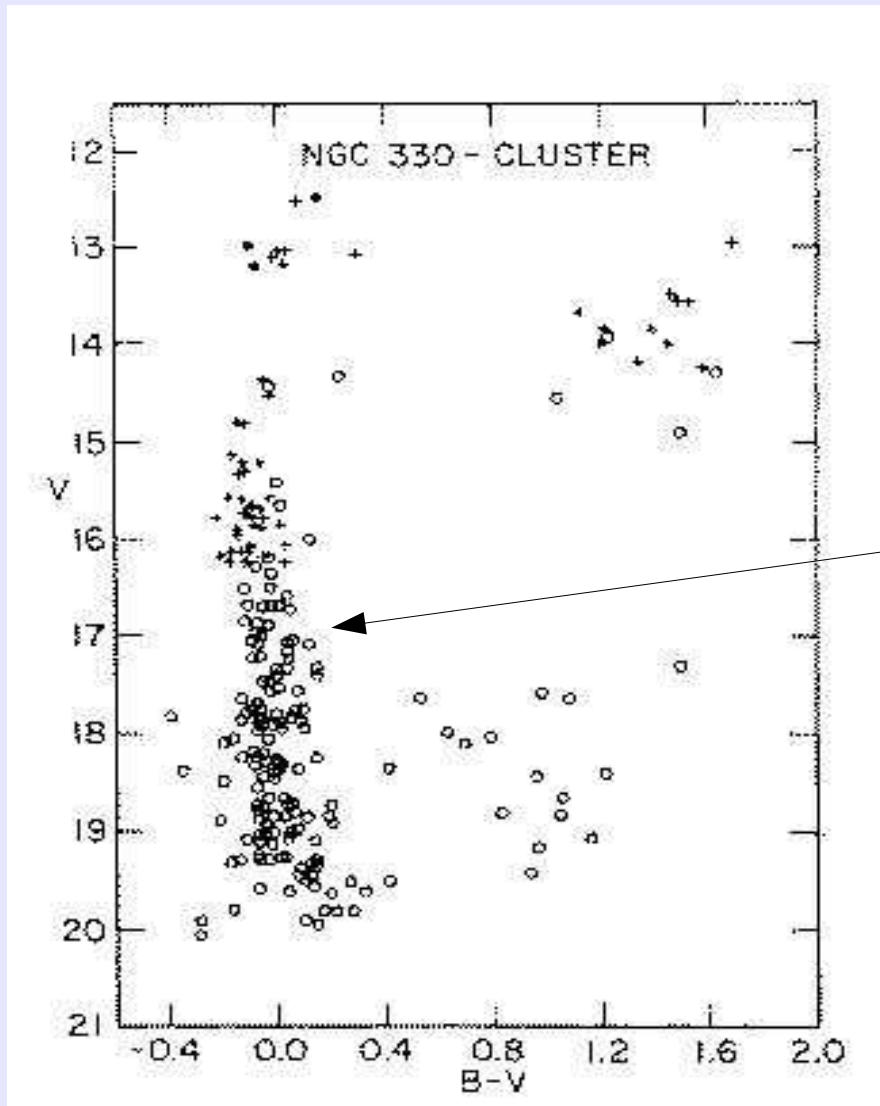
NGC 330

$m-M = 19.0$ (donde esta?)

M_V

-5

0



no estrellas mas masivas
que aprox. 20 masas solares

secuencia principal

no termina la S.P!



NGC 330



Diferencias en los diagramas HR de cúmulos : edades!!
metallicidades!

5.2 Evolución estelar después de secuencia principal de zero edad

evolución de una estrella de 1-2 masas solares

cadena pp y/o ciclo CNO disminuyen el número de protones
en la región central

--> más He

--> aumenta el peso molecular promedio

$$P_g = \frac{\rho k T}{\mu m_H} \quad \text{para un gas ideal}$$

presión tiende a declinar --> para mantener equilibrio de presión
 ρ tiene que aumentar (T no puede inicialmente)

--> núcleo contrae lentamente

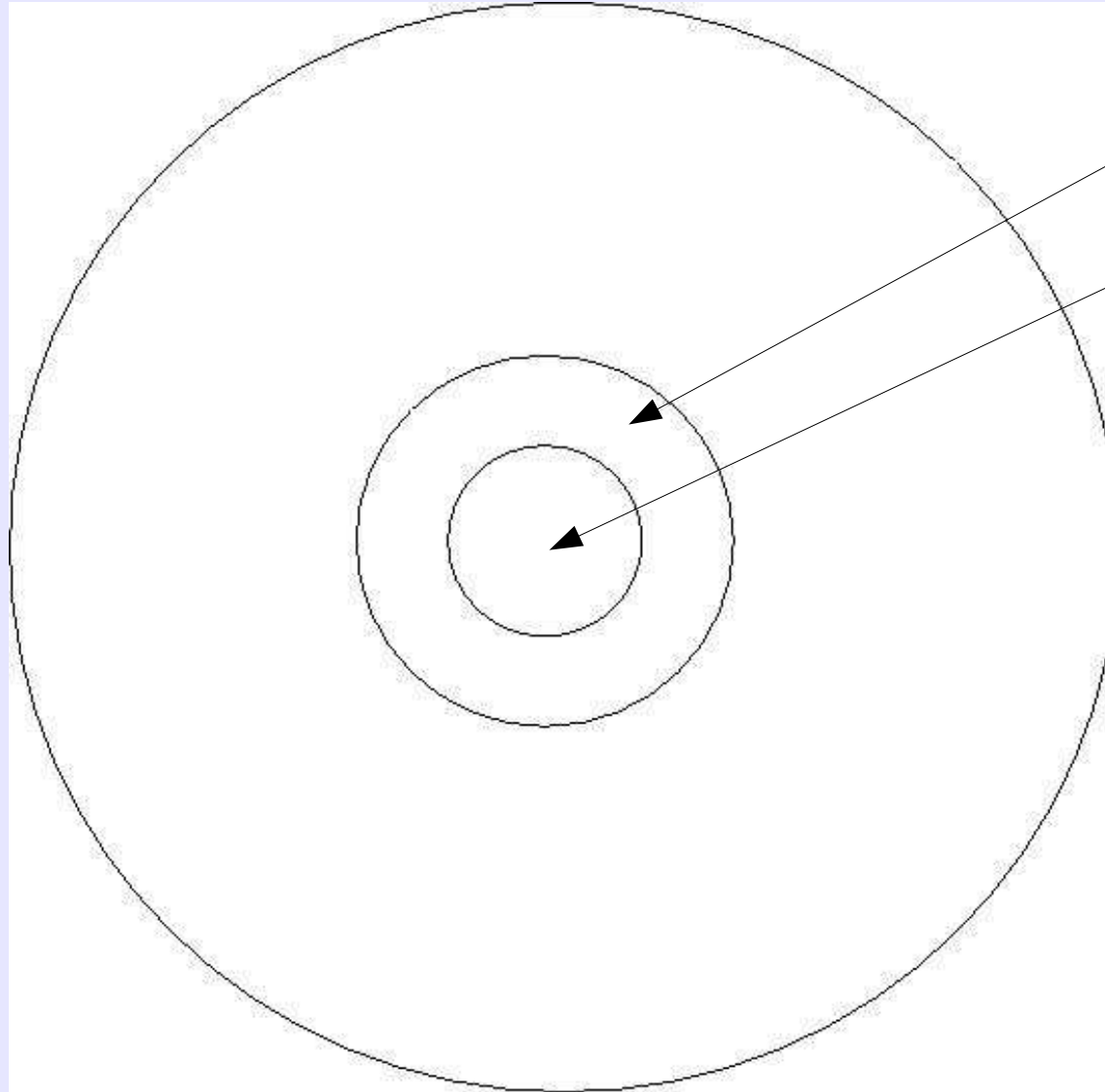
--> liberado de energía potencial

--> aumenta de temperatura efectiva y luminosidad

----> en el diagrama HR, estrella se mueve arriba y a la izquierda

----> establecimiento de una cascara

al final de secuencia principal:



H $\rightarrow$ He en cascara

He en nucleo – no se quema

nucleo no produce energia

$L = 0$

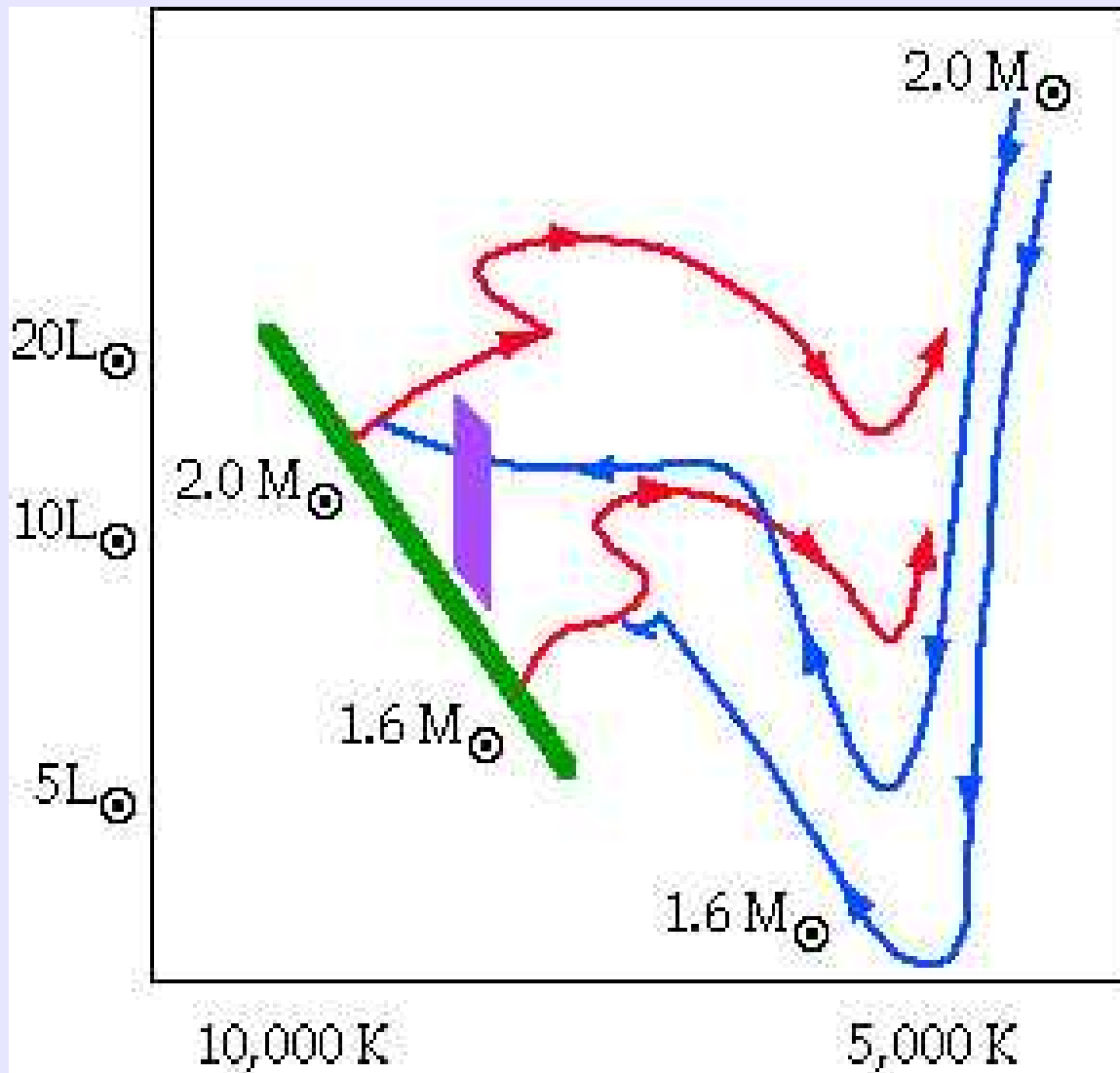
$\rightarrow dT/dr = 0$

"isotermico"

despues un rato, luminosidad en la cascara se vuelve mas grande que anteriormente en el nucleo

estrella reactiva con expansion de las cascara exteriores

parte de energia es usado por la expansion --> T_{eff} decline

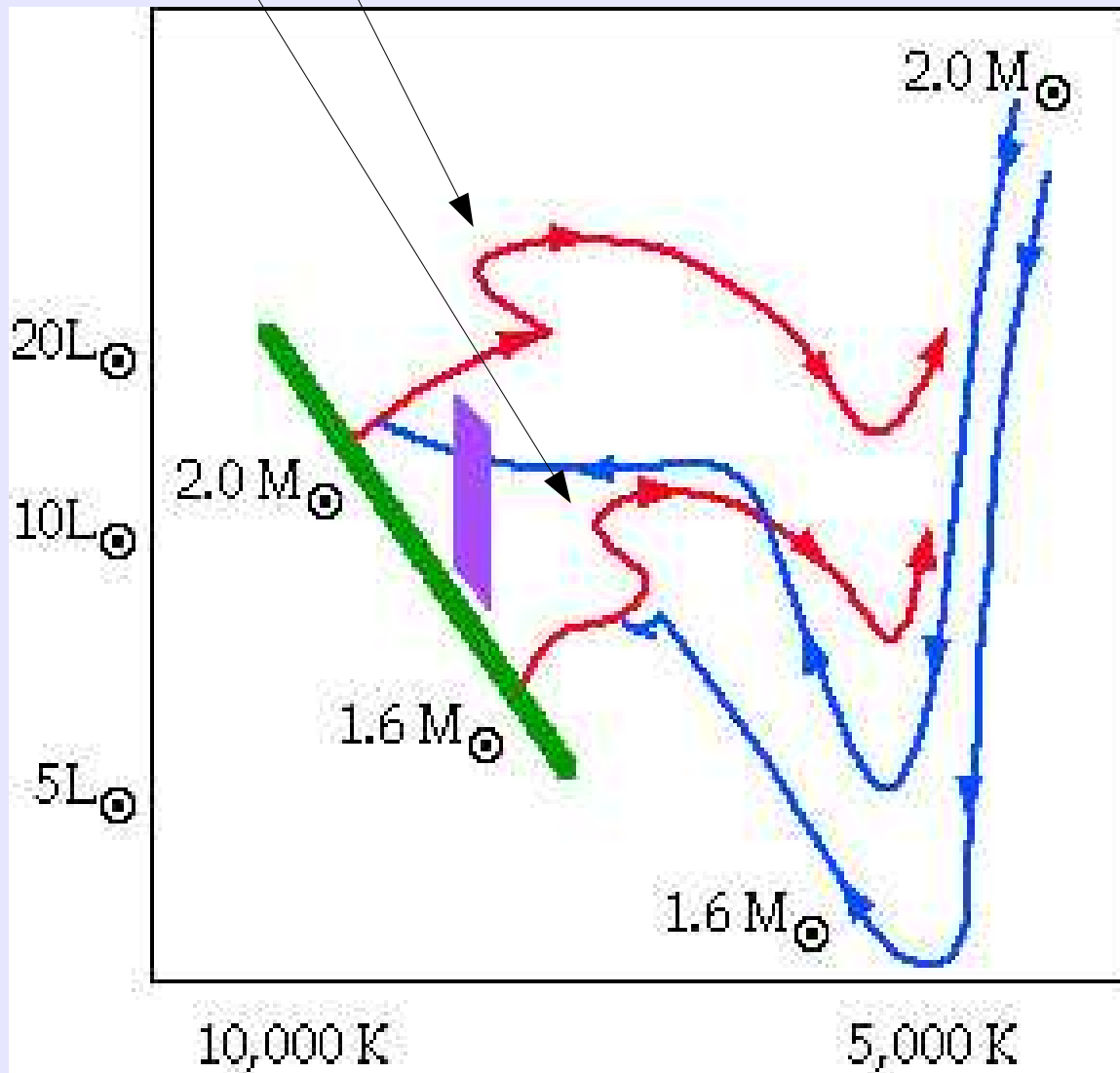


nucleo de He isotermico
aumenta --> hay limite de
"Schoenberg-Chandrasekhar":
 $0.08 \times \text{masa estelar}$

nucleo $> M_{\text{SC}}$:
nucleo pierde las propiedades
de un gas ideal y se vuelve
"degenerado"
(mas exacto: los electrones)

$$P_e \sim \rho^{5/3}$$

muy característico:
“gancho”



Que pasa durante la fase del gigante rojo?

(para estrellas de masas < 5 masas solares)

- nucleo consta de helio, pero no "quemando"
- capas exteriores continuan de expander, nucleo continua de contraer, densidad muy alta 10^8 kg/m^3 , temperatura 10^8 K

cuando temperatura $> 10^8 \text{ K}$

--> helio enciende "helium flash"

--->explosivamente

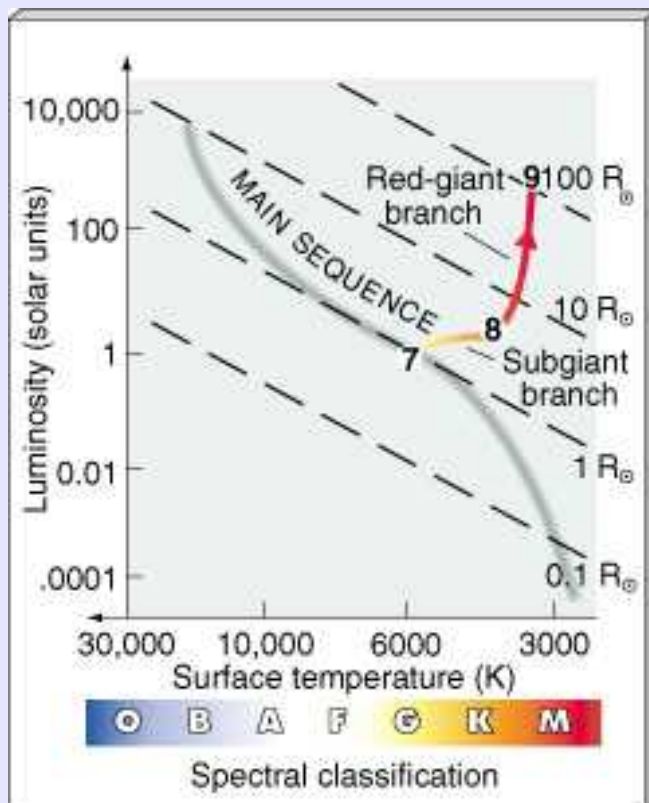
$$L \approx 10^{11} L_{\text{Sol}}$$

reaccion $\text{He} + \text{He} \rightarrow \text{Be}$

$\text{Be} + \text{He} \rightarrow \text{C} + \text{energia}$

proceso "triple-alpha"

(de donde viene berilio?)

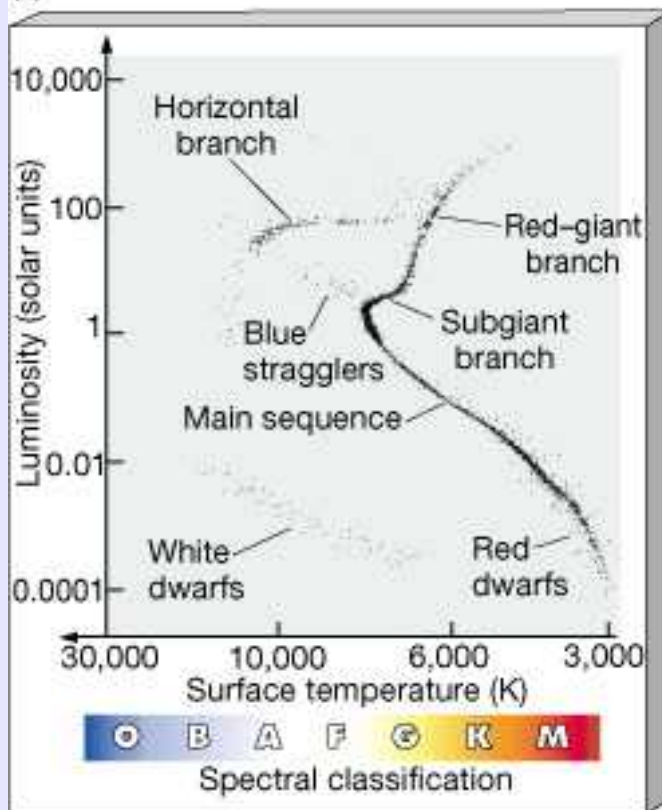




el diagrama HR del cumulo globular
Messier 80

estrellas tienen masas < 0.8 solar

(a)



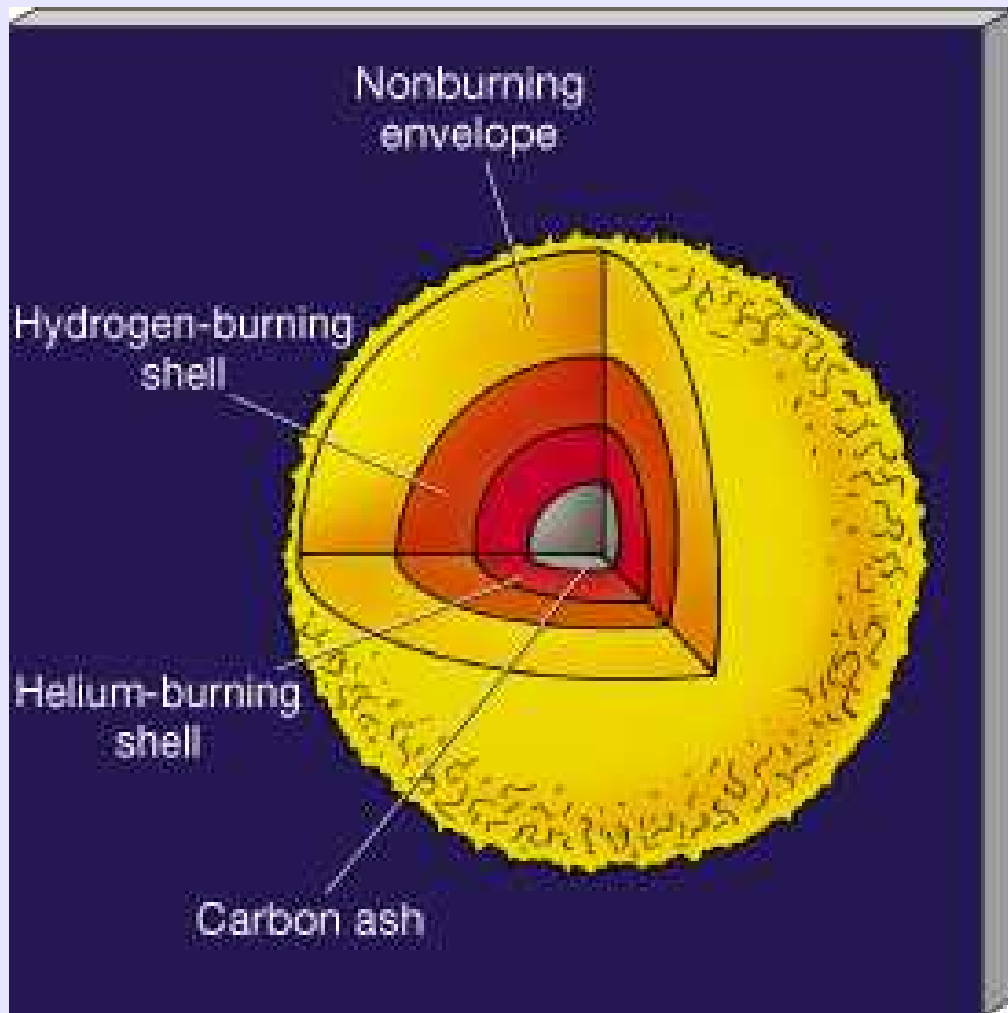
rama horizontal:

He esta quemando en el centro
H en una casacara

estado estable para estrellas en
cumulos globulares
duracion 10^6 anos

(b)

Despues de la rama horizontal: fusion nuclear en varias cascaras



ceniza de carbono

para quemar carbono
se necesita 600 millones K
no es posible alcanzarlo por
una estrella de 1 masa solar

nucleo consta de carbono

--- se vuelve mas denso pero la temperatura no aumenta mucho!

--- la presion es determinada por electrones libres de alta densidad ---> "gas degenerado"

---densidad tipica: 10^5 kg/cm^3

---por que carbono no encienda en estrellas con masas solares?

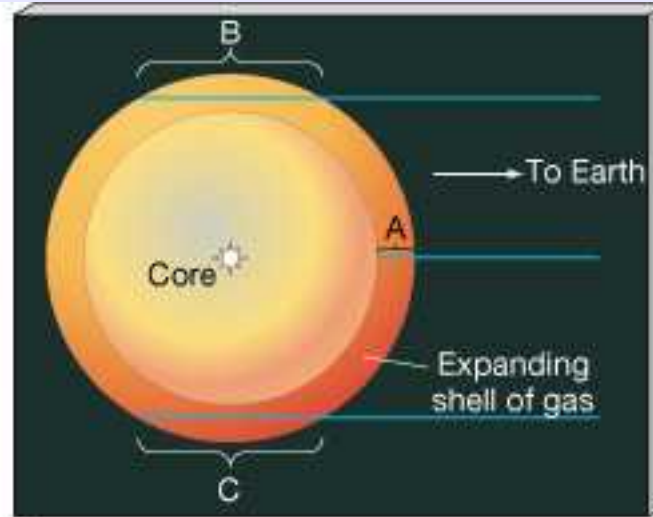
---> temperatura de un gas degenerado es independiente de su densidad!

---> despues: estrella empieza de oscilar (solo cascaras (exteriores) --> perdida de masa

Nebulosas planetarias: las capas exteriores se van,
nucleo se queda ---> una enana blanca



(a)



(b)



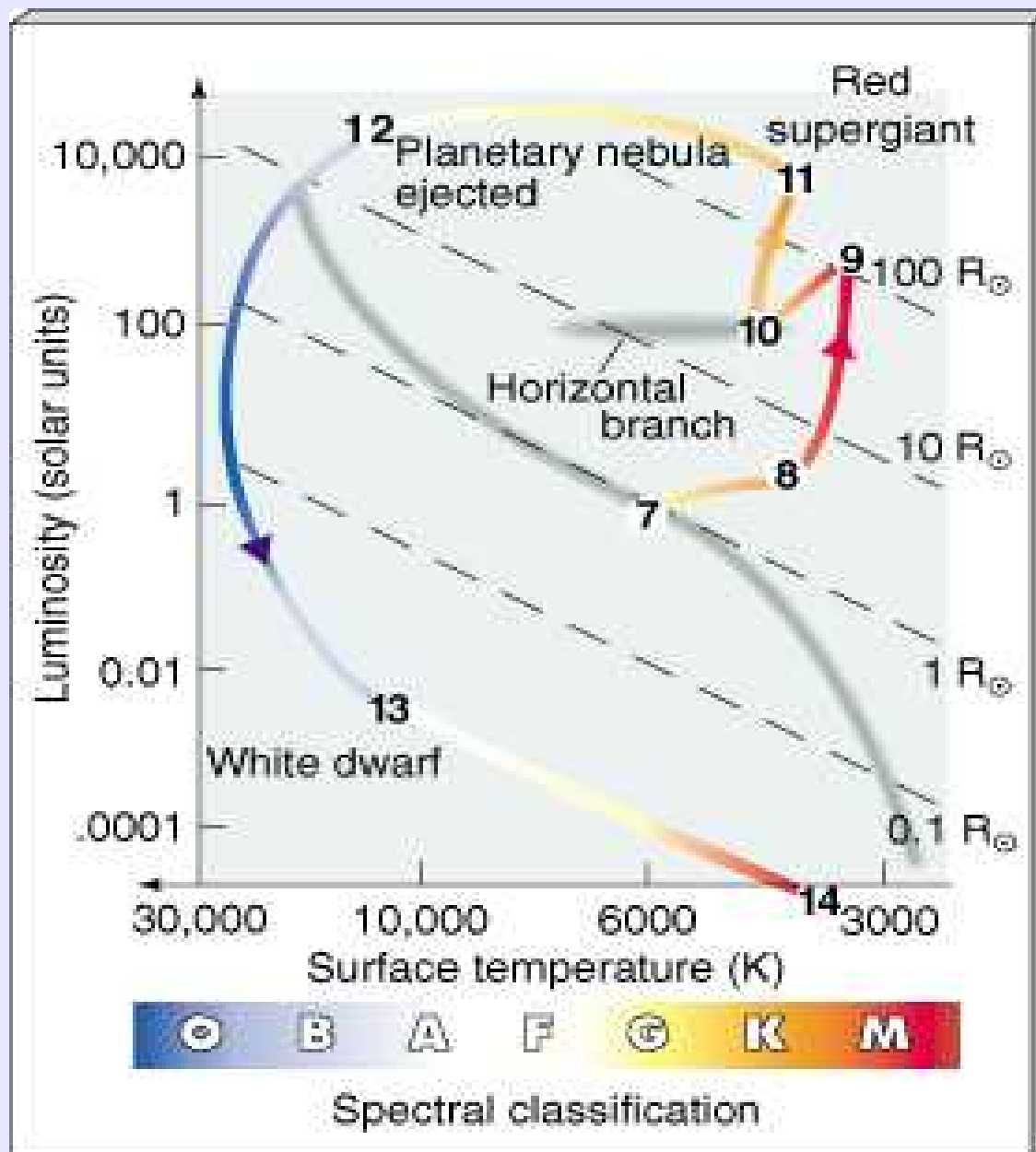
(c)



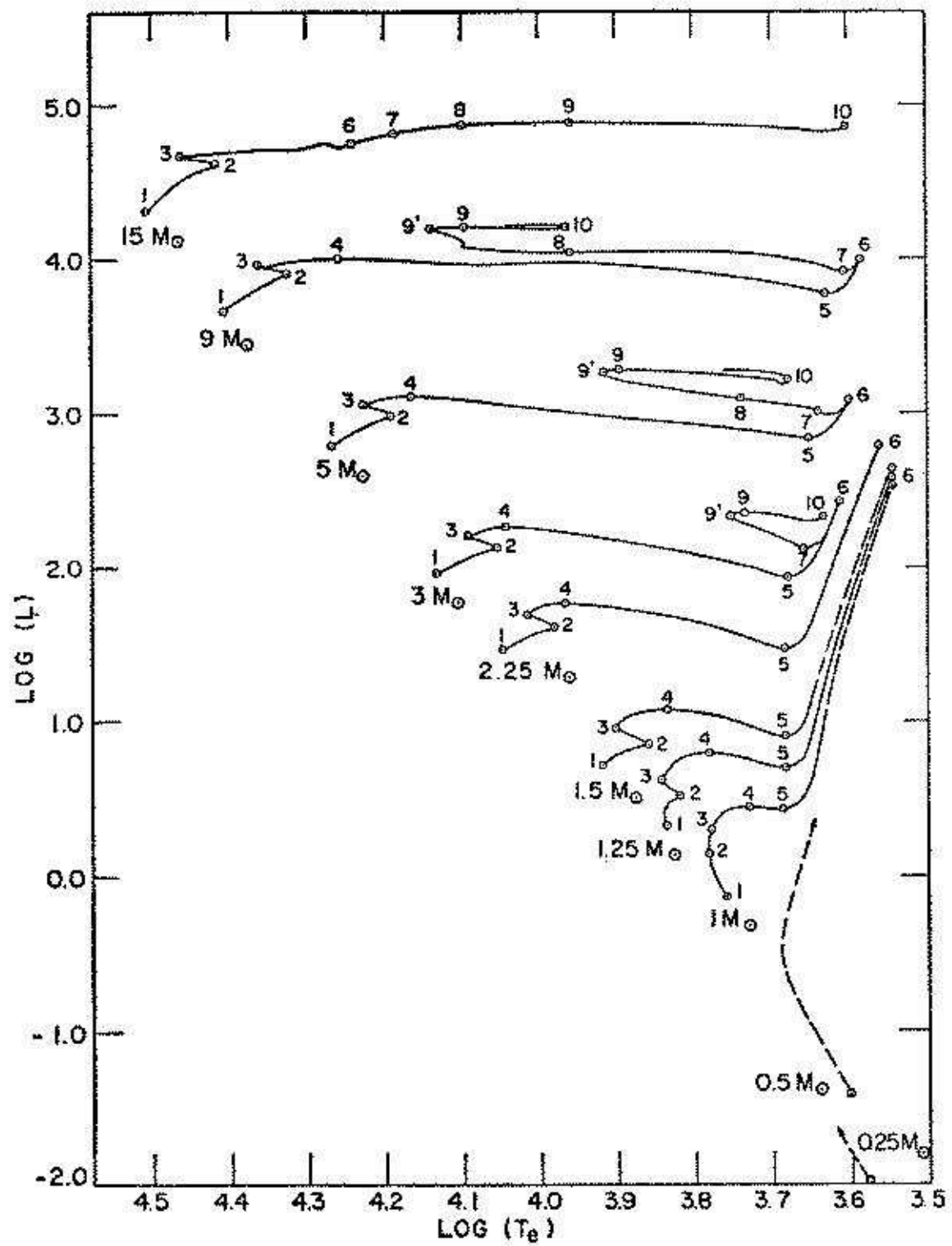
nebulosa planetaria en Aquila



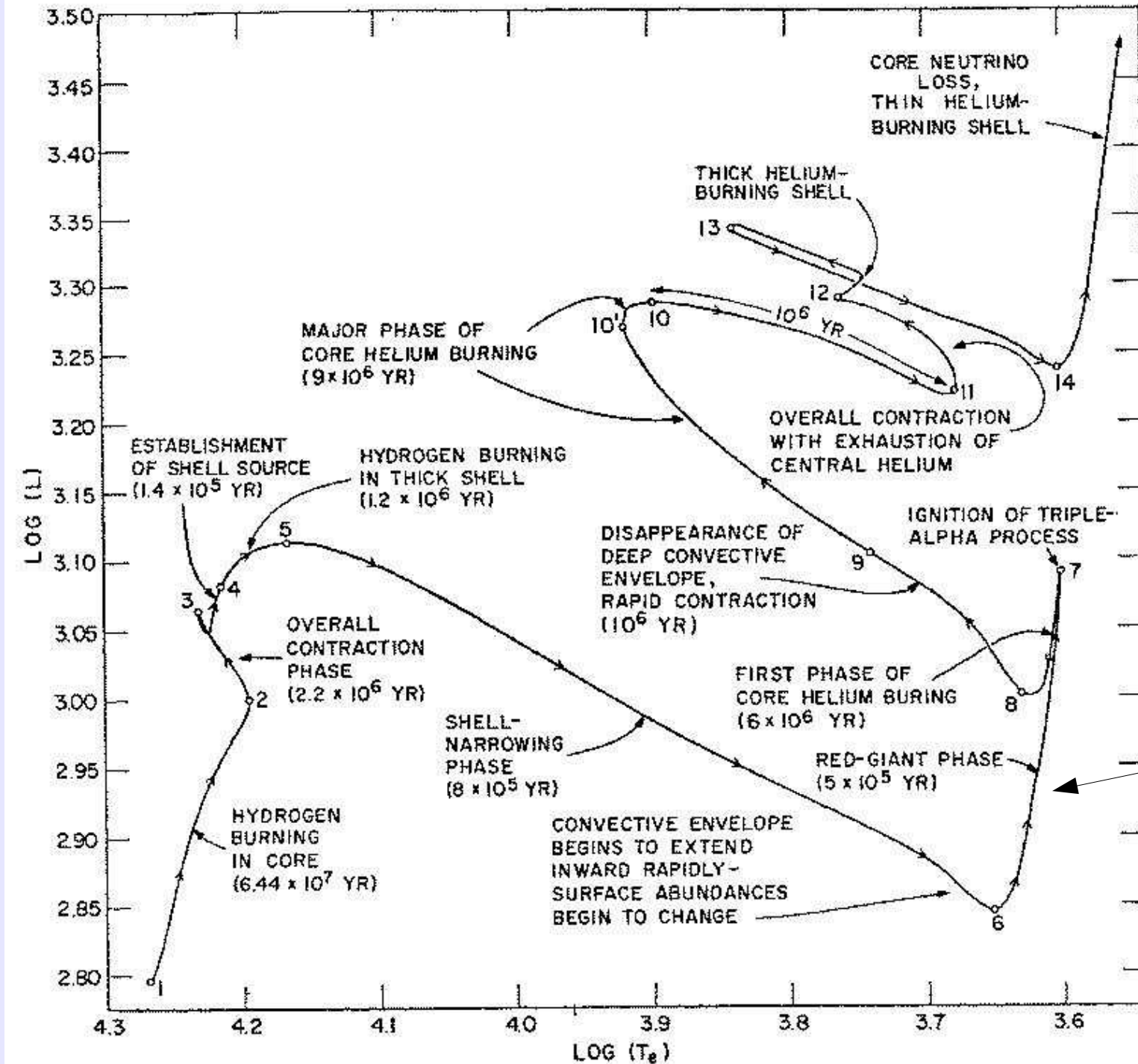
El camino hasta a una enana blanca



trayectorias para varias
masas



$5 M_{\odot}$

 trayectoria de
Hayashi


Resumen de las etapas mas importantes (estrellas menos masivas):

- 1) secuencia principal: $H \rightarrow He$ en nucleo
- 2) fase de "subgigante": He en nucleo isotermico ,
 $H \rightarrow He$ en cascara
- 3) inicio de fase de "gigante rojo": He en nucleo, $H \rightarrow He$ en cascara,
region convectiva se extiende hacia al centro
estrellas de poca masa: expansion rapida, estrella se mueve a
lo largo de trayectoria de Hayashi
- 4) fin de fase de "gigante rojo": nucleo degenerado, He enciende de
manera explosiva $\rightarrow$ perdida de masa

5) fase de "rama horizontal": He $\rightarrow$ O en nucleo, H $\rightarrow$ He en cascara

estrellas de poca masa se mueven a T_{eff} mas alta, pulsaciones !

6) fase de "ramo gigante asyptotico" (AGB): nucleo de CO, quemada de

H y He en cascara, He alternadamente quemanda y no quemanda ("He shell flashes")

8) para estrellas $< 7 M_{\odot}$:

pulsaciones en el AGB --> perdida de masa
("nebulosas planetarias") --> se queda solo el nucleo de CO
degenerado "enana blanca"

para estrellas $> 7 M_{\odot}$: CO-nucleo $> 1.4 M_{\odot}$
("limit de Chandrasekhar ")

--> colapso --> formacion de neutrones

--> degeneracion de los nucleones

---> equilibrio nuevo "estrella neutron"

"supernova de tipo II"

(clasificacion: hidrogeno en los espectros)

a veces para estrellas muy masivas: vientos estelares fuerte

--> perdida de capas exteriores ya durante la secuencia principal

---> ningun hidrogeno en los espectros

si nucleo $> 3 M_{\odot}$ nucleones degeneran relativisticamente

--> ningun equilibrio --> agujero negro





5.4 Isocronos y diagramas de color-magnitud

trayectoria evolucionaria: dada la masa estelar y "metalicidad" Z

--> trayectoria a traves el diagrama Hertzsprung-Russell

grupo de estrellas, inicialmente en la ZAMS, despues un rato --> **isocrono**

isocrono: conecion de puntos de edades iguales de muchas trayectorias

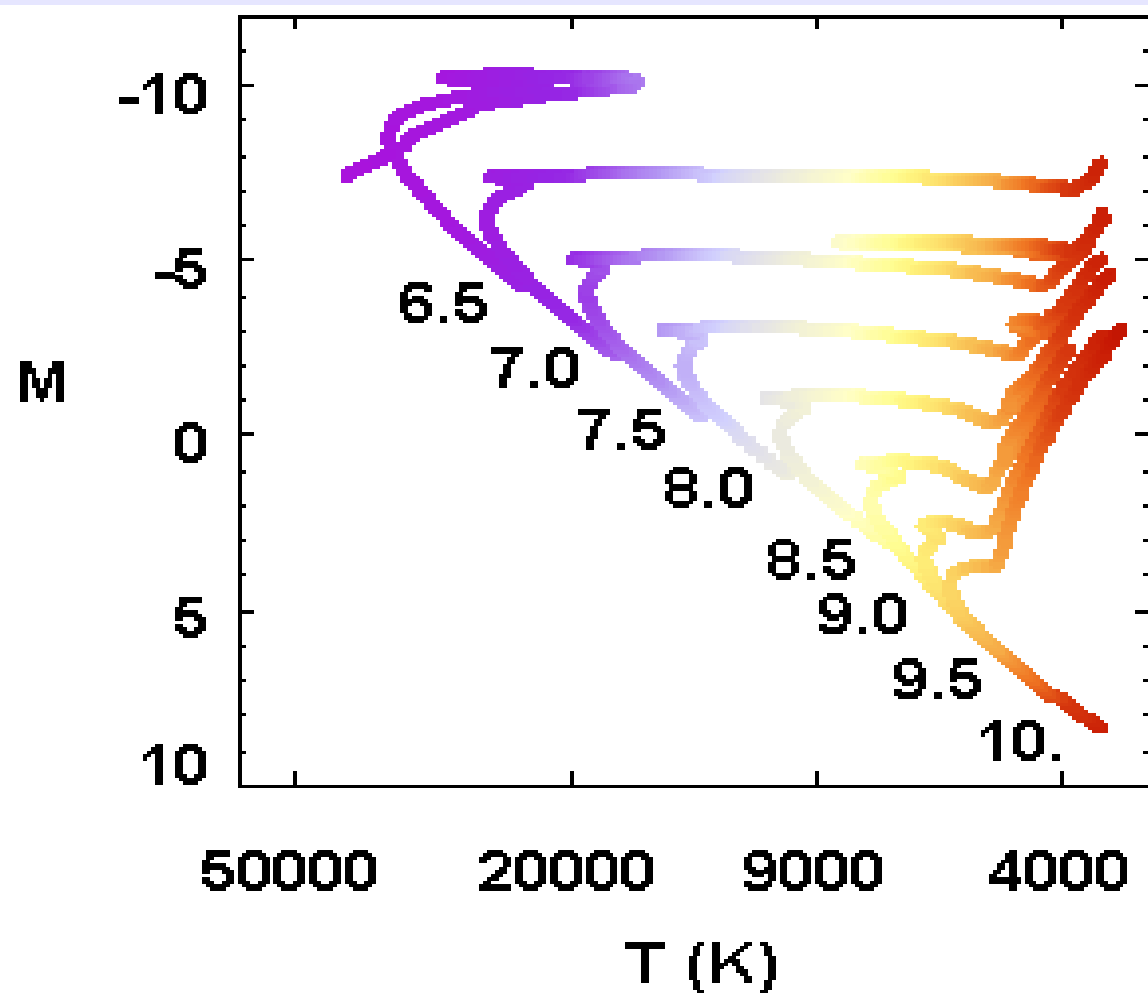
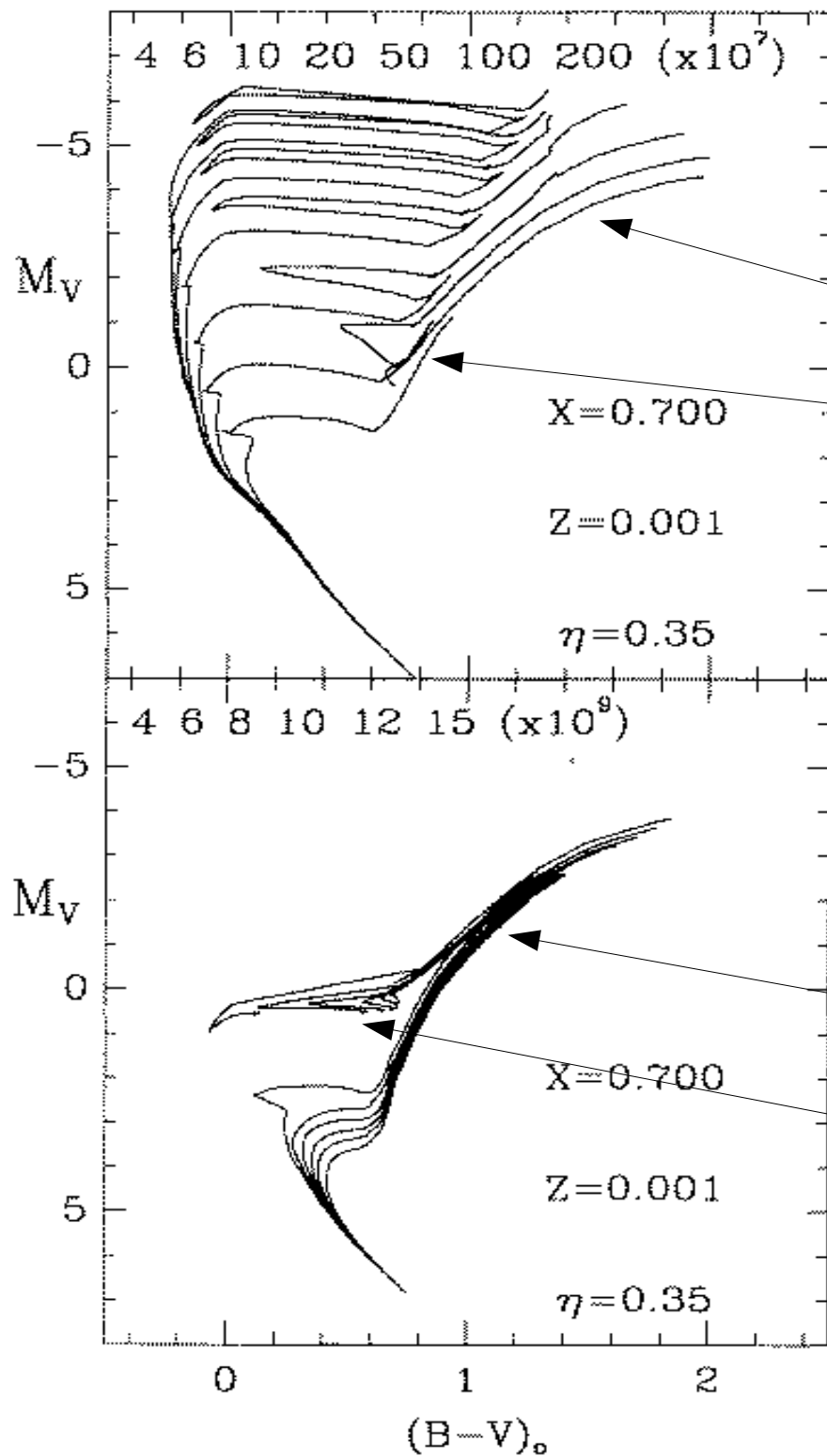


diagrama de magnitud-color
de un cumulo estelar
= isocrono

parametros: fraccion de He Y
metalicidad Z

especificante (depende de los
autores):
tratamiento de conveccion



isocronos para un rango de edades

joven

rama de gigantes asimptotica

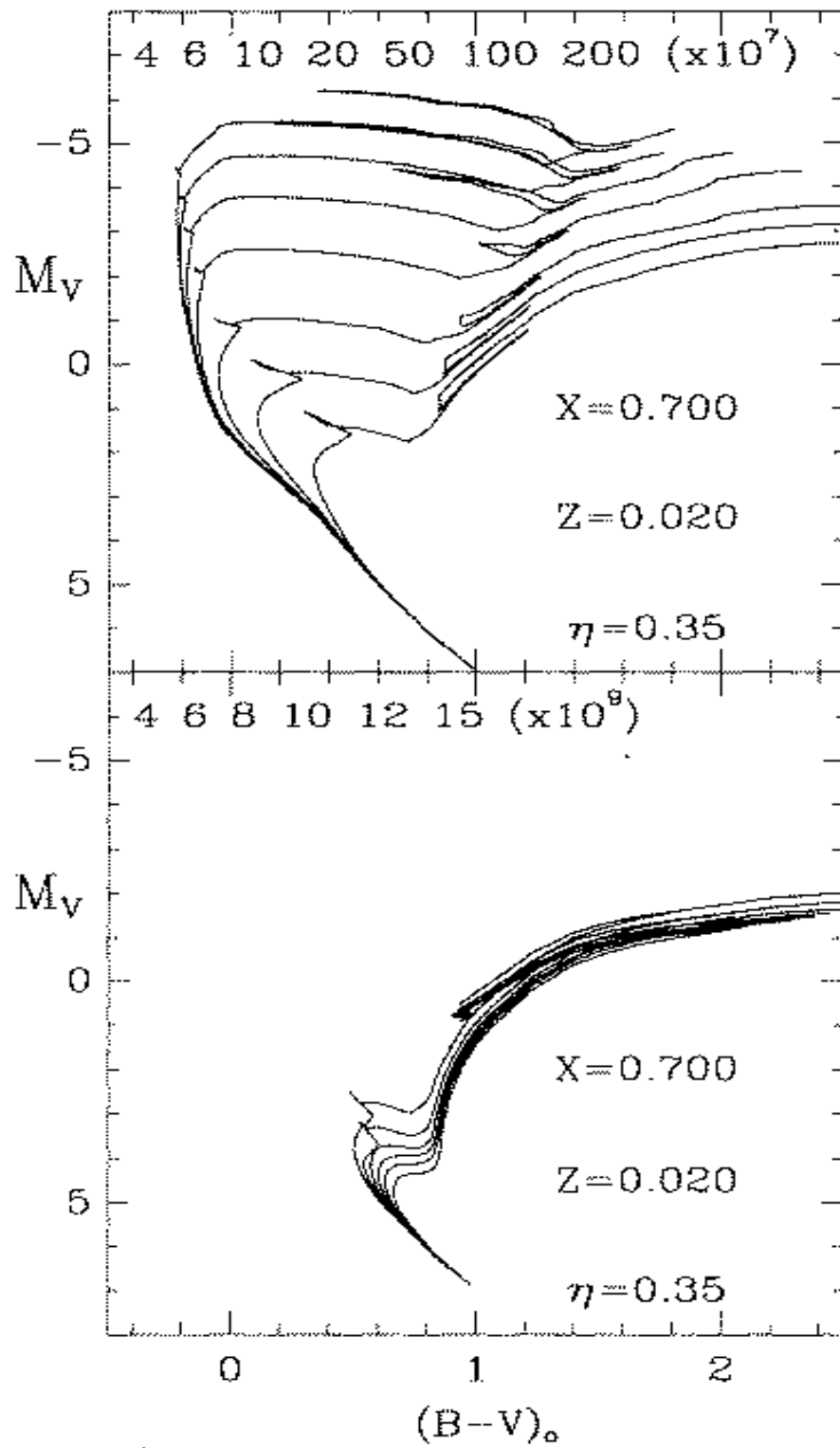
rama de gigantes rojos

metalicidad baja

viejo

rama de gigantes rojos

rama horizontal

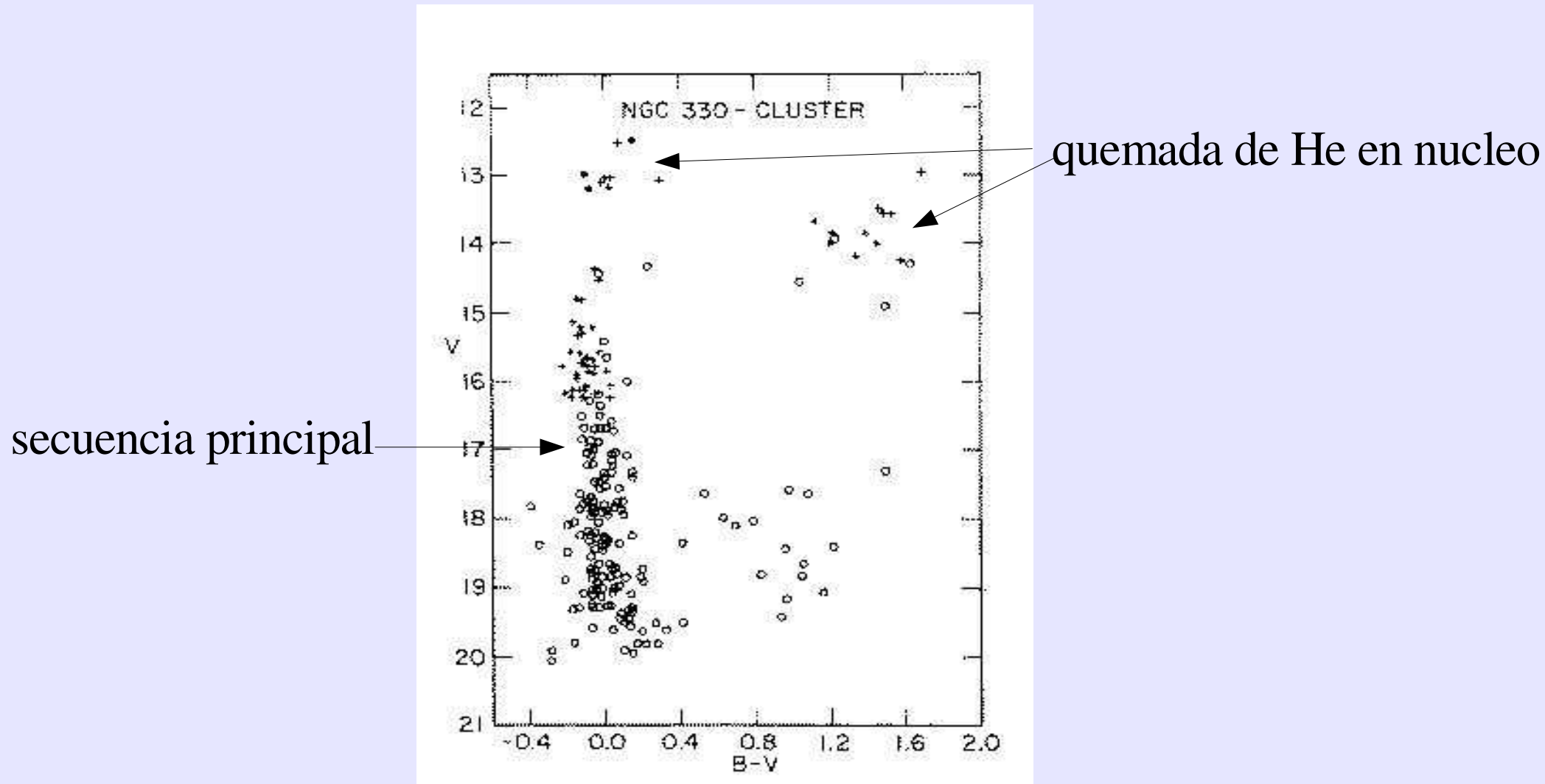


joven

metalicidad alta (solar)

viejo

NGC 330 – un cumulo globular joven en la nube de magellanes pequeño
 $m-M = 19.0$ edad 10^7 años



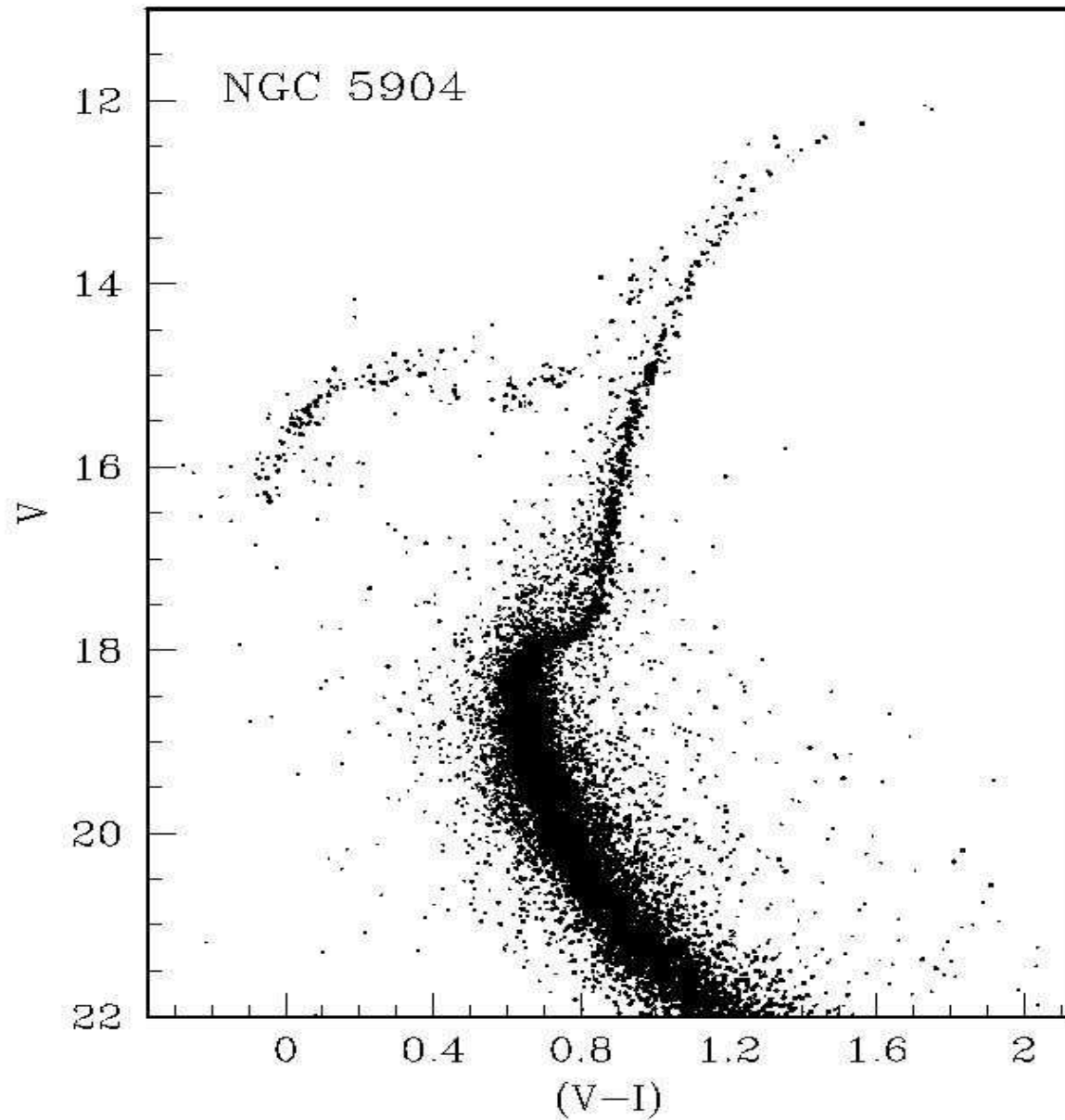
este tipo de cumulo no existe en la Via Lactea!

Cumulo globular galactico: Messier 5 $m-M=14.4$ $[M/H] = -1.4$

HB

AGB

$[M/H] = \log Z - \log Z(\text{solar})$



RGB

SGB

MS

masa de estrellas RGB: $0.8 M_{\odot}$

HB: $0.6 M_{\odot}$

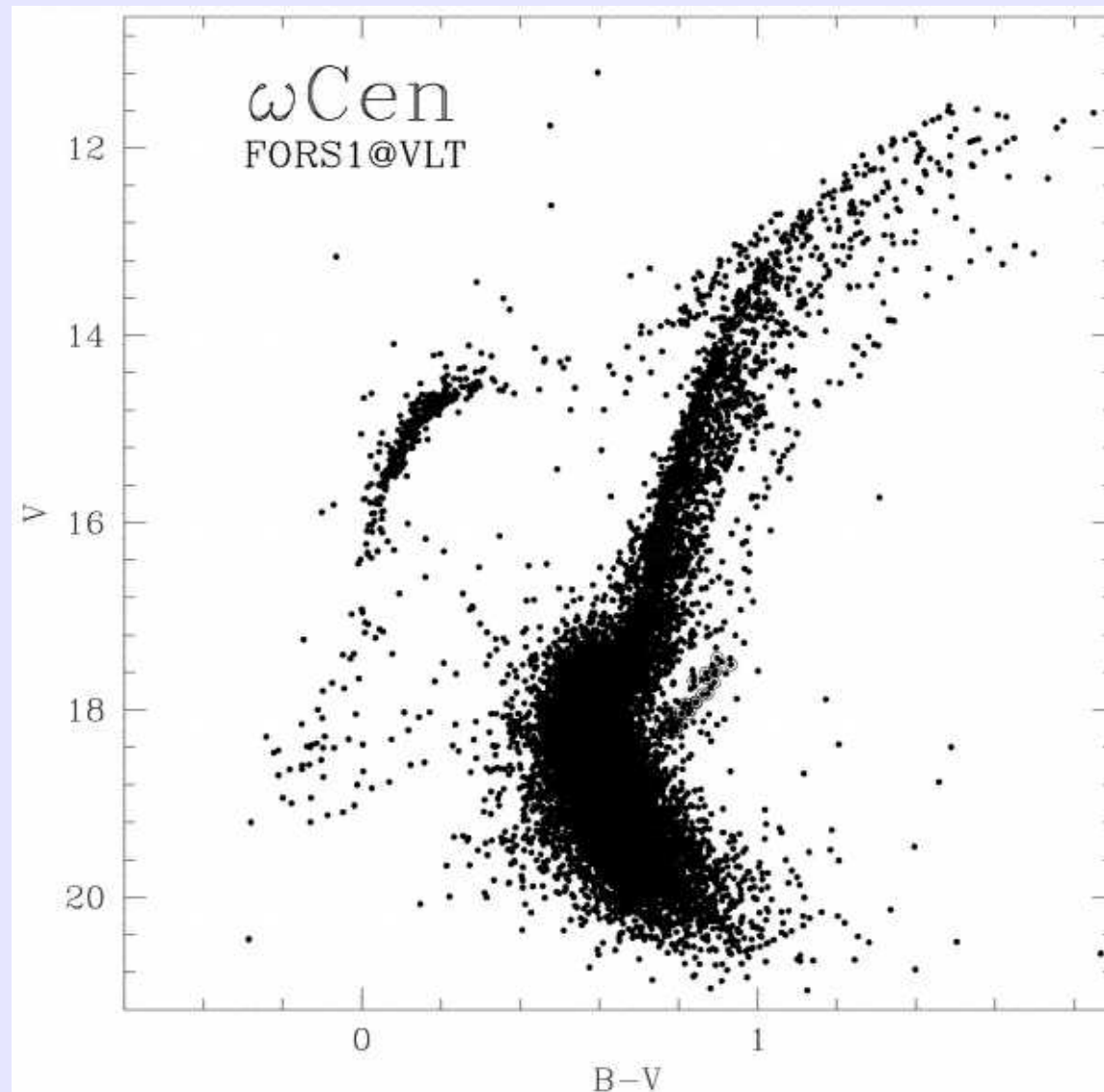
--> perdida de masa en el
encima de RGB

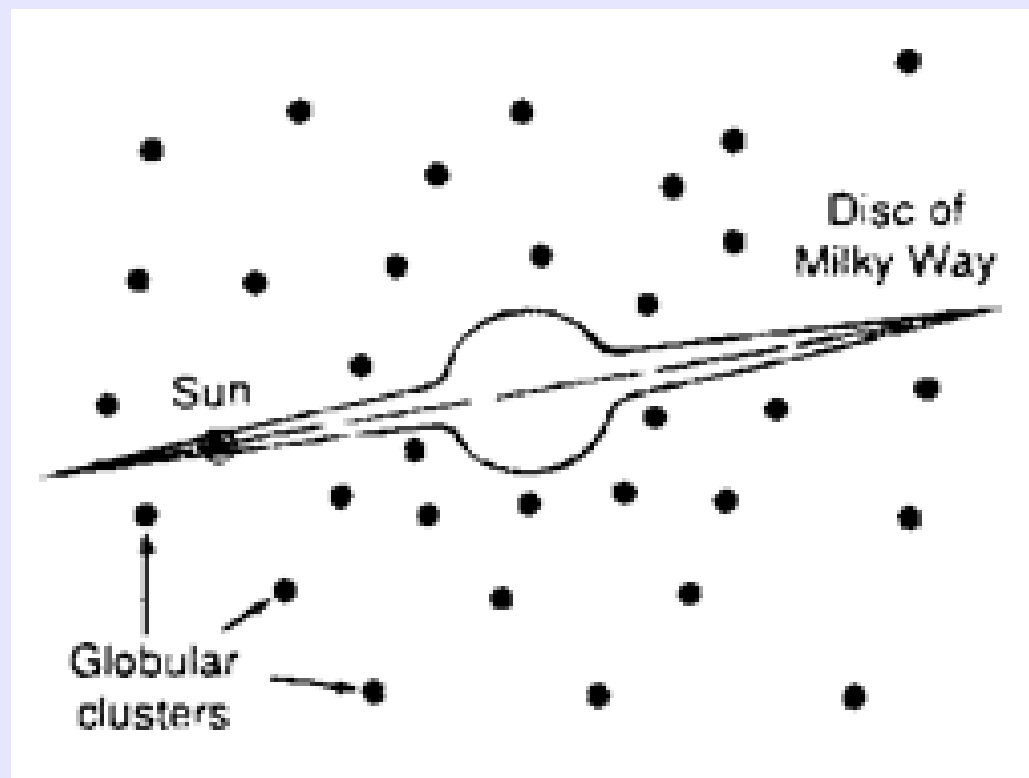
El cumulo globular mas masivo en la Via Lactea: Omega Centauri:

RGB muy ancho --> rango de metalicidades

---> varias episodios de formacion estelar

---> cumulo globular o nucleo de una galaxia enana?





Conclusiones principales de los diagramas magnitud-color de cumulos globulares:

- las poblaciones estelares mas viejas de la Via Lactea $12 \cdot 10^9$ años
- rango de metalicidad muy grande: $0 > [M/H] > -2.2$
- muy uniforme (excepcion: Omega Centauri)

5.5. La evolucion de estrellas masivas

secuencia principal: estrella de 70 masas solares --> duracion 2×10^6 años

temperatura: 40 000 K

luminosidad: 10^6 lum. solares

tipo espectral O5

ley de Wien $\lambda_{max} = \frac{0.29 \text{ cm K}}{T}$

--> $\lambda_{max} = 725 \text{ Å}$ Ultravioleto!

---> capaz de ionizar hidrogeno en su alrededor --> regiones HII

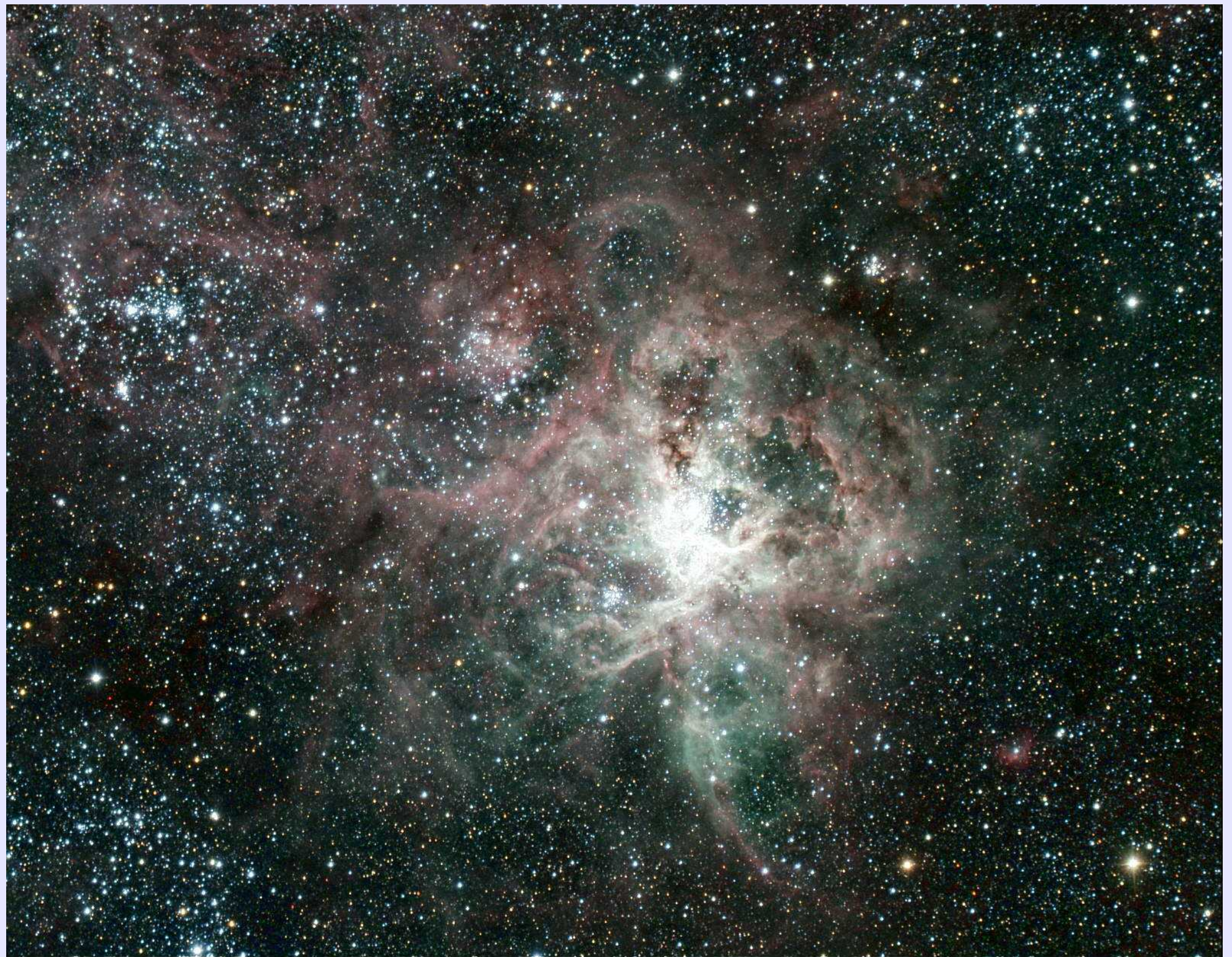
---> fotones dan su momento a iones, por ejemplo OII, OIII, NIII etc.

---> perdida de masa ya en la secuencia principal ("vientos estelares")

taza: hasta 10^{-5} masas solares/años velocidad 5000 km/s

importante para el estado energetico de material interestelar en una galaxia

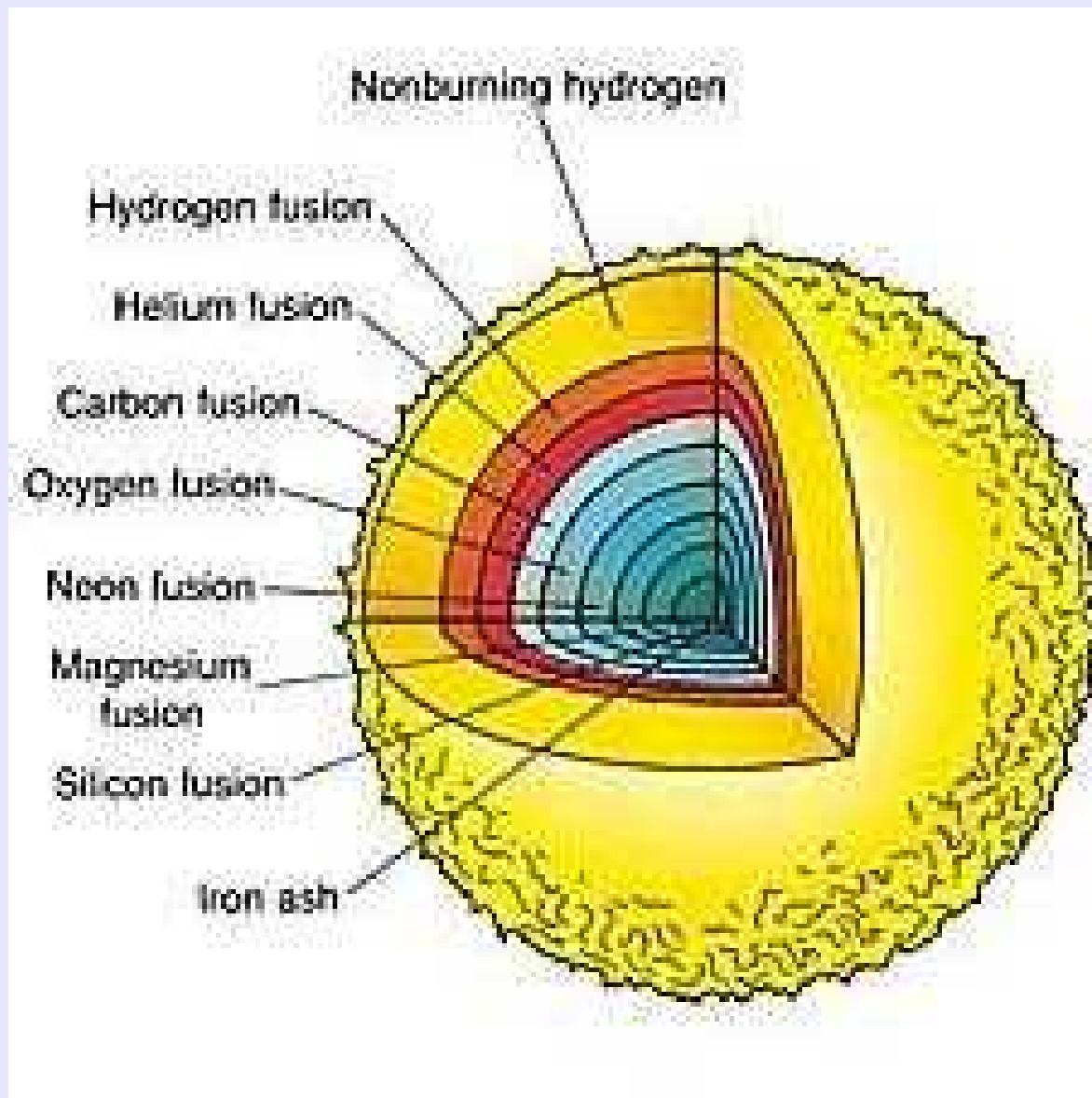






estrellas masivas en su estados avanzadas: estructura de "cebolla"

en el centro: hierro como "brasa"



--> estrellas de "Wolf-Rayet" extremadamente raras
asociadas con nebulosas
lineas de emision fuerte de N o C



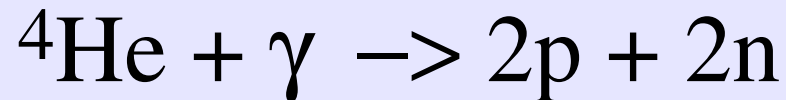
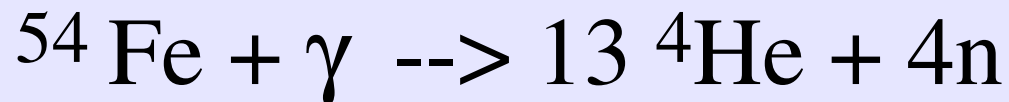
quemada de silicón

--> muchos núcleos alrededor de hierro: ^{54}Fe , ^{56}Fe , ^{56}Ni

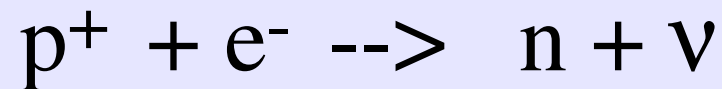
temperatura alcanza 10^{10} K, densidad 10^{10} g/cm³

--> fotones pueden desintegrar núcleos

= fotodesintegración



--> un montón de protones libres --> proceso β inverso



--> electrones desaparecen (responsables para la presión)
+ neutrinos se salen

--> núcleo pierde apoyo --> colapso!

en este momento: luminosidad óptica (invisible) del núcleo:
 10^{38} erg/s

"luminosidad" de los neutrinos
 10^{45} erg/s !!!

"free fall time" (tiempo de caída libre):

$$t_{ff} = \sqrt{\frac{3\pi}{32} \frac{1}{G \rho_0}} \quad \text{siendo } \rho_0 \text{ la densidad inicial}$$

para el núcleo: $t_{ff} \cong 1 \text{ sec}$

--> colapso se vuelve más rápido que la velocidad del sonido

--> cáscaras exteriores no se notan colapso de núcleo

núcleo consta de neutrones = fermiones

--> degeneración --> presión de Fermi

núcleo se comporta como muelle: antes de alcanzar equilibrio la densidad es más grande que en equilibrio --> oscilación

--> onda de choque a traves la estrella

--> compresion de material

--> choque se parra, pero densidad tan grande que alcanza
profundidad optica para neutrinos $>$ cero

---> 5 % de las neutrinos son absorbidos

--> expulsion de las cascaras exteriores

eso es lo que paso en el año 1054 el constelacion Tauro

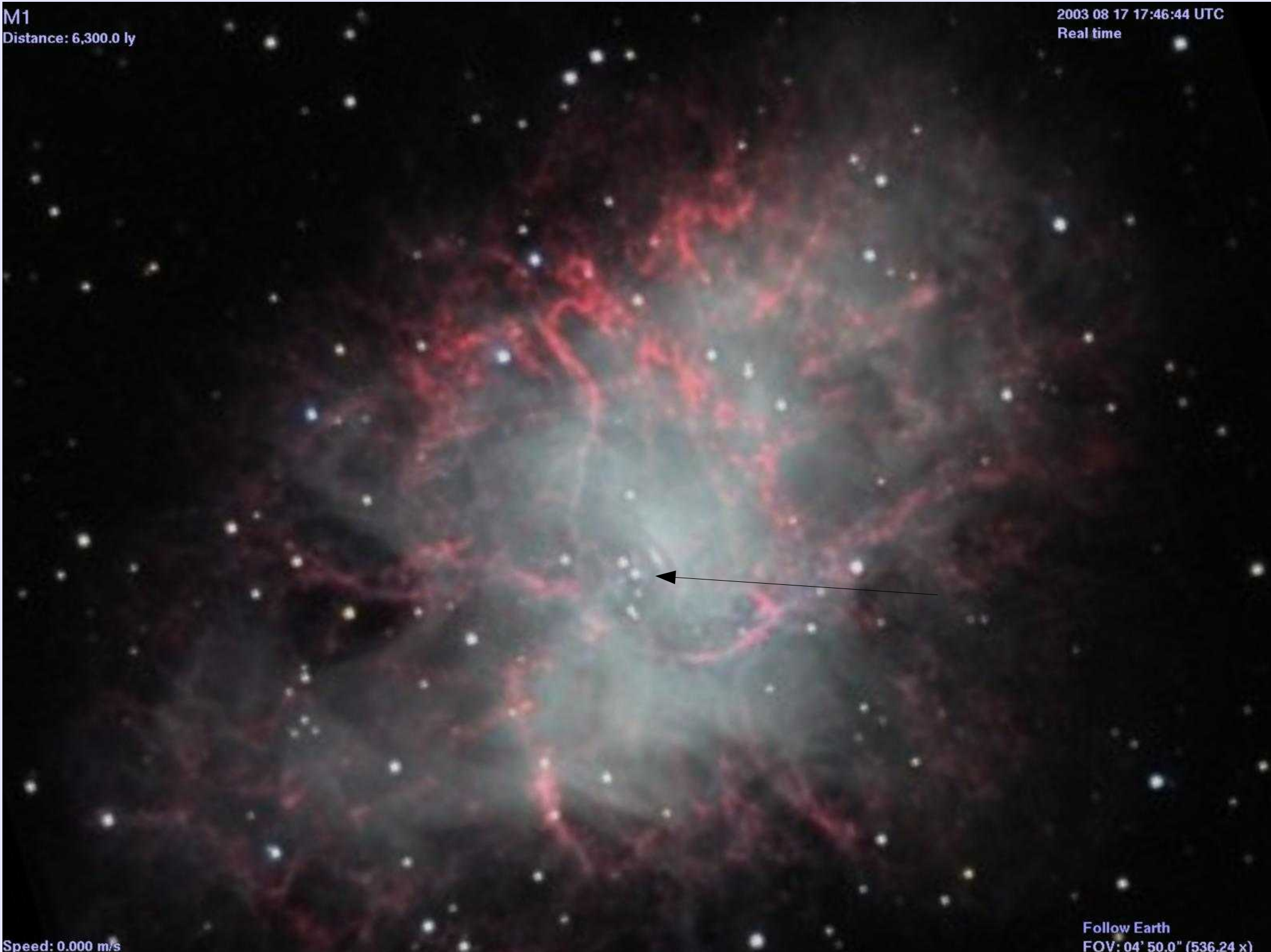
una supernova de tipo II

M1

Distance: 6,300.0 ly

2003 08 17 17:46:44 UTC

Real time



Speed: 0.000 m/s

Follow Earth

FOV: 04' 50.0" (536.24 x)

equilibrio alcanzado por degeneracion de neutrones = **estrella neutron**

$R \cong 10 \text{ km}$ densidad 10^{14} g/cm^3

periodo de rotacion: $< 1 \text{ sec}$

campo magnetico de la estrella esta comprimido durante el colapso

--> estrellas neutrones tienen campos magneticos muy fuertes

campo magnetico fuerte en rotacion --> induce campos electricos variandos

--> emite ondas electromagneticas

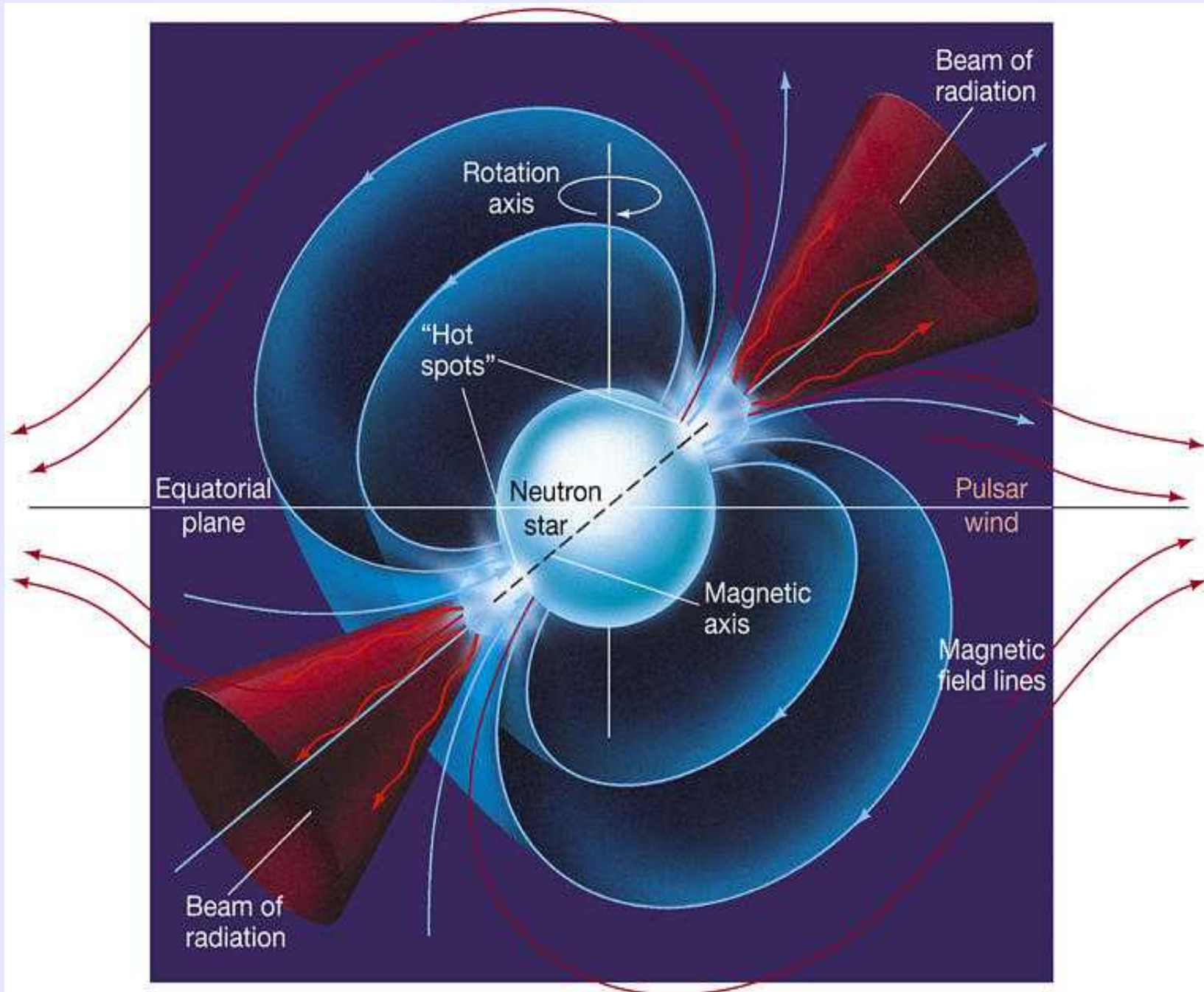
(radiacion de un dipolo magnetico)

radiacion no isotropica, pero restringido a un angulo solido estrecho

para observador en la linea de vista : pulsos!

"Pulsares"

Modelo de un Pulsar



cuando la masa del nucleo $> 3 M_{\odot}$ nucleones degeneran de manera relativista

---> ningun radio de equilibrio --> colapso continua

--> agujero negro



sistemas binarias de rayos X

disco de accrecion + objeto compacto