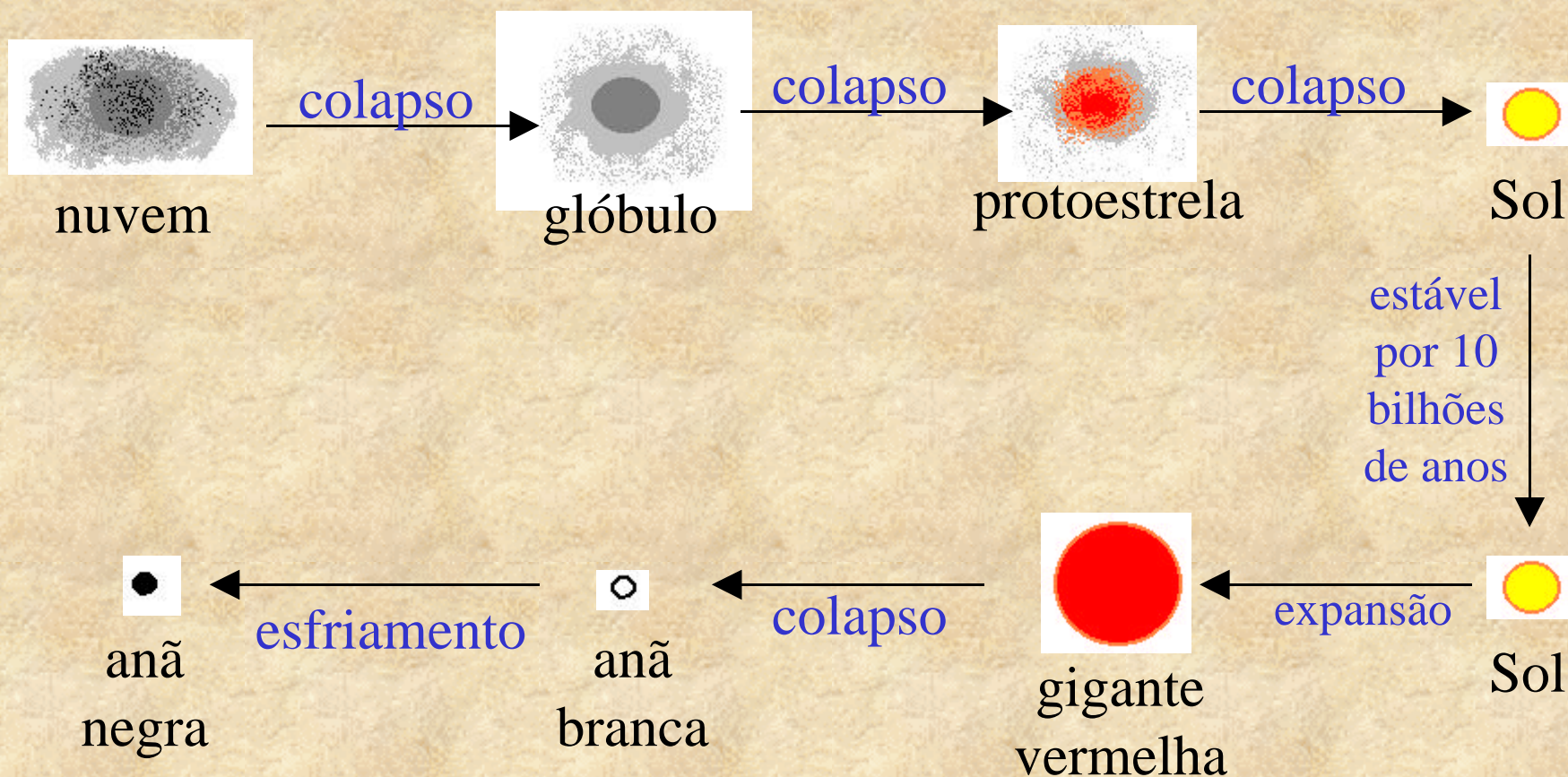


Evolução Estelar

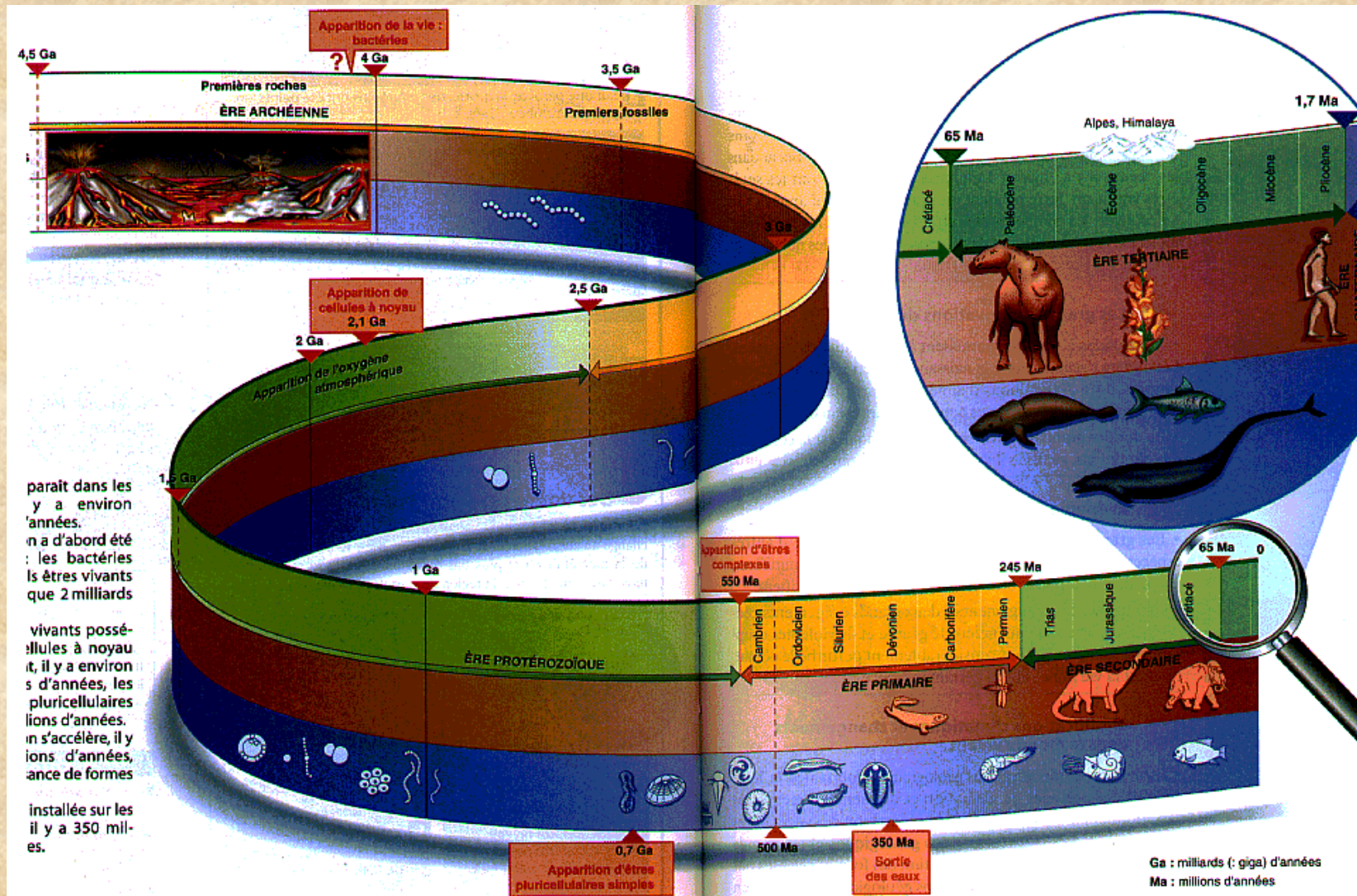
Profa. Jane Gregorio-Hetem
IAG/USP

Ciclo de vida do Sol



Calendário Bio-geológico

(comparação das escalas de tempo)



paraît dans les
y a environ
années.
n a d'abord été
: les bactéries
ls êtres vivants
que 2 milliards

vivants possé-
llules à noyau
it, il y a environ
s d'années, les
pluricellulaires
lions d'années.
n s'accélère, il y
ions d'années,
ance de formes

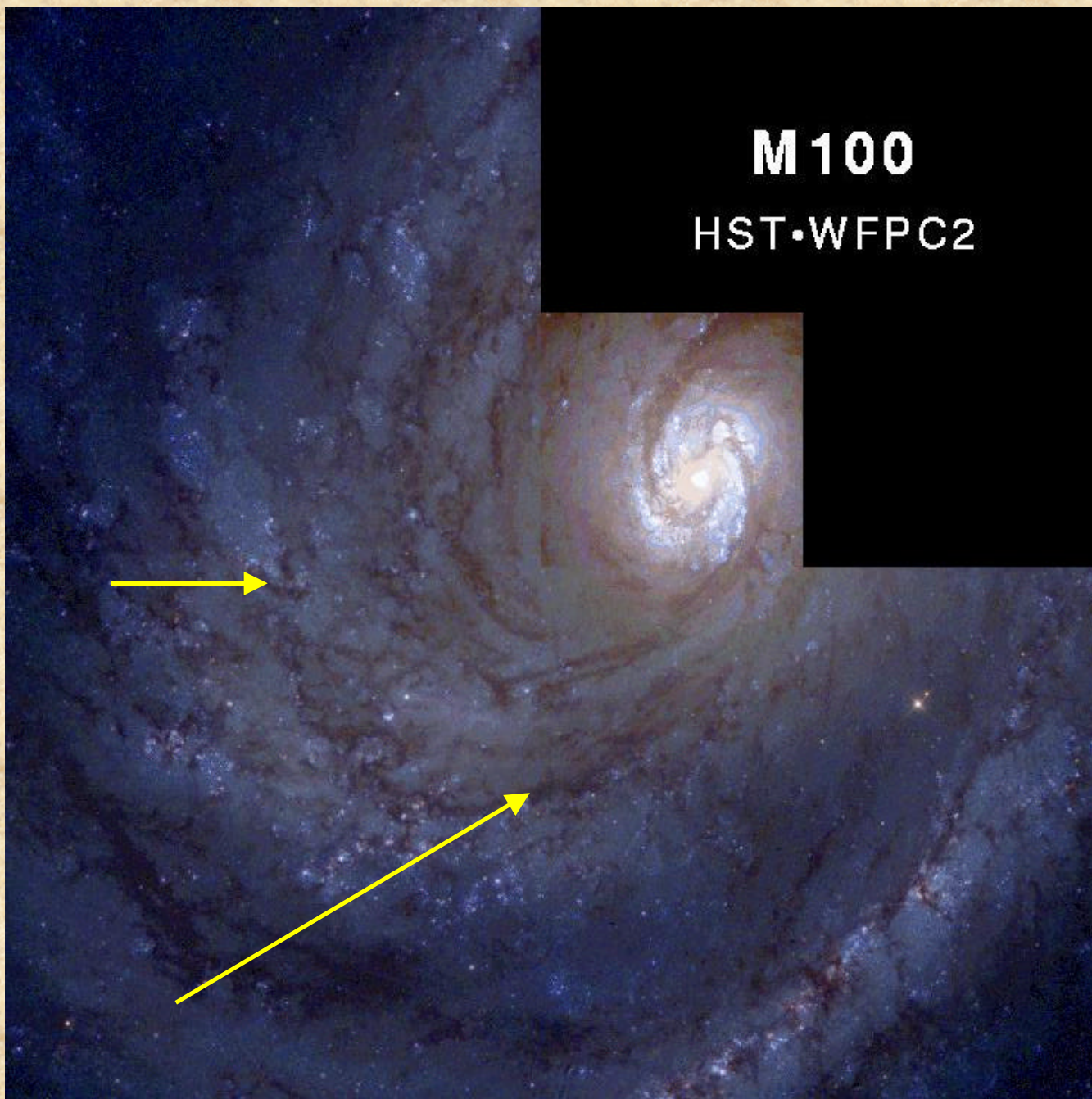
installée sur les
il y a 350 mil-
es.

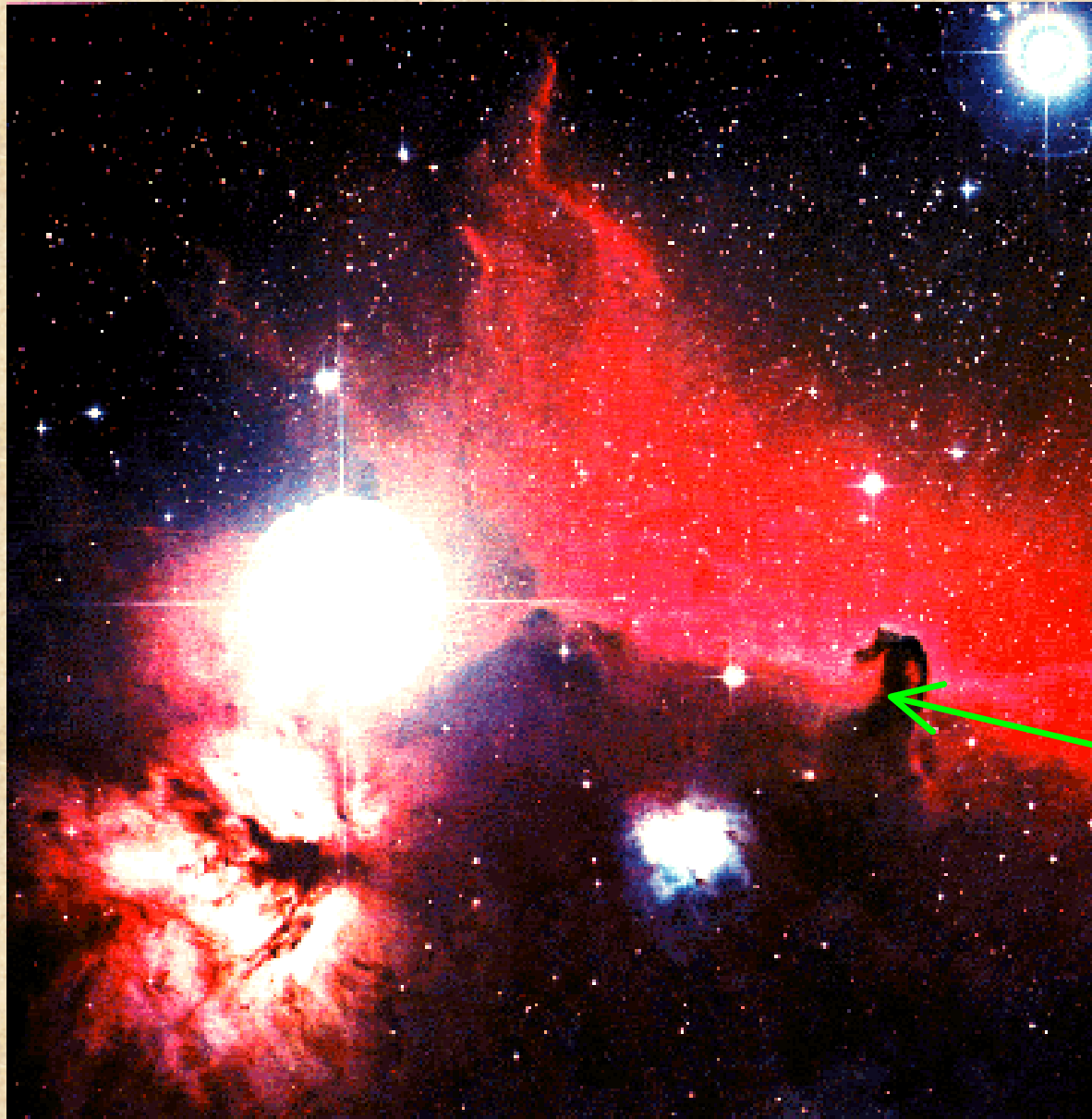
Ga : milliards (: giga) d'années
Ma : millions d'années

Formação de estrelas: onde ocorre?

Nuvens
interestelares
(frias)

M100
HST-WFPC2

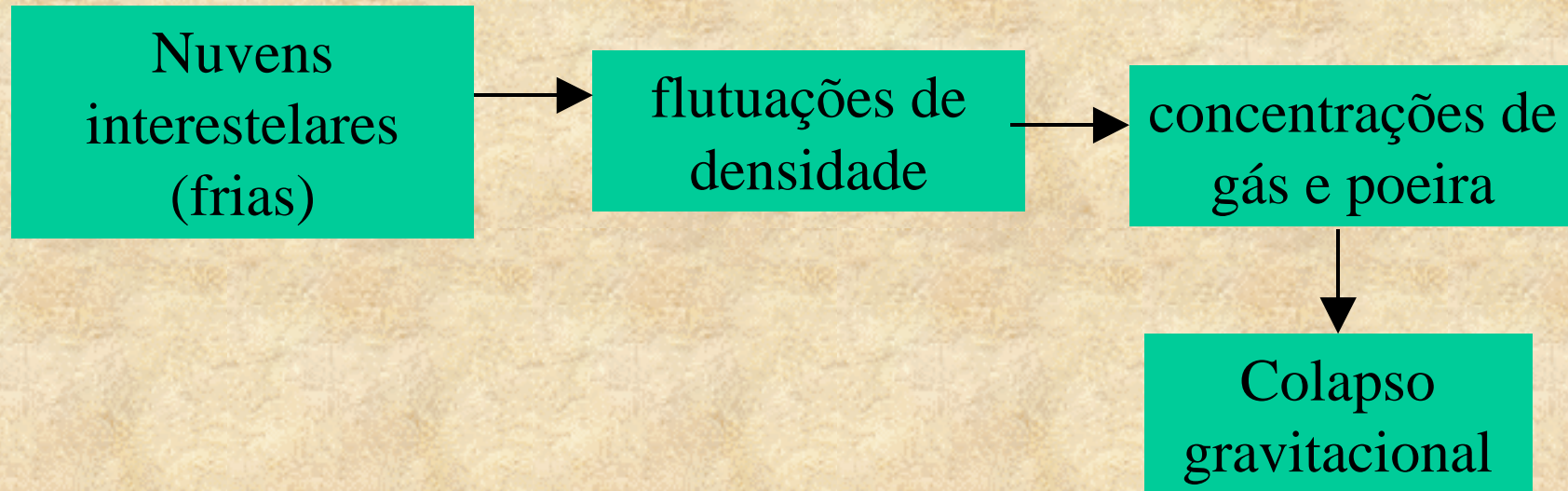


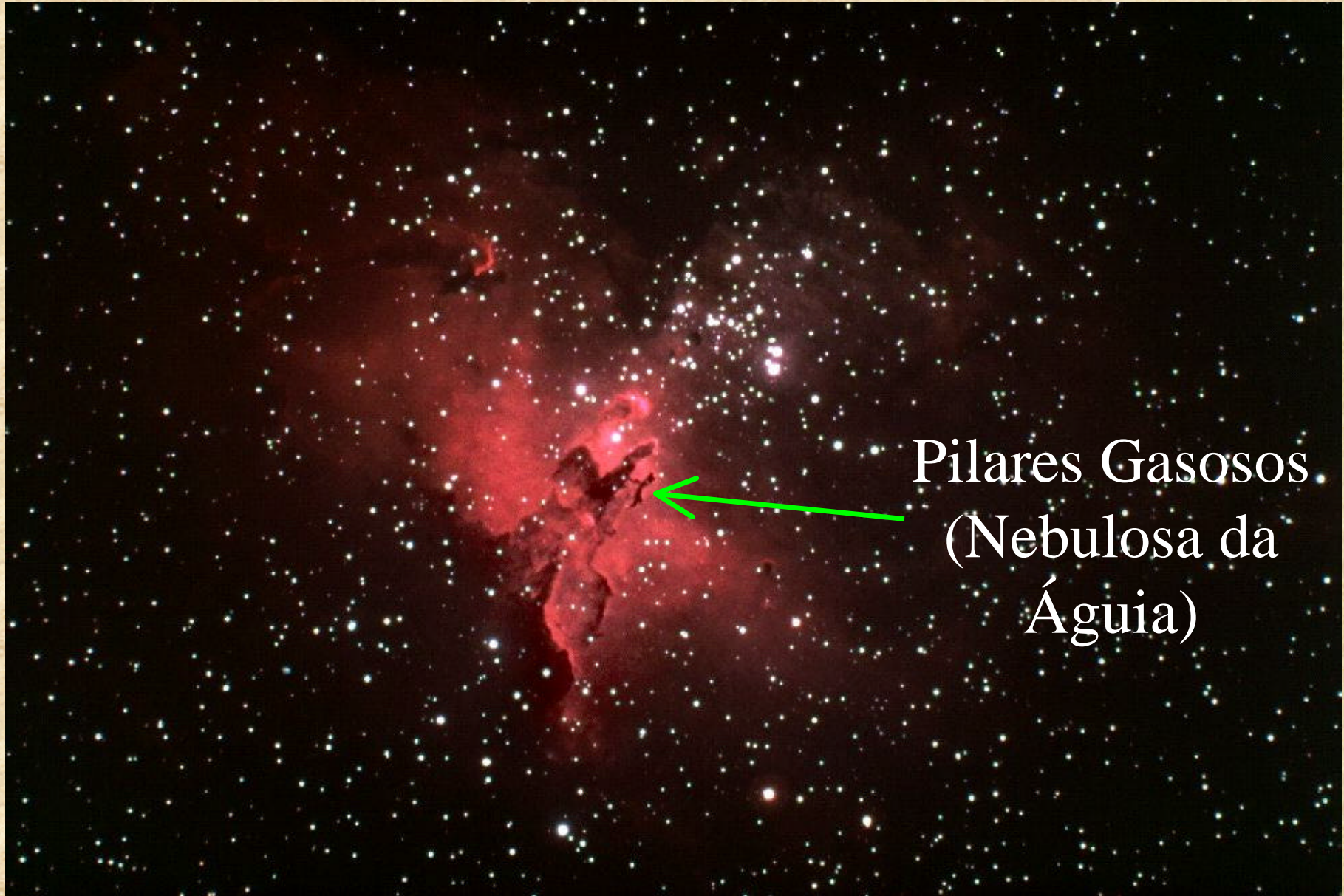


Nuvens
Escuras
(gás e
poeira)

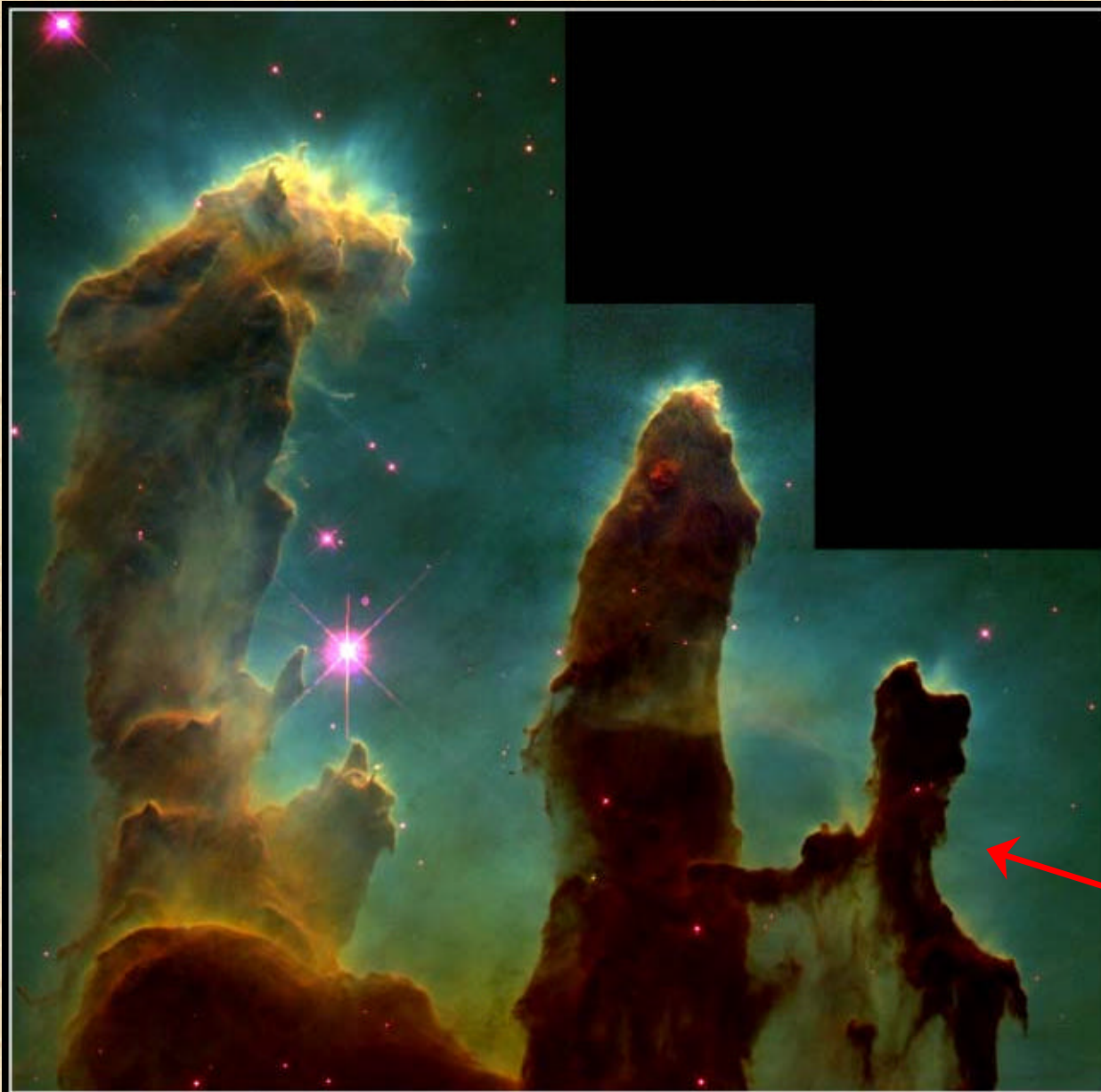
Cabeça de Cavalo
(Nebulosa de
Orion)

Formação de estrelas: como ocorre?





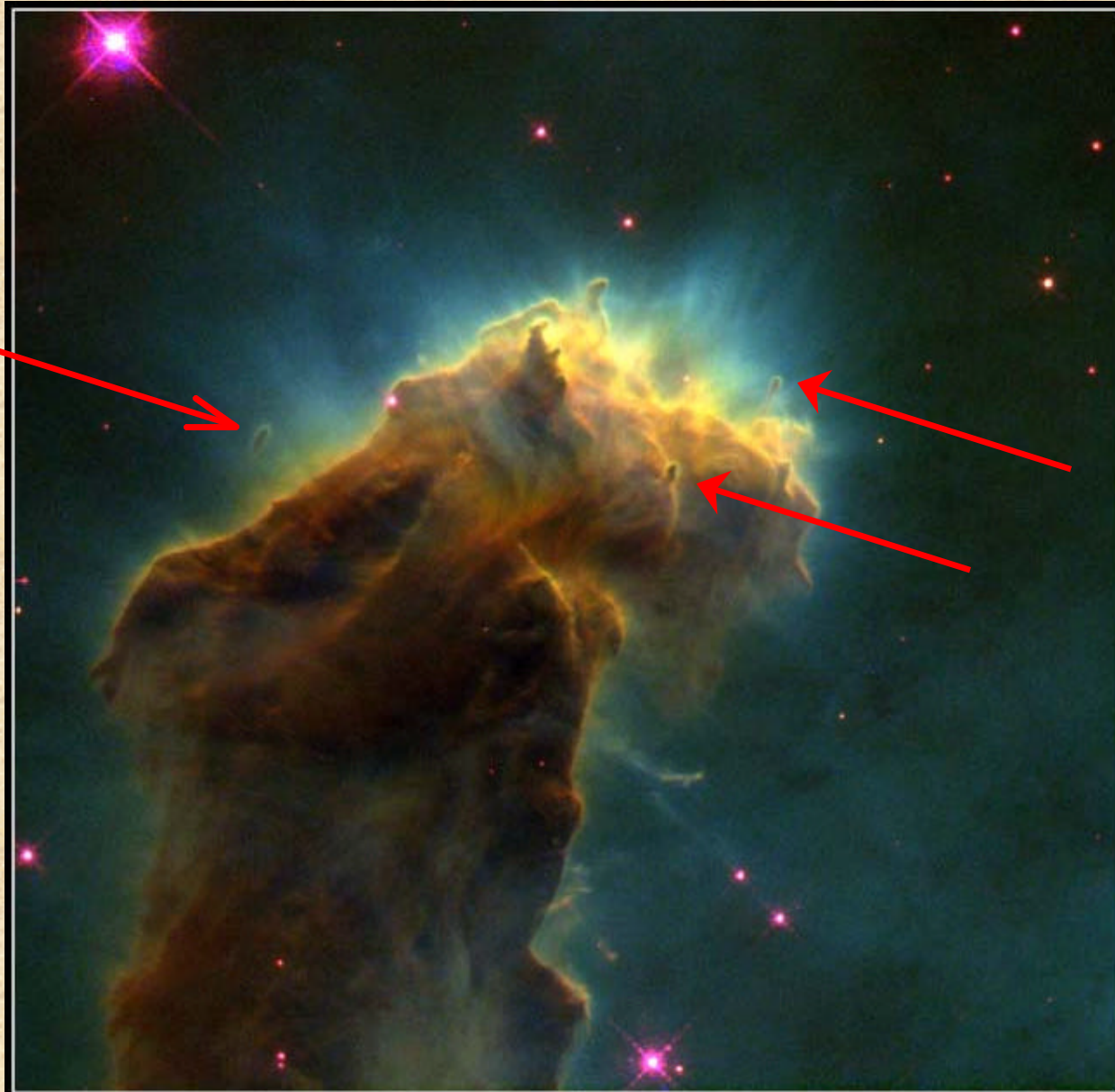
Pilares Gasosos
(Nebulosa da
Água)



Gaseous Pillars · M16

HST · WFPC2

PRC95-44a · ST ScI OPO · November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

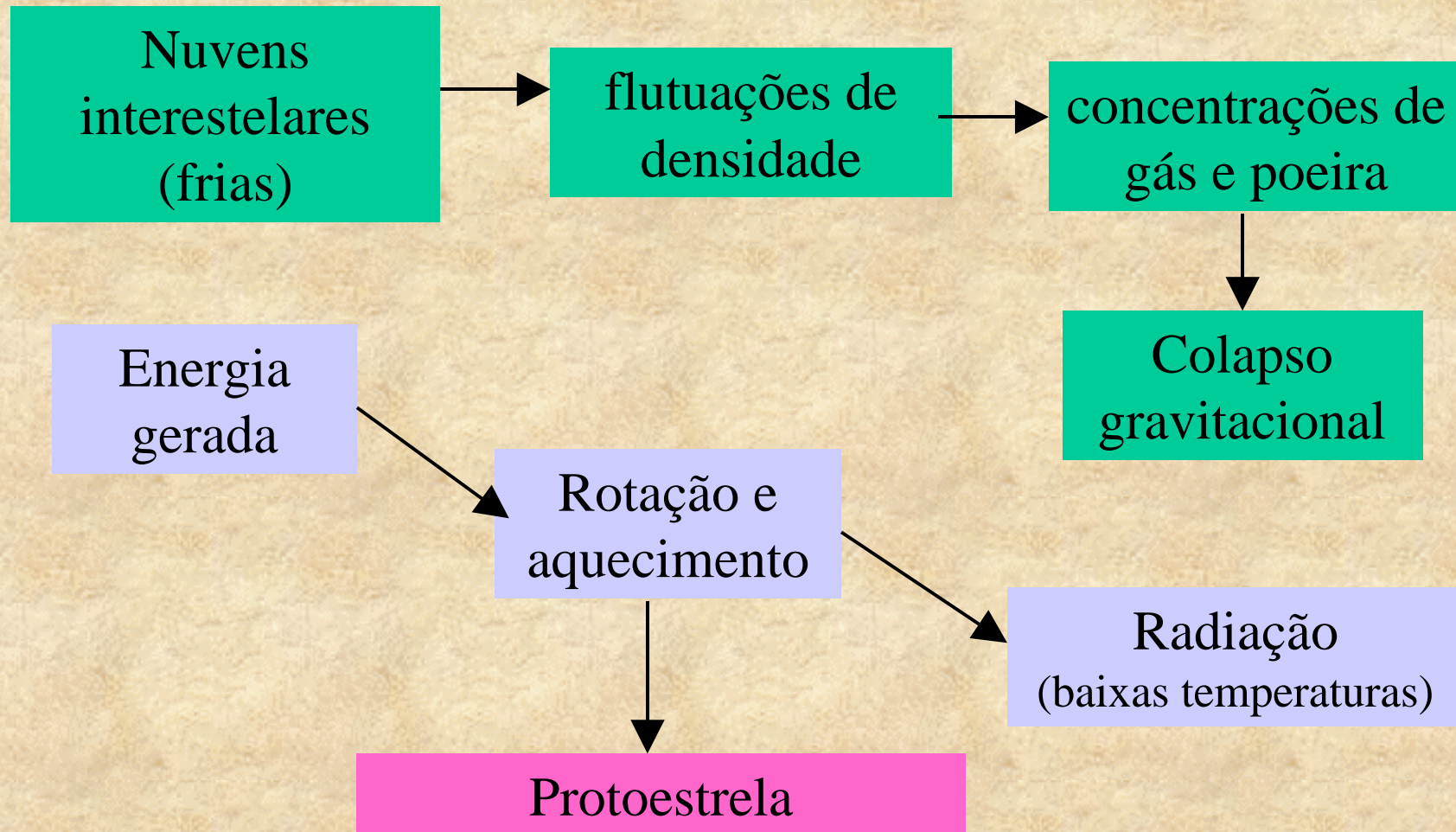


Star-Birth Clouds • M16

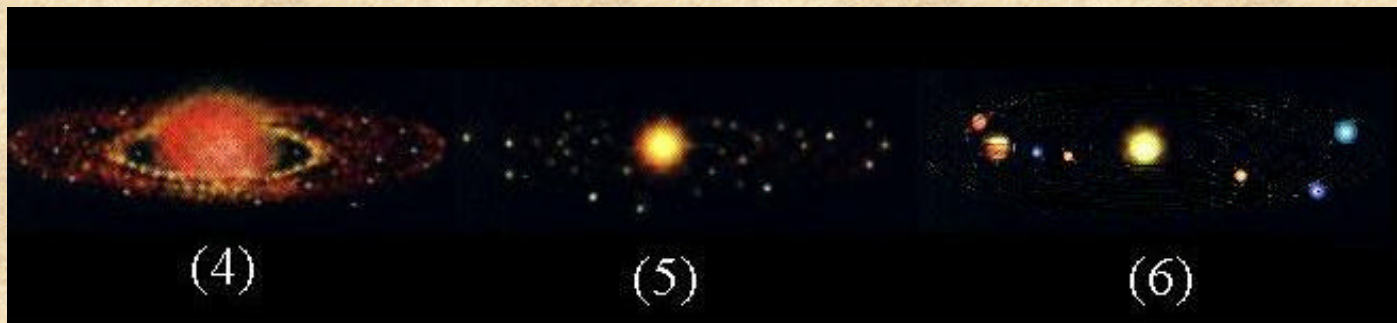
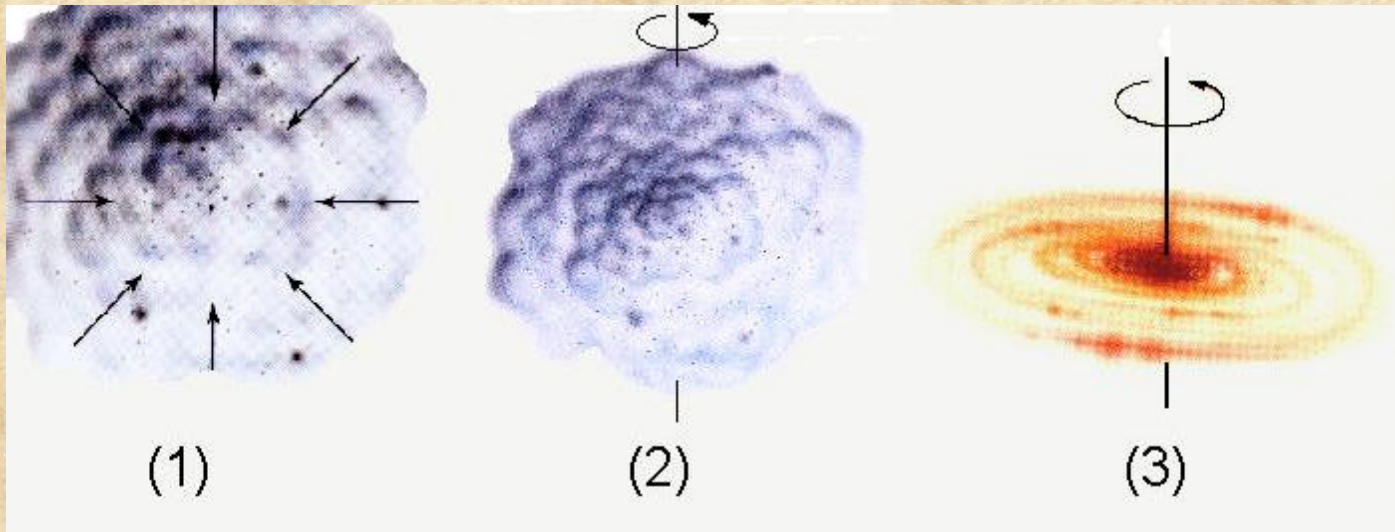
HST • WFPC2

PRC95-44b • ST Sci OPO • November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

Formação de estrelas: como ocorre?



Teoria da Nebulosa Protosolar



Um sistema planetário forma-se a partir do disco protoestelar

Tempo de Contração

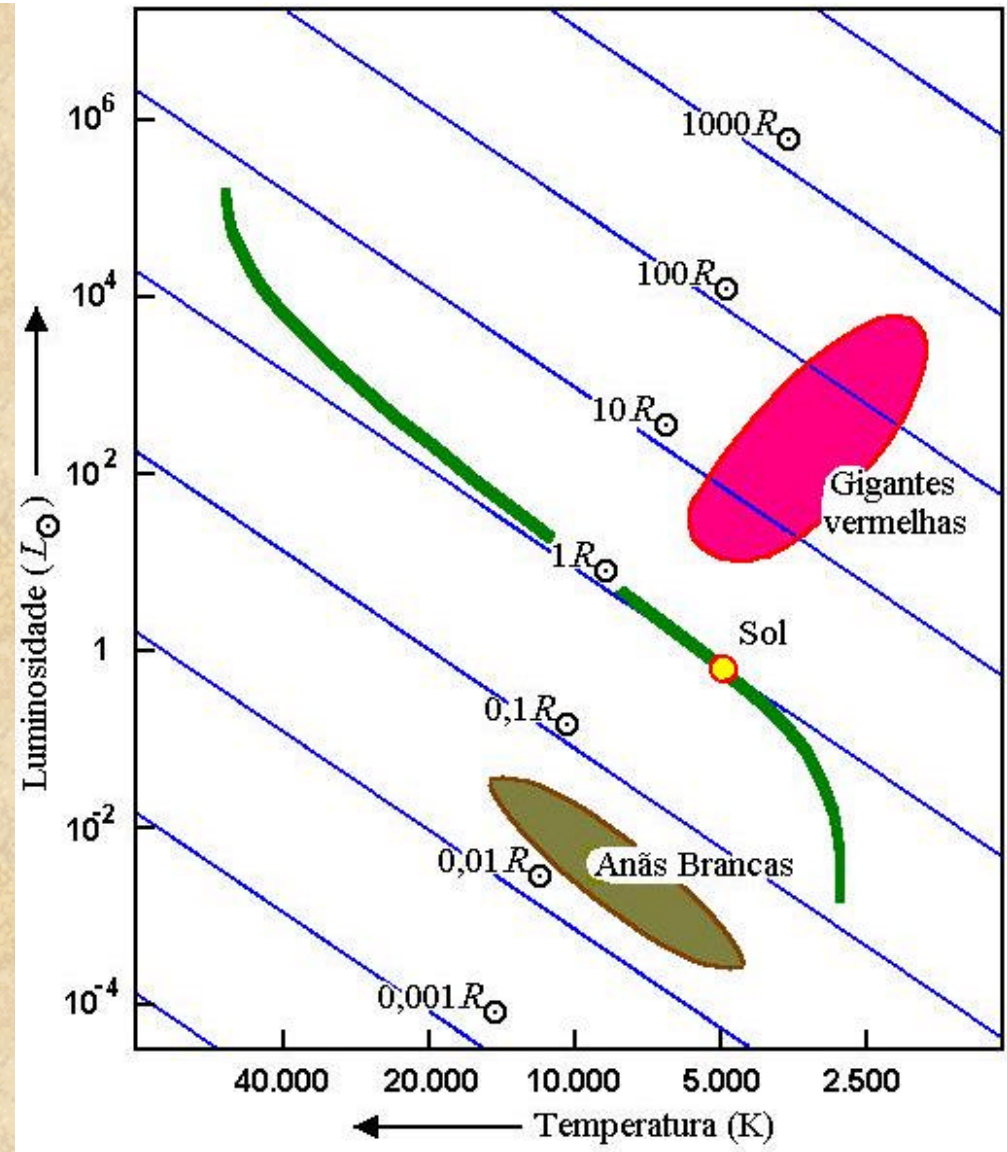
- Após alguns milhares de anos de contração:
- $T \sim 2000$ a $3000\text{K} \rightarrow$ protoestrela de $1M_{\odot}$
ainda é grande e brilhante



20 x diâmetro e 100 x mais brilhante que o Sol

Trajetoória evolutiva das protoestrelas **começa** na região das gigantes vermelhas no Diagrama H-R.

Apenas coincidência



O diagrama H-R

Duração da fase pré-sequência principal

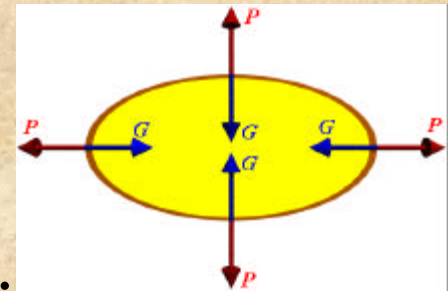
A juventude das estrelas eh muito curta (depende da massa)Ç

- $M = 15 M_{\odot} \rightarrow t_{\text{PSP}} \sim 10$ mil anos
- $M = 1 M_{\odot} \rightarrow t_{\text{PSP}} \sim 10$ milhões de anos
- $M < 0,08 M_{\odot} \rightarrow (P \downarrow T \downarrow)$
não sofrem processos termonucleares $\rightarrow \sim$ planetas.
- $M > 100 M_{\odot} \rightarrow$ elevada pressão de radiação,
não ocorre colapso gravitacional.

Seqüência Principal

Uma vez estabelecidos, os processos termonucleares são auto-controlados:

- ↑ Energia \Rightarrow excesso de pressão \Rightarrow expande a estrela.
- ↑ Tamanho \Rightarrow gás interior tende a esfriar.
- A estrela encontra (temperatura & raio) ideais para equilíbrio.
- ☺ Longo período de estabilidade.
(durante a maior parte da vida da estrela)



Estágios Finais determinados pela massa

- $M \sim 1 M_{\odot}$: gigante vermelha \Rightarrow nebulosa planetária

Anã branca 

- $M > 1 M_{\odot}$: explosão de supernova \Rightarrow

Estrela de Nêutrons; Pulsar

- $M \gg 1 M_{\odot}$: explosão mais violenta \Rightarrow

Buraco Negro

Estágios Finais: Sol

- Temperatura interior ~ 10 milhões K
- Quando todo H é transformado em He, a estrela deixa de gerar energia:
- Sem condições de fusão $\text{He} \rightarrow \text{C}$

requer $T > 10^8$ K

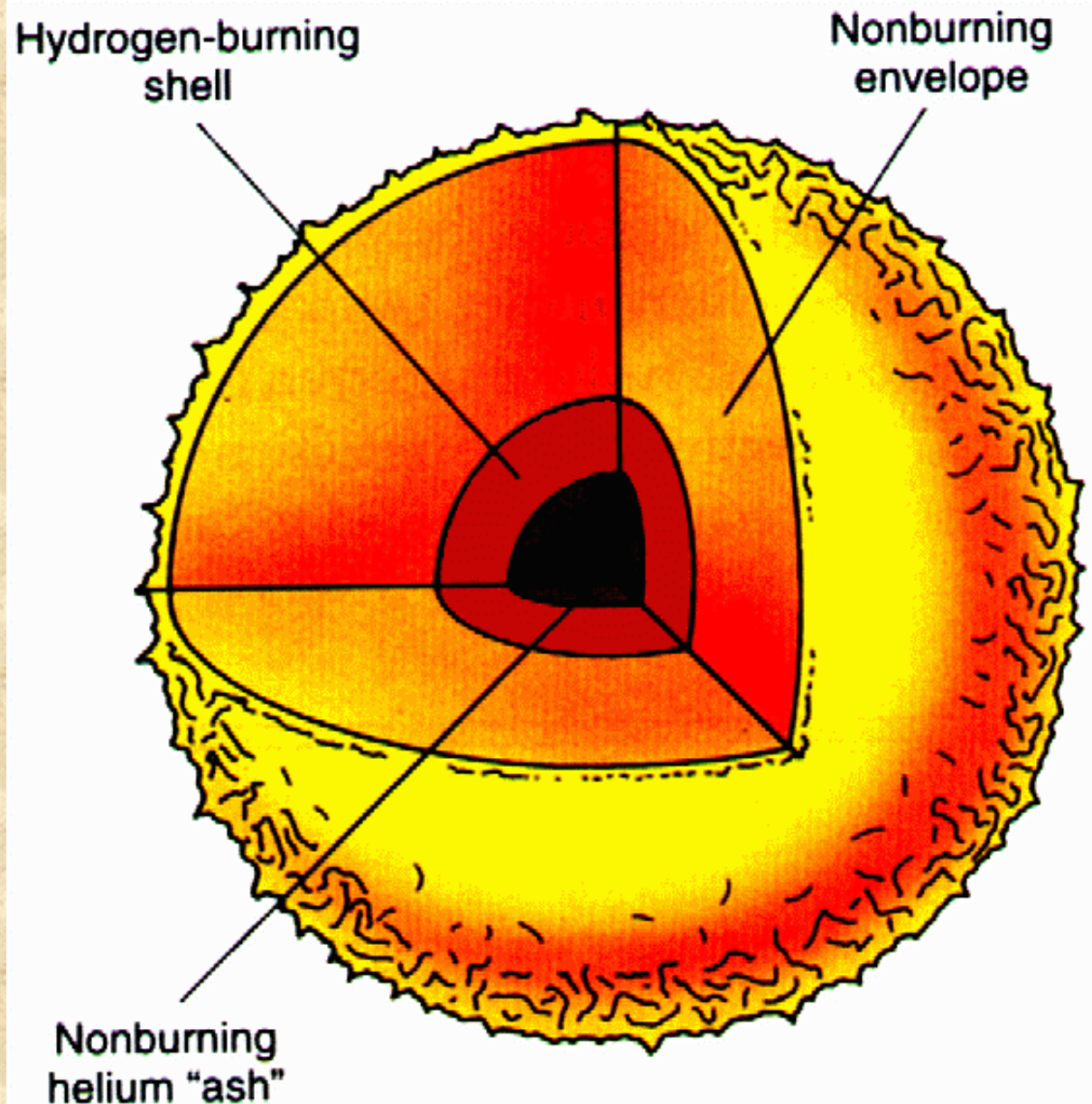


Na região $10^7 \text{ K} < T < 10^8 \text{ K}$ forma-se uma camada onde ocorre queima de H ao redor de um caroço de He inerte.

O término do “combustível” no interior da estrela faz com que a pressão de radiação seja vencida pela ação gravitacional



estrela entra em colapso



Estrelas com massas maiores:

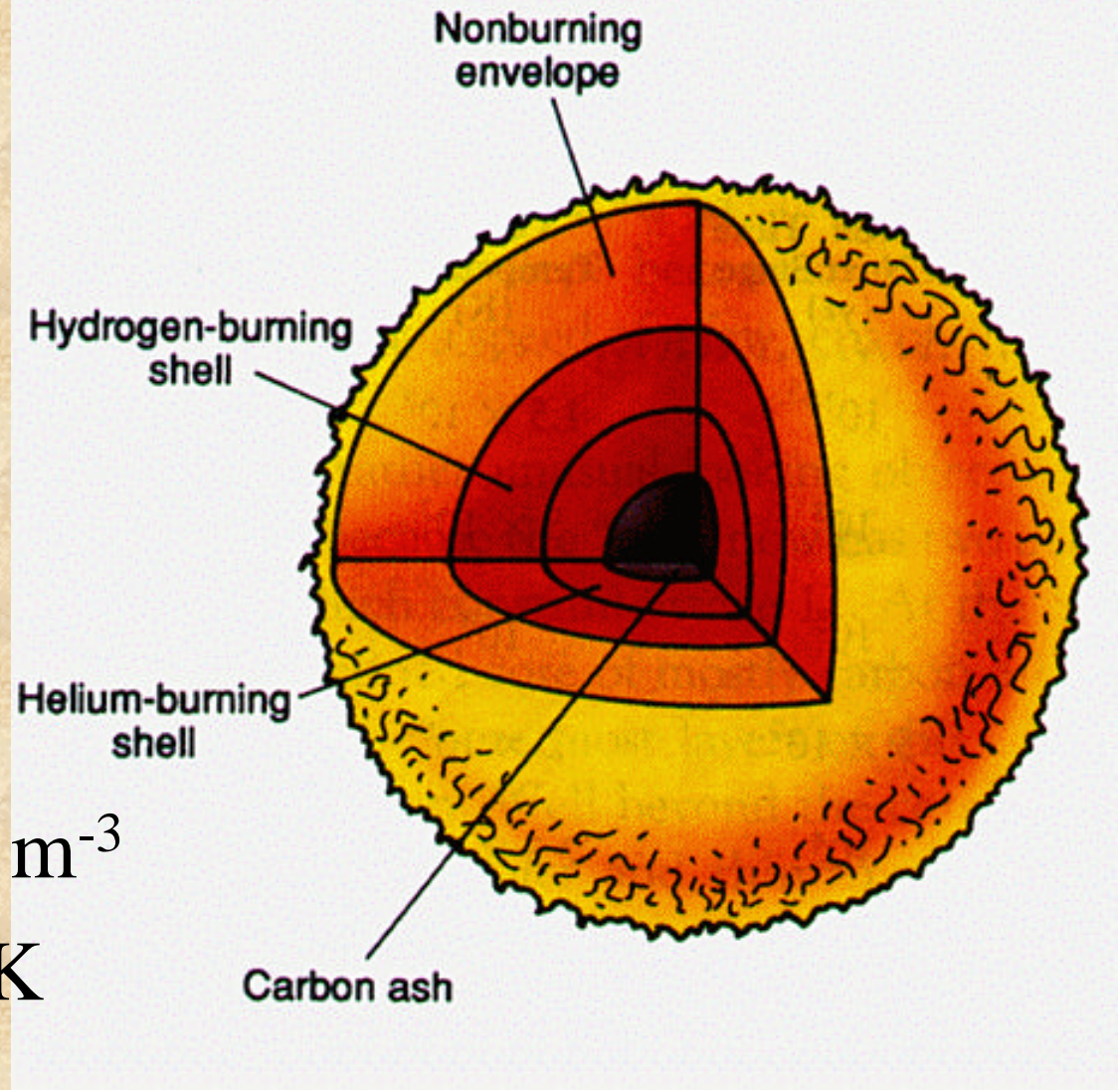
Densidades $\sim 10^8 \text{ Kg m}^{-3}$

Temperaturas $\sim 10^8 \text{ K}$



Fusão do He

Queima do He forma um “caroço” de Carbono.



A morte de estrelas de baixa massa

A ★ não tem condições para a queima de C

Deixa de gerar energia

Equilíbrio interrompido

Força gravitacional vence

★ colapsa

A morte de estrelas de baixa massa

Colapso ocorre até que:

- Densidade ↑
- Pressão dos elétrons degenerados ↑



(a matéria não se comporta como gás ideal: diferentes relações entre T, P e ρ)

- **Contração é detida**
(p/ massas $< 1.4 M_{\odot}$)

A morte de estrelas de baixa massa

$T \uparrow$ Expande \Rightarrow Gigante Vermelha

$T \downarrow$ Contraí \Rightarrow Anã Branca

raio $\sim R_{\text{Terra}}$

densidade $= 10^4 - 10^7 \text{ g cm}^{-3}$

Sirius B



Estrelas com massa um pouco maior

$T \uparrow$ Expande \Rightarrow Gigante Vermelha

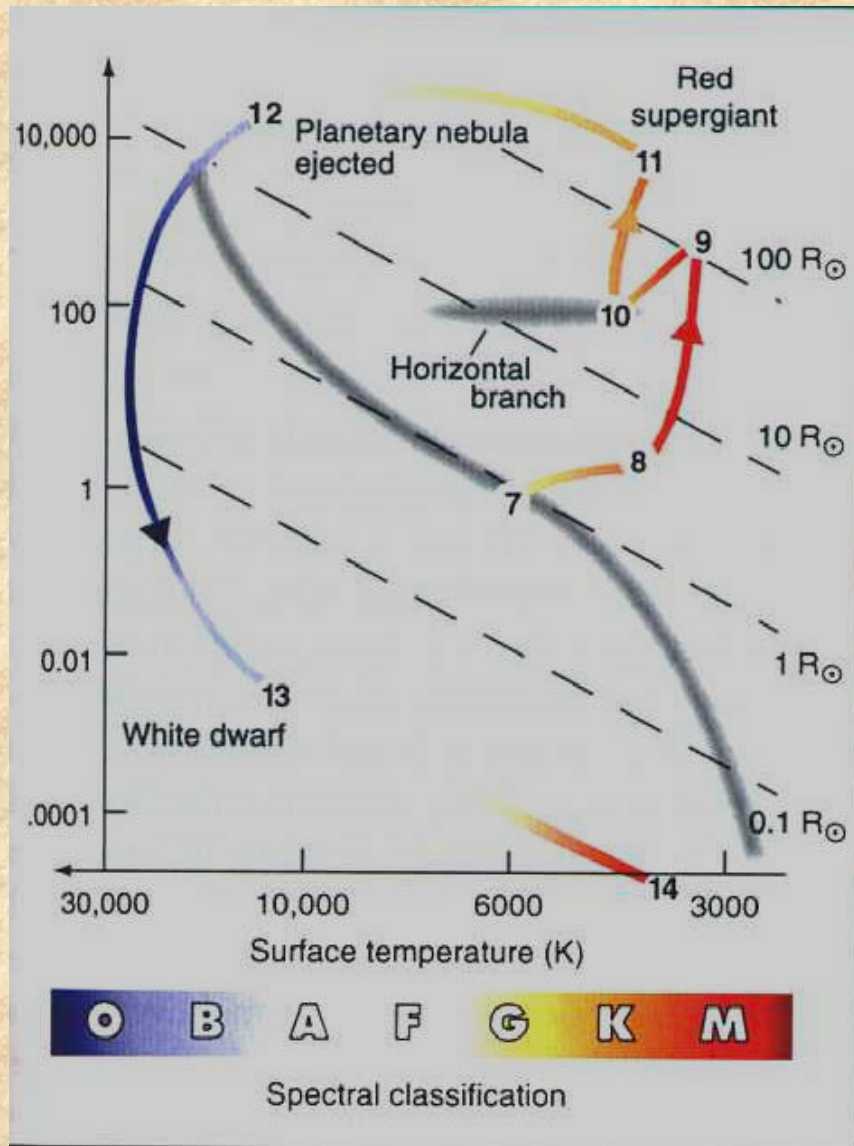
Camadas externas ejetadas \Rightarrow Nebulosa Planetária

$T \downarrow$ Contraí \Rightarrow Anã Branca

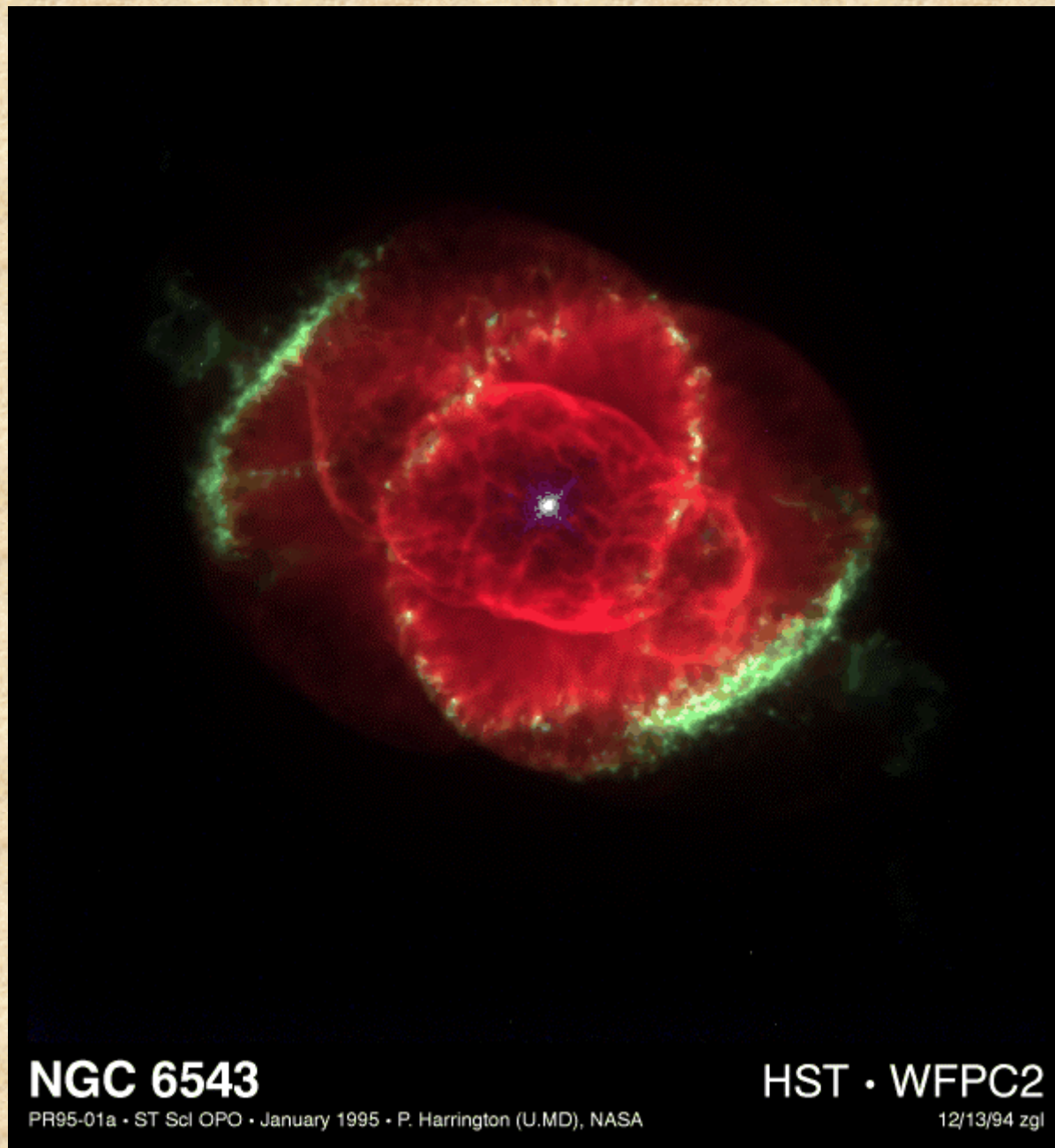
(cont.) Estrelas com massa um pouco maior

$$m_{\star} > 1 M_{\odot}$$

Camadas mais externas da gigante vermelha são ejetadas.



Nebulosa Planetária

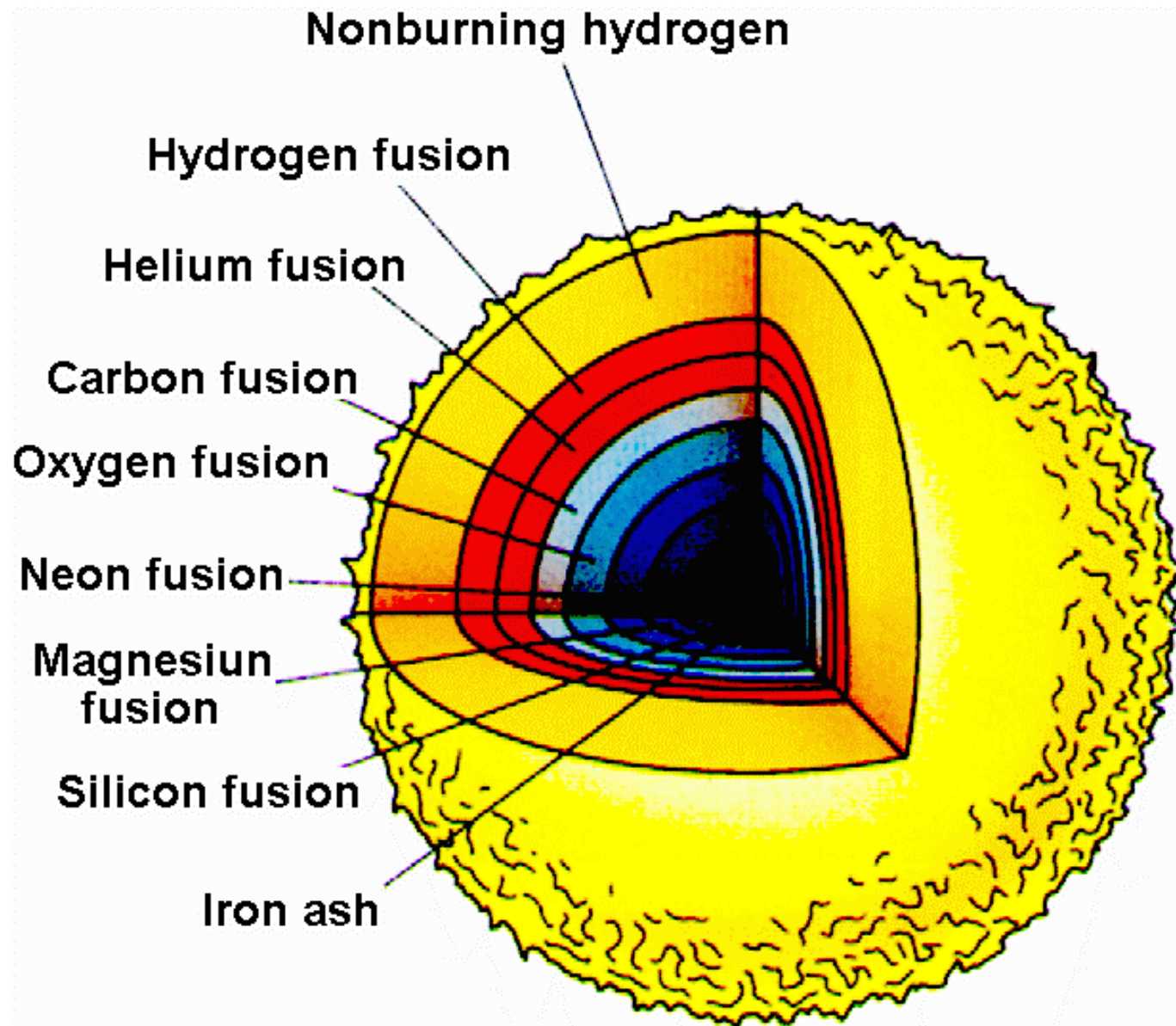


NGC 6543

PR95-01a • ST ScI OPO • January 1995 • P. Harrington (U.MD), NASA

HST • WFPC2

12/13/94 zgl



Interior de uma estrela massiva muito evoluída. As camadas se distribuem na forma de cascas de cebola, as quais contém progressivamente elementos mais pesados, raios cada vez menores e temperaturas mais elevadas.

Estrelas com massas maiores

- Após o término de He → evolução prossegue
- Queima de elementos mais pesados
→ chega até Fe
- Fim da energia → colapso gravitacional
(não pode ser sustentado pela pressão de e^- degenerados)

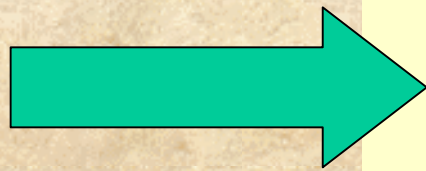
Estrelas com massas maiores

$P \uparrow$ $T \uparrow$ \rightarrow material é transformado em nêutrons



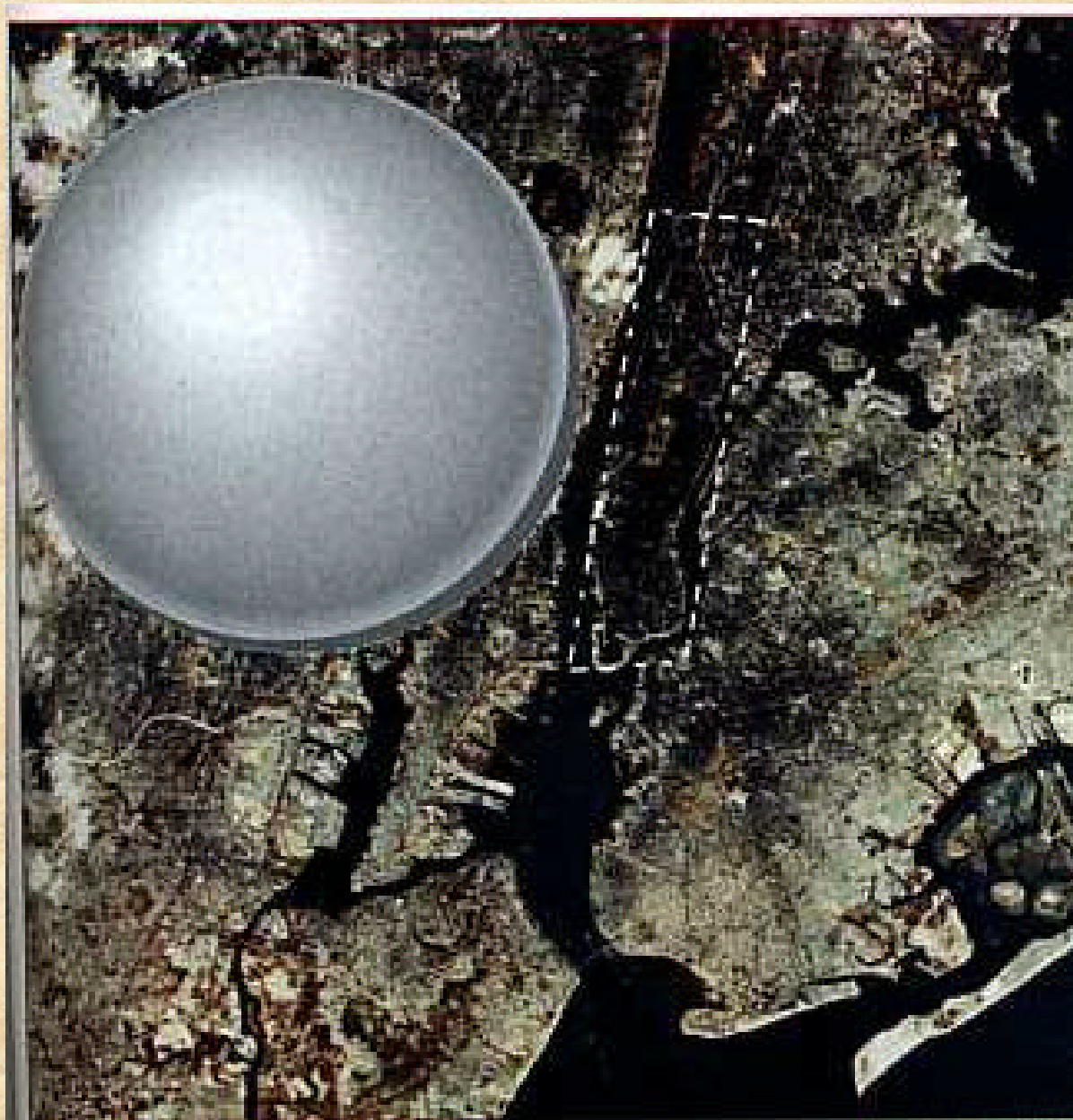
Número de e^- \downarrow $P \uparrow$ colapso se acelera

Degenerescência de nêutrons pode conter o colapso



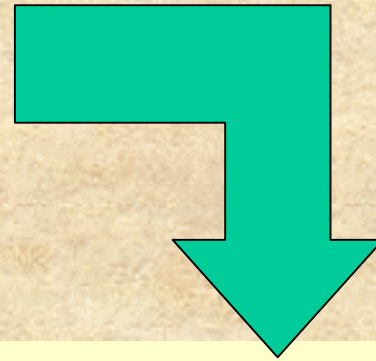
Estrela de
Nêutrons

$\rho = 10^{15} \text{ g cm}^{-3}$
raio \sim alguns km



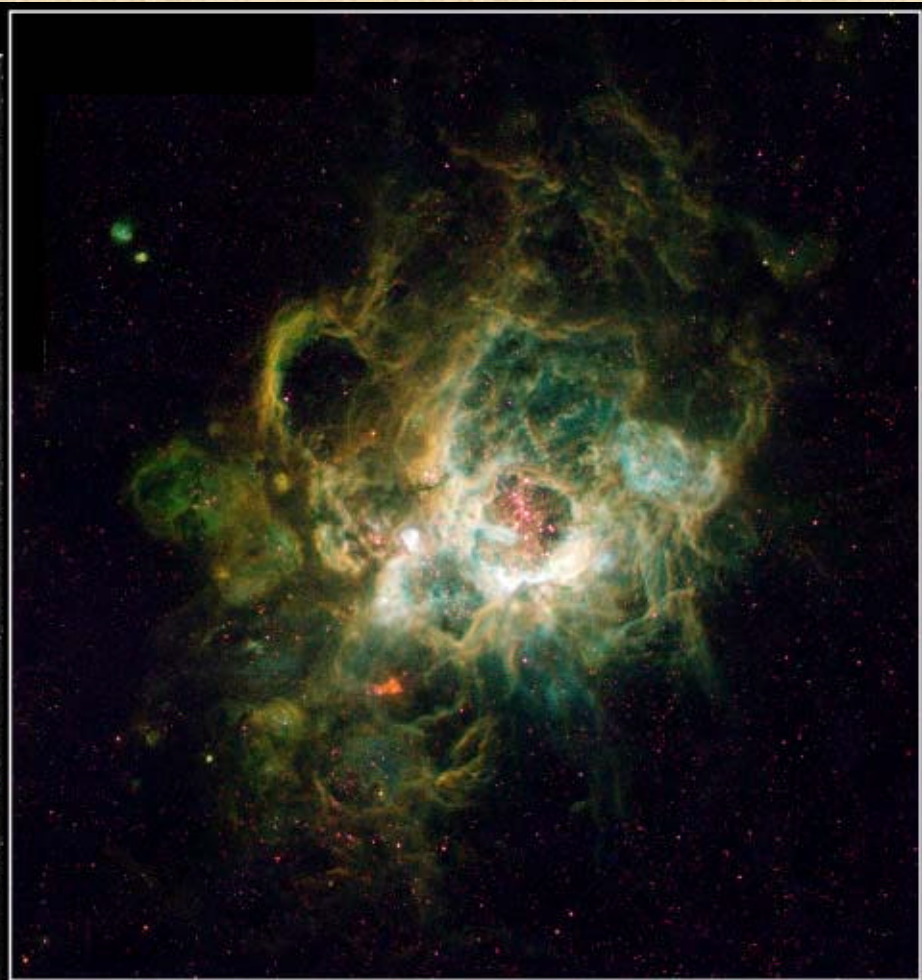
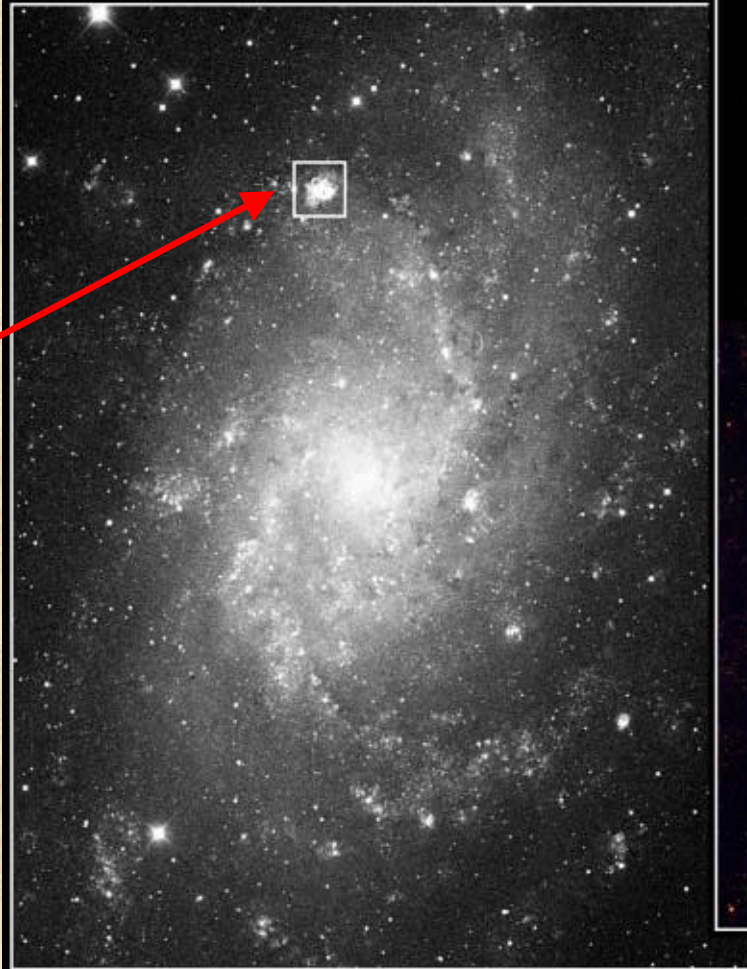
Estrelas com massas maiores

- Camadas externas ejetadas violentamente
(aquecidas pelos neutrinos durante o colapso)
- Processo explosivo



Supernova

Palomar



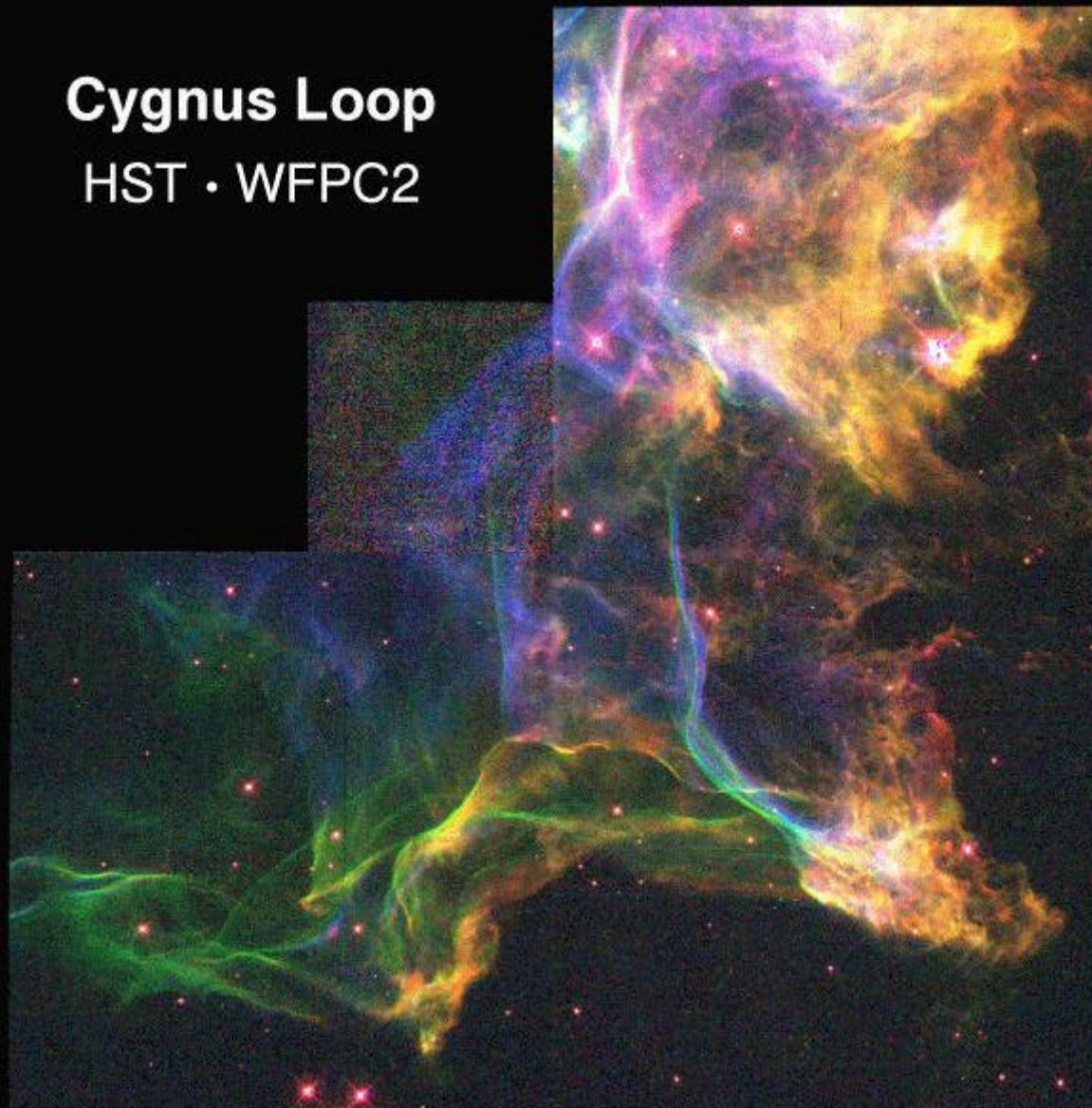
HST

HST · WFPC2

NGC 604 in Galaxy M33

PRC96-27 · ST ScI OPO · August 7, 1996 · Hui Yang (U.I.L) and NASA

Cygnus Loop
HST · WFPC2



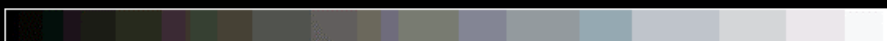
ST ScI OPO PRC95-11 · February 1995

2/14/95 zgl

Supernova 1987A Rings



Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera 2



Estrelas com massas maiores

Estrela que resta pode ser observada como

Pulsar

fonte rádio que emite pulsos periódicos

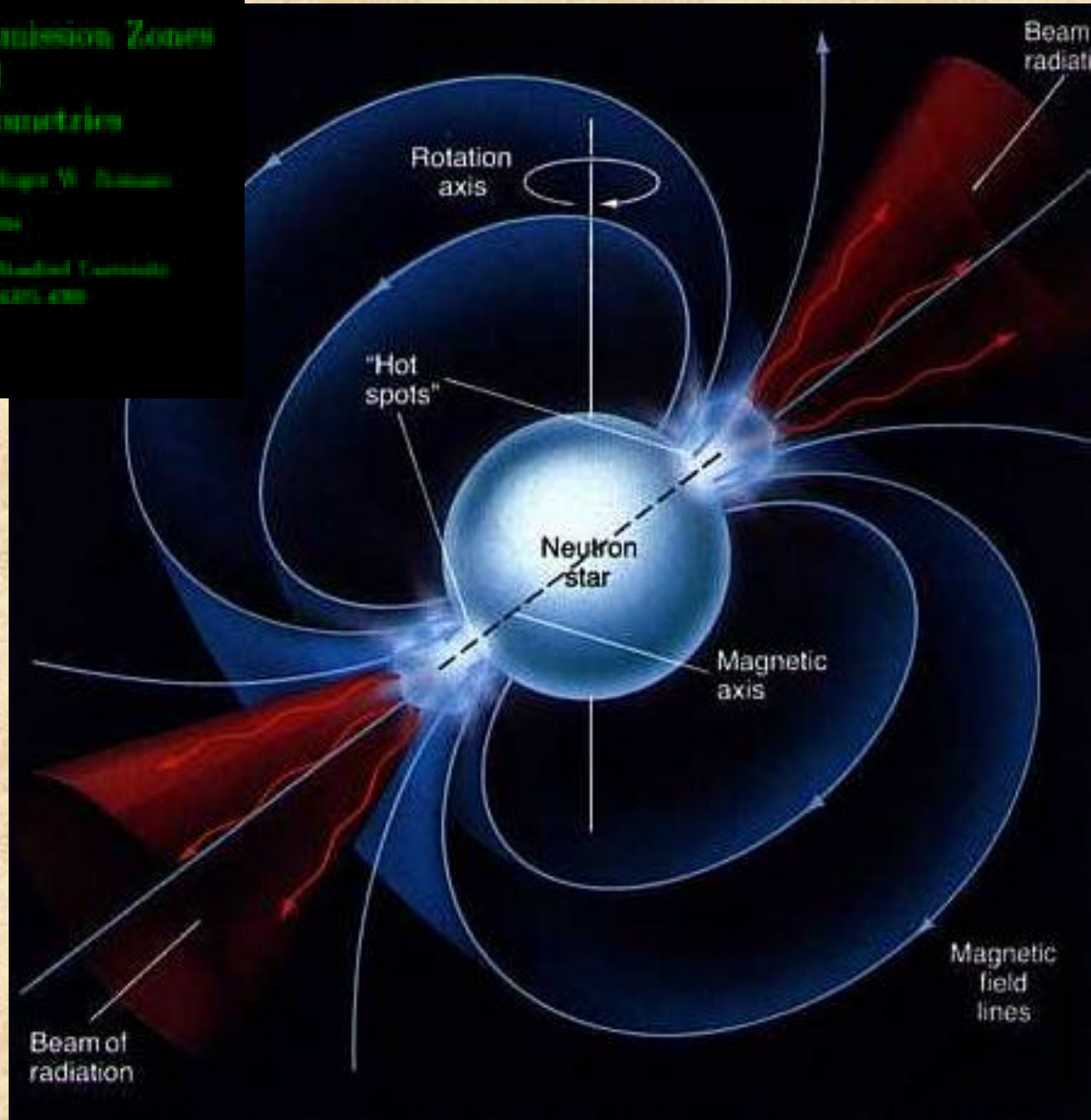
$$m_{\star} \gg M_{\odot}$$

→ Ray Pulsars: Emission Zones
and
Viewing Geometries

L. A. Naylor and Roger W. Romani

April 1994

Department of Physics, Stanford University
Stanford, CA 94305-5080

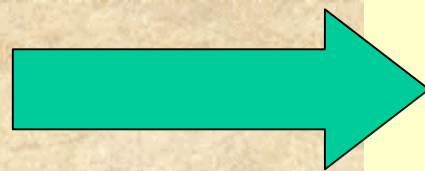


Estrelas com massas MUITO maiores

Degenerescência de nêutrons não pode conter o colapso

→ raio da ★ → zero

Campo gravitacional tão intenso
que nada escapa (nem a luz)



Buraco
Negro

Buraco Negro

Não observável diretamente: sua presença é deduzida a partir de evidências observacionais

Radiação de altas energias

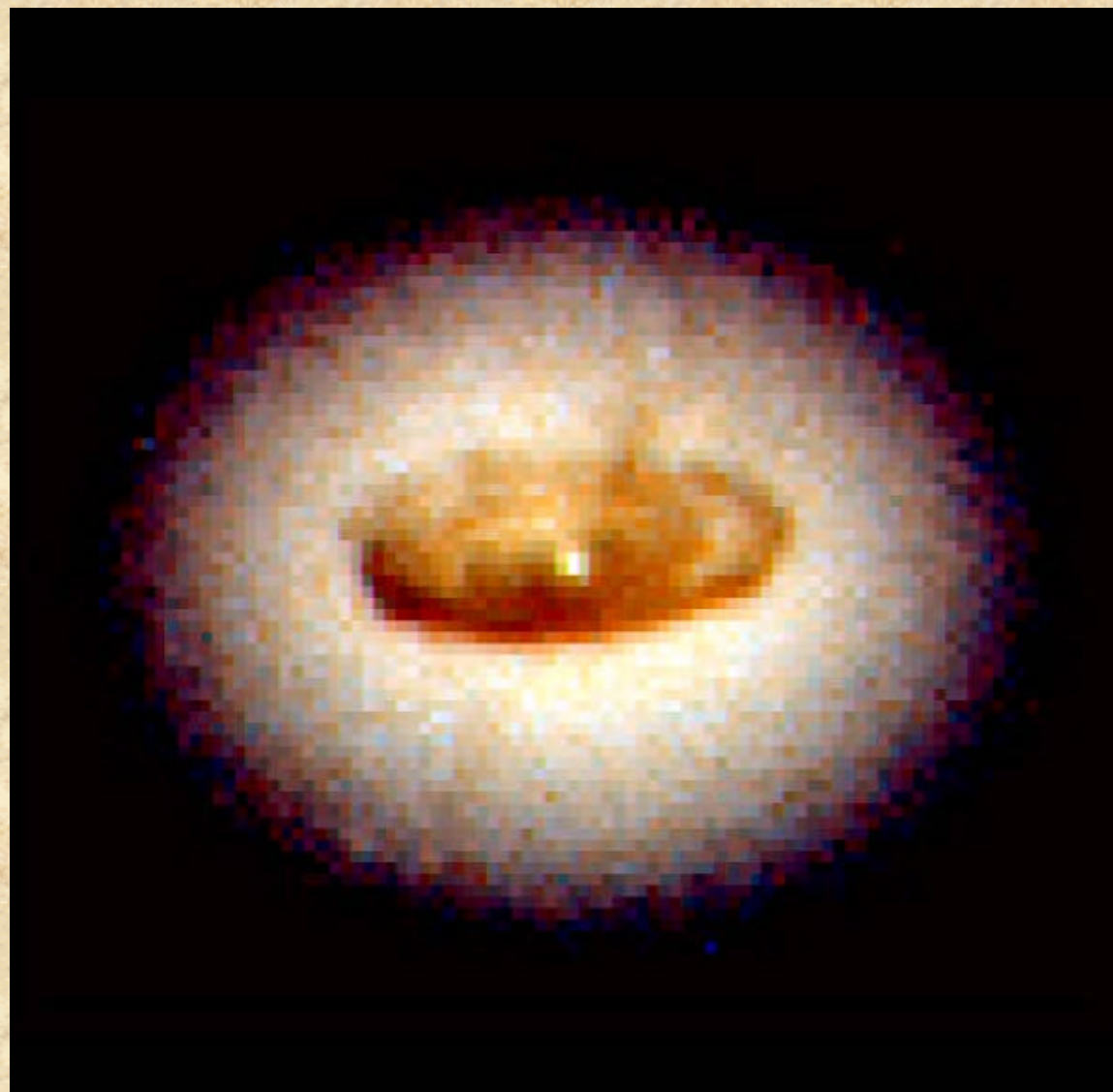
Sistemas binários → matéria da estrela passa para BN

queda espiralada, formando disco acelerado

Raios X



```
graph TD; A[Sistemas binários] --> B[matéria da estrela passa para BN]; B --> C[queda espiralada, formando disco acelerado]; C --> D[Raios X];
```



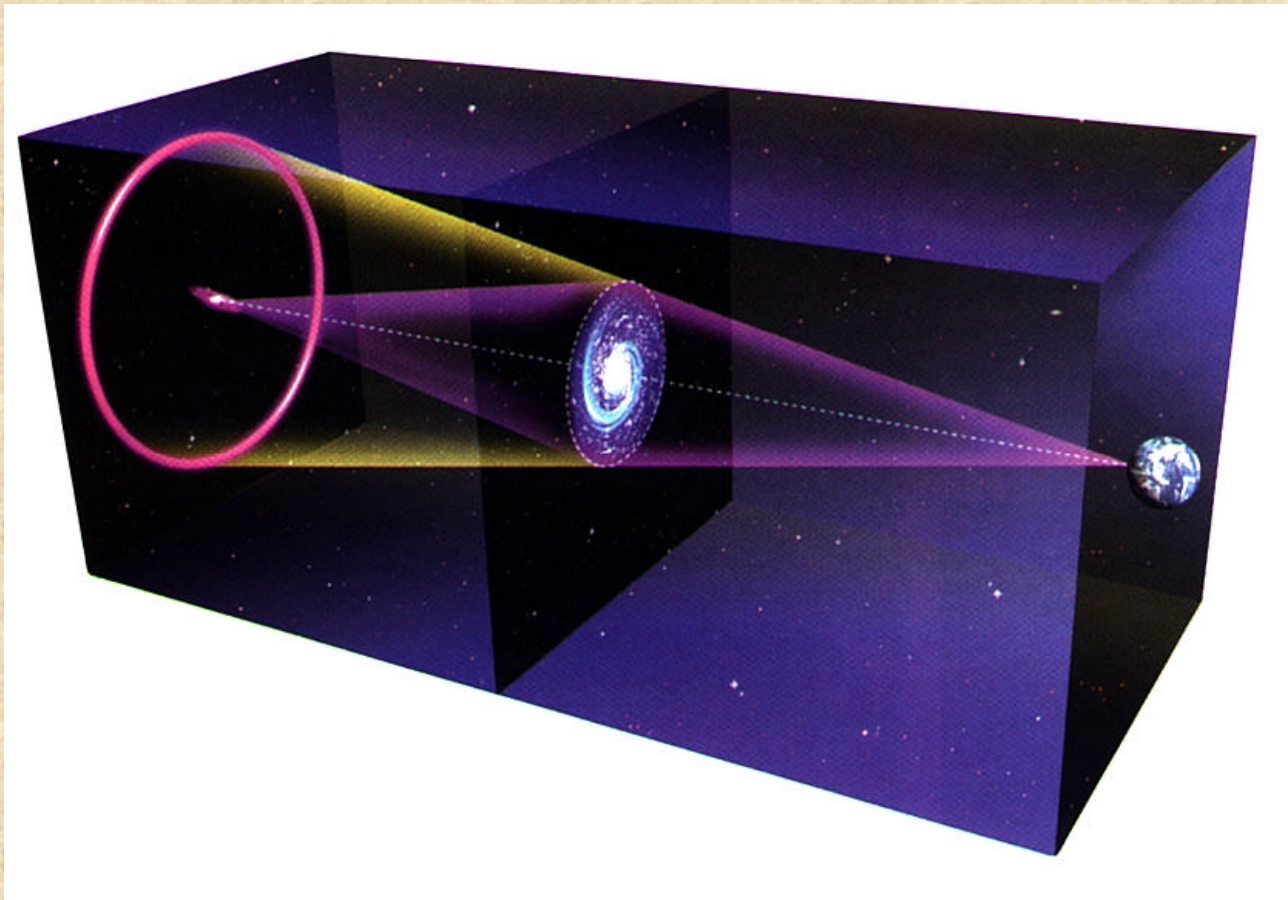
Core of Galaxy NGC4261

HST • WFPC2

PRC95-47 • ST ScI OPO • December 4, 1995
H. Ford and L. Ferrarese (JHU), NASA

Buraco Negro

- Efeito de lente gravitacional (trajetória da luz alterada)





Gravitational Lens in Abell 2218

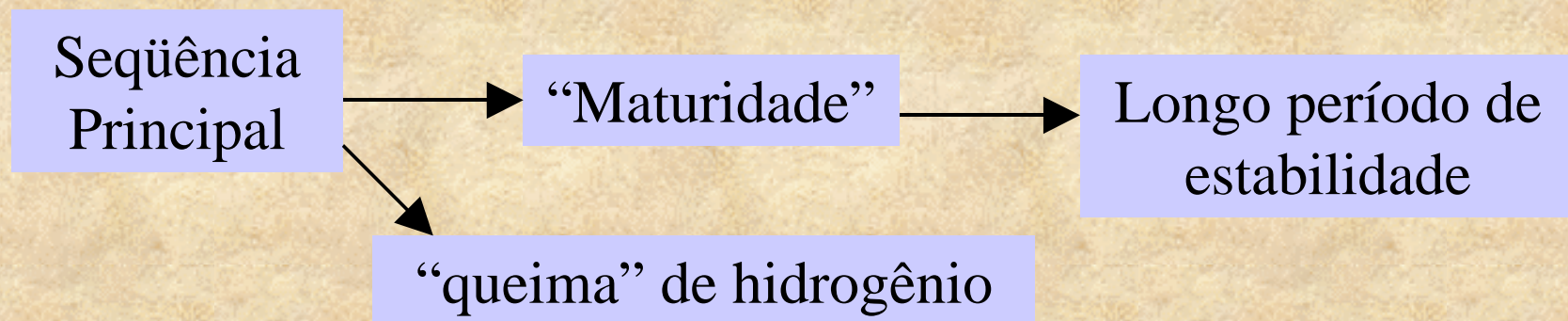
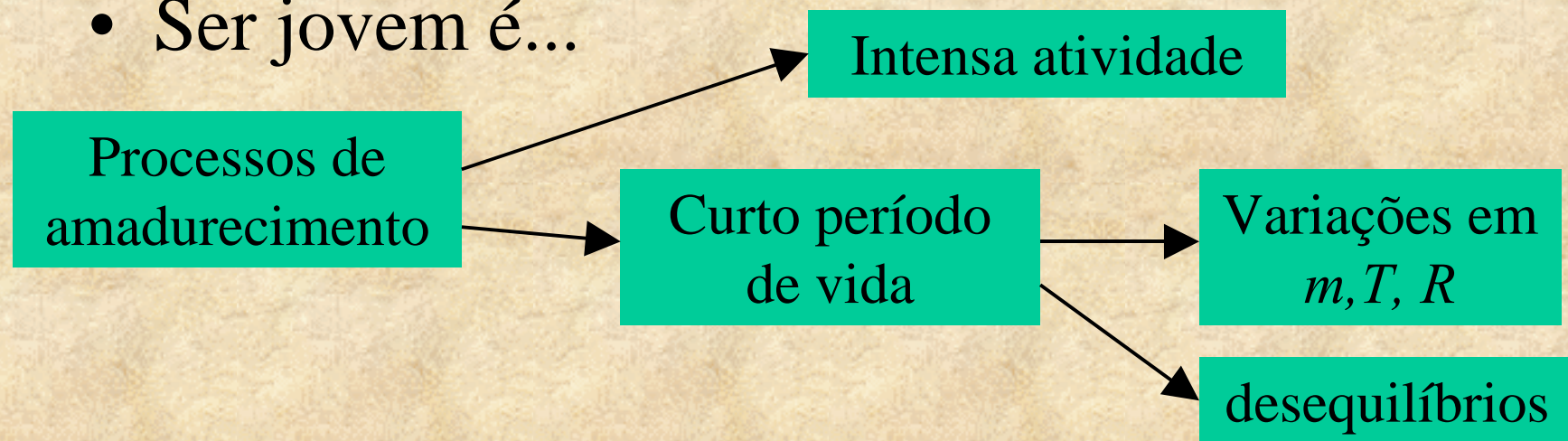
HST · WFPC2

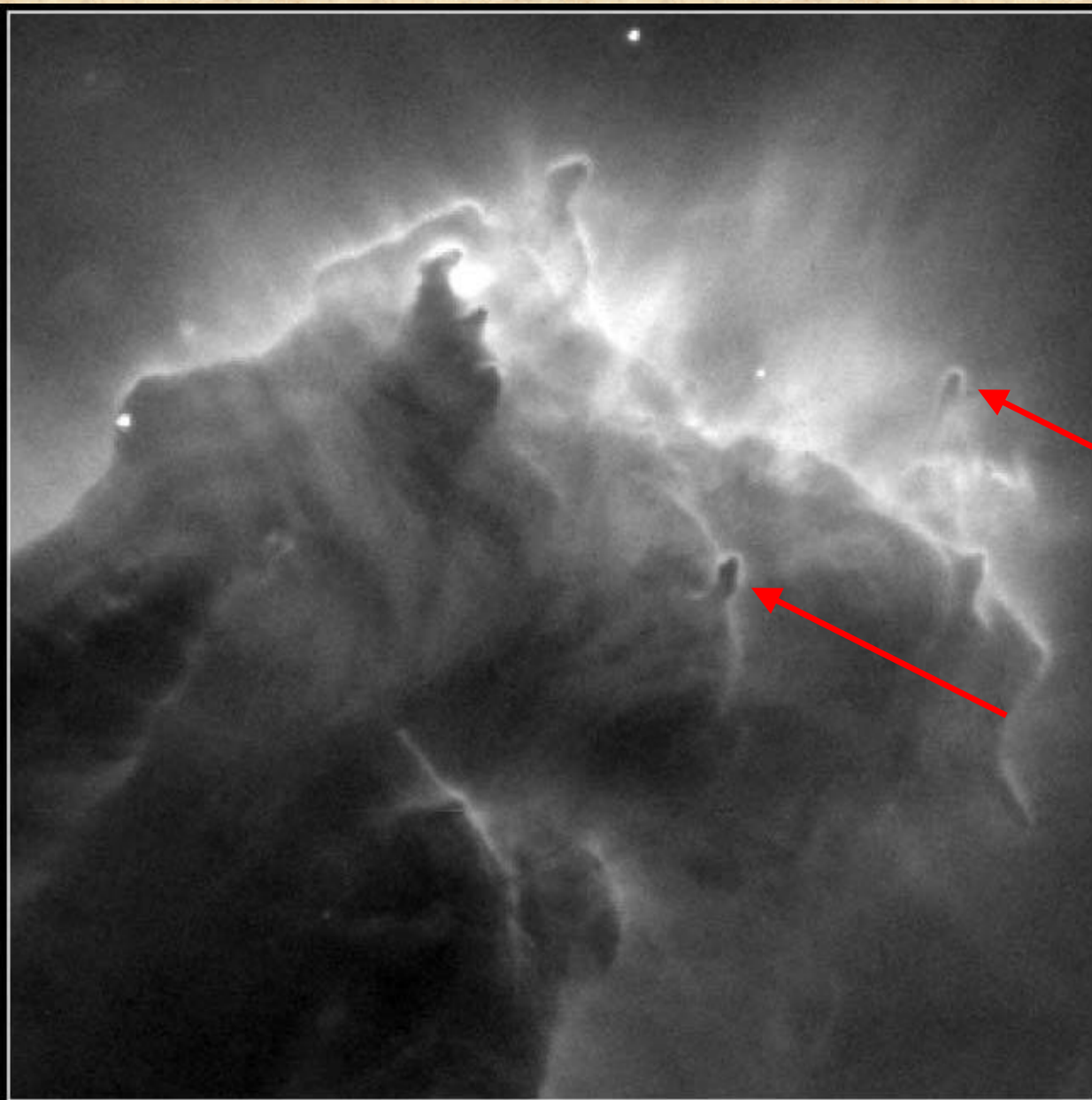
PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

FIM

Estrelas: da juventude à meia-idade

- Ser jovem é...





Evaporating Globules · M16

HST · WFPC2

PRC95-44c · ST ScI OPO · November 2, 1995

J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

Exemplos de estrelas na pré-sequência principal

O Sol na sua juventude

T Tauri

1-2 M_{\odot}

tipo espectral F a M
variabilidade

Ae/Be de Herbig

~2-8 M_{\odot}

semelhantes às T T
mais quentes

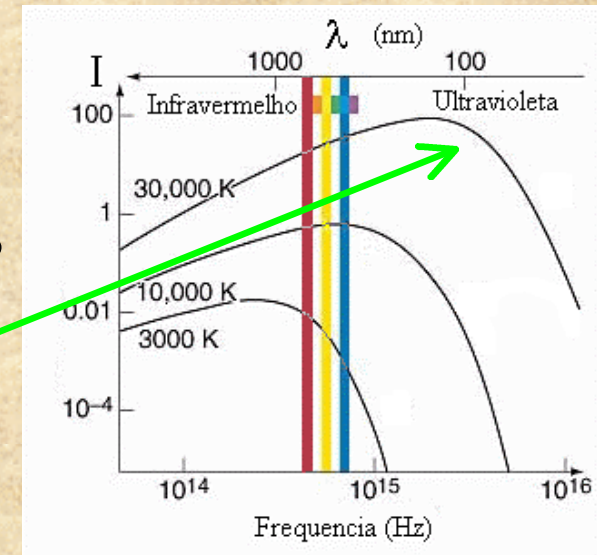
Temperatura superficial de ~7000 a ~3000 K.

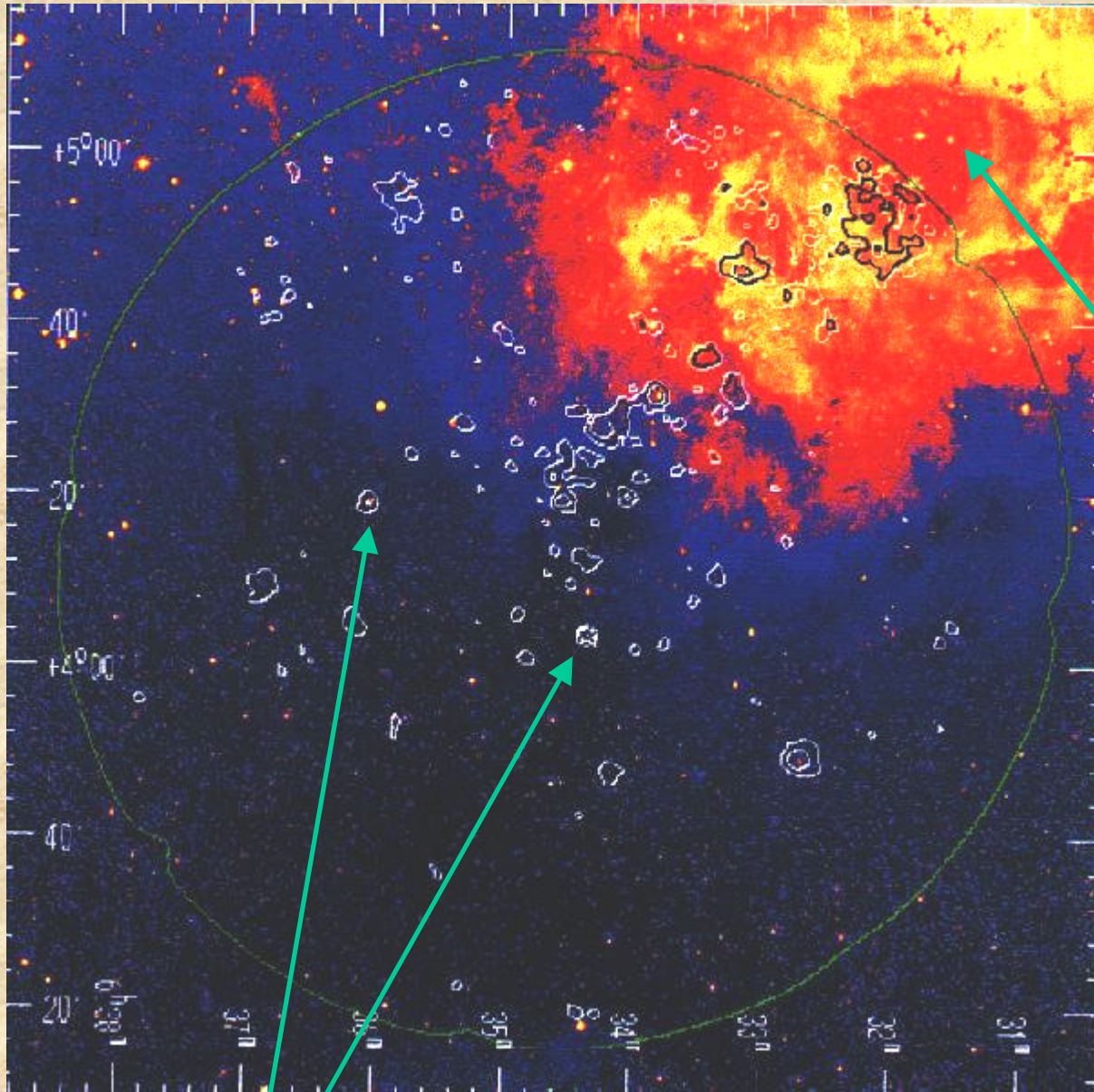


M45 © Royal Observatory Edinburgh/
Anglo-Australian Observatory
Photo from UK Schmidt Plates by David Malin

Associações OB

- As estrelas muito massivas não passam pela pré-seqüência principal.
- Tipo O e B são as mais quentes luminosas; com forte emissão ultra-violeta.
- Grupos destas ★s formam as chamadas Associações OB.






Associação OB
(Nebulosa
Rosette)

Fontes de raios-X (possivelmente estrelas do tipo T Tauri)

Seqüência Principal

No caso de estrelas de alta massa:

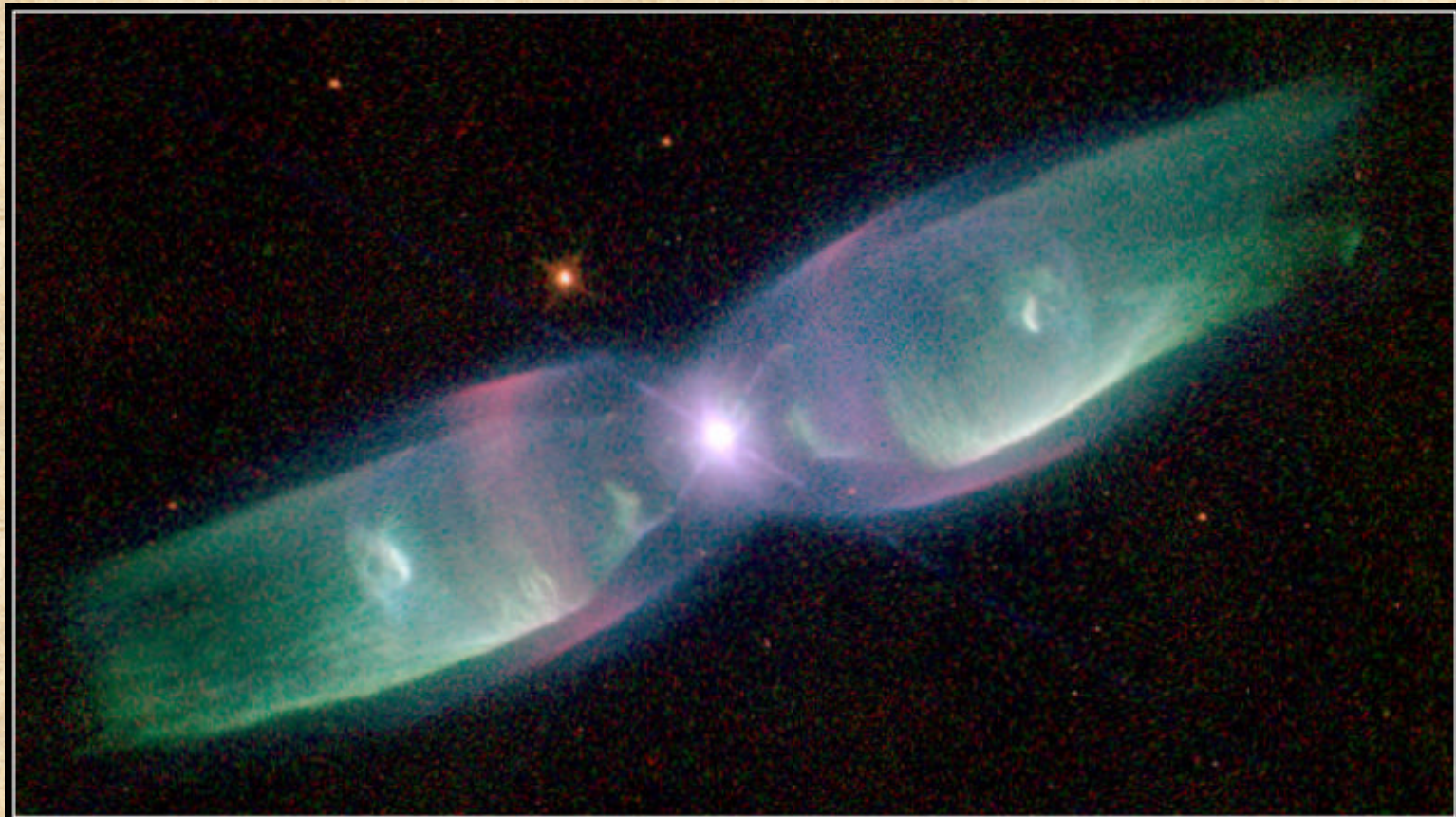
- Temperatura interior aumenta rapidamente.
- Alta luminosidade superficial
- Consumo de “combustível” com maior eficiência.



Menor tempo de vida

The Helix Planetary Nebula (NGC7293)





Planetary Nebula M2-9
PRC97-38a • ST Scl OPO • December 17, 1997
B. Balick (University of Washington) and NASA

HST • WFPC2