Astronomija i astrofizika II

EVOLUCIJA ZVIJEZDA NA GLAVNOM NIZU I NAKON GLAVNOG NIZA

EVOLUCIJA ZVIJEZDA

EVOLUCIJA NA GLAVNOM NIZU

- Posljedica nuklearnih reakcija u središtu zvijezde:

$$4\,{}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + 2e^{+} + 2\nu_e + \gamma$$

Evolucija zvijezde: posljedica promjene kemijskog sastava uslijed nuklearnih reakcija i djelovanja gravitacijske sile

L = const. $\Rightarrow$ konstantni izvor energije:

1. gravitacijska potencijalna energije:
   - vremenska skala slobodnog pada

$$t_{ff} = \left(\frac{3\pi}{32}\frac{1}{G\rho_0}\right)^2$$

   - Kelvin-Helmholtzova vremenska skala

$$t_{KH} = \frac{\Delta E_G}{L} = \frac{3}{10}\frac{GM^2}{RL}$$

EVOLUCIJA ZVIJEZDA

L = const. $\Rightarrow$ konstantni izvor energije:

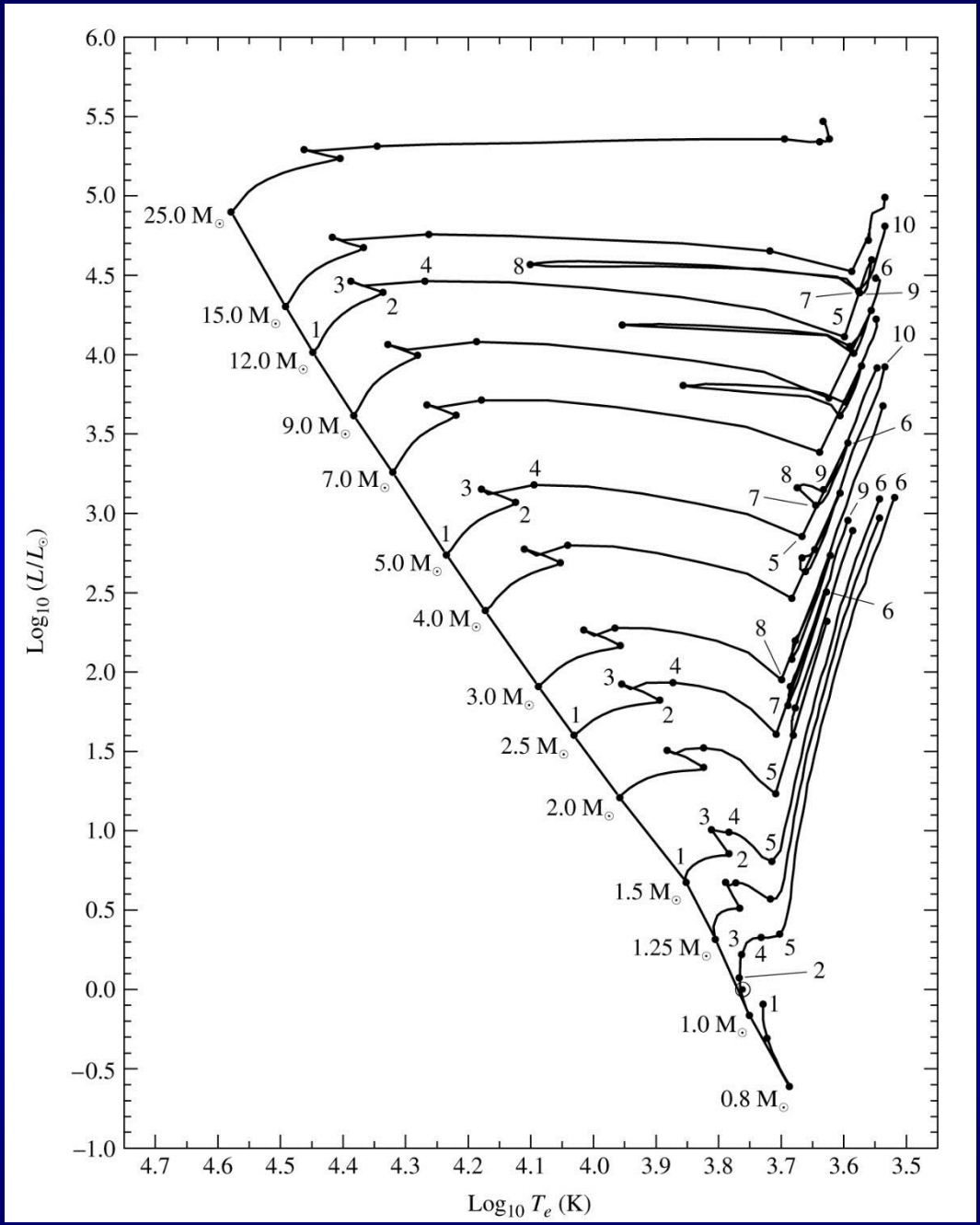
2. nuklearna energija:

$$t_{nuc} = \frac{E_{nuc}}{L} \approx \frac{p \cdot 0.007 \cdot Mc^2}{L}$$

SUNCE: $t_{KH} \sim 10^7$ god

$t_{nuc} \sim 10^{10}$ god

- Većinu vremena zvijezda boravi na glavnom nizu: 80%-90% Sunčeve okoline su zvijezde glavnog niza
- Kasnije faze evolucije traju **<u>puno kraće</u>**



Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson

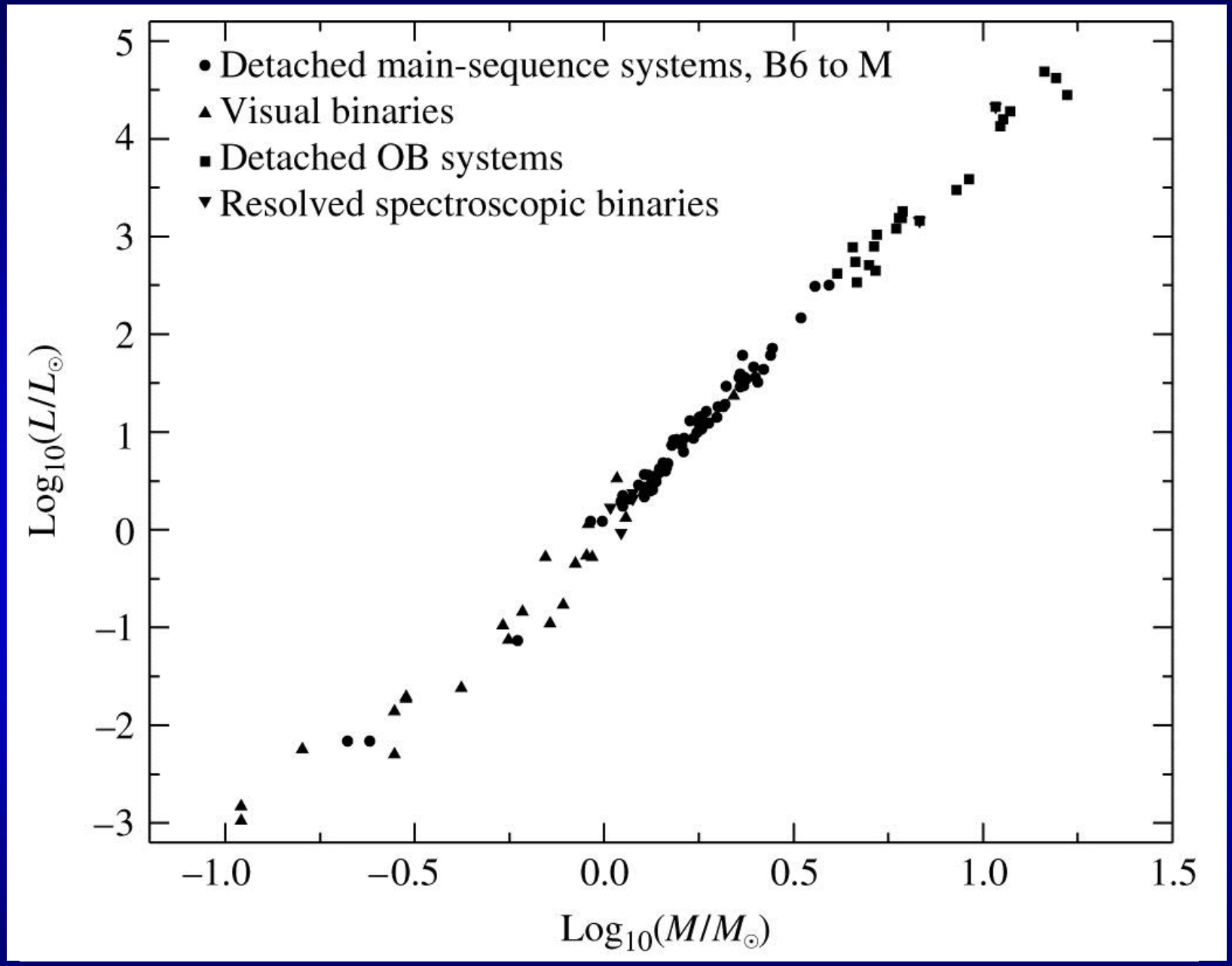
Initial Mass ($M_\odot$)	1 6	2 7	3 8	4 9	5 10
25	0 6.51783	6.33044 7.04971	6.40774 7.0591	6.41337	6.43767
15	0 11.6135	11.4099 11.6991	11.5842 12.7554	11.5986	11.6118
12	0 16.1150	15.7149 16.4230	16.0176 16.7120	16.0337 17.5847	16.0555 17.6749
9	0 26.5019	25.9376 27.6446	26.3886 28.1330	26.4198 28.9618	26.4580 29.2294
7	0 43.4304	42.4607 45.3175	43.1880 46.1810	43.2291 47.9727	43.3388 48.3916
5	0 95.2108	92.9357 99.3835	94.4591 100.888	94.5735 107.208	94.9218 108.454
4	0 166.362	162.043 172.38	164.734 185.435	164.916 192.198	165.701 194.284
3	0 357.310	346.240 366.880	352.503 420.502	352.792 440.536	355.018
2.5	0 595.476	574.337 607.356	584.916 710.235	586.165 757.056	589.786
2	0 1148.10	1094.08 1160.96	1115.94 1379.94	1117.74 1411.25	1129.12
1.5	0 2910.76	2632.52	2690.39	2699.52	2756.73
1.25	0 5588.92	4703.20	4910.11	4933.83	5114.83
1	0 12269.8	7048.40	9844.57	11386.0	11635.8
0.8	0	18828.9	25027.9		

Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson

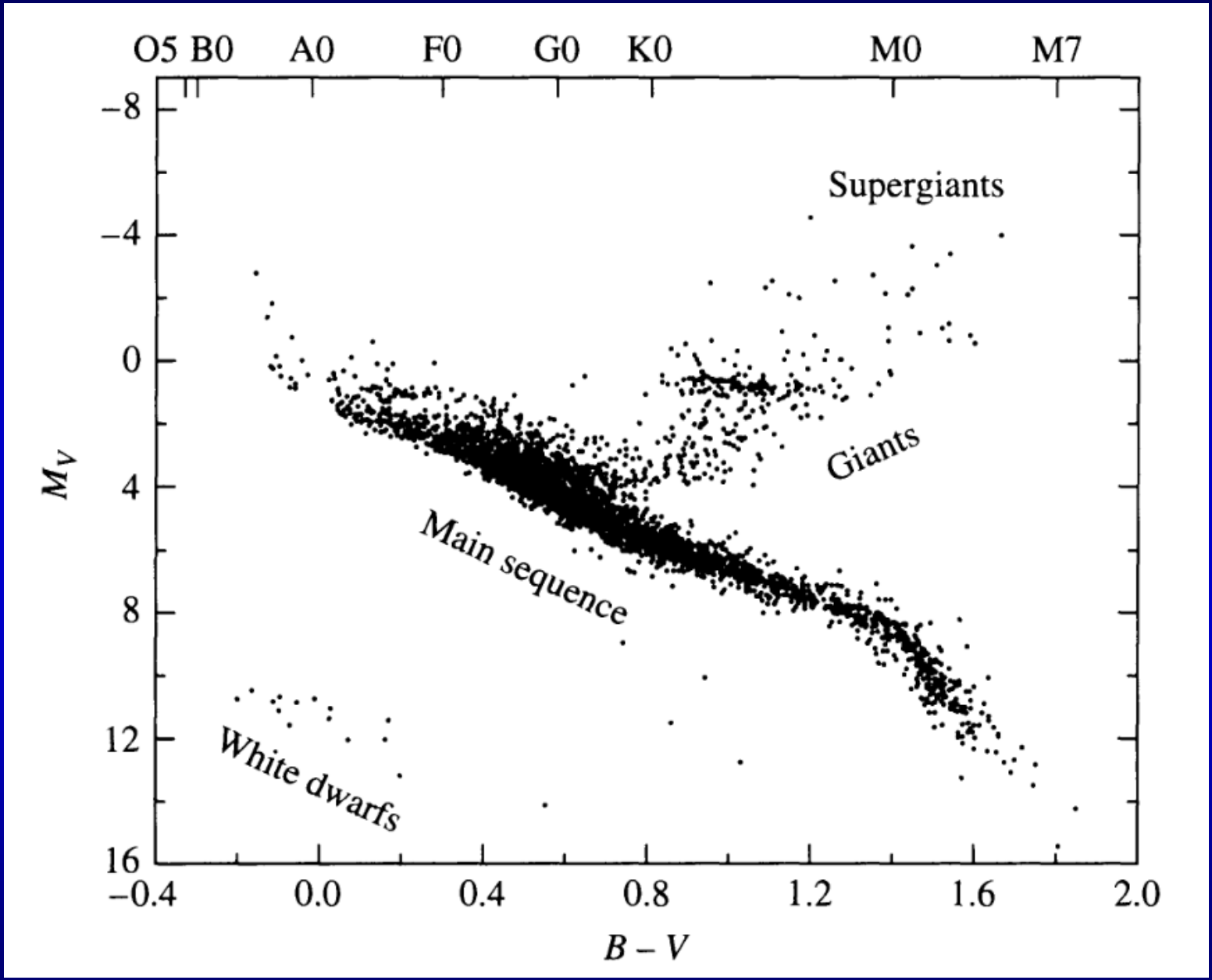
EVOLUCIJA ZVIJEZDA

ŠIRINA GLAVNOG NIZA i RELACIJE LUMINOZITET-MASA:

- Kemijski sastav, različita faza na glavnom nizu



Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson
(Data from Popper, 1980, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 18, 115)



Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson (European Space Agency)

EVOLUCIJA ZVIJEZDA

ZERO AGE MAIN SEQUENCE (ZAMS):

RAZLIKE: $M > 1.2\ M_{Sun} \Rightarrow$ konvektivna središta
CNO ciklus

$0.3\ M_{Sun} < M < 1.2\ M_{Sun} \Rightarrow$ radijativna središta
pp lanac

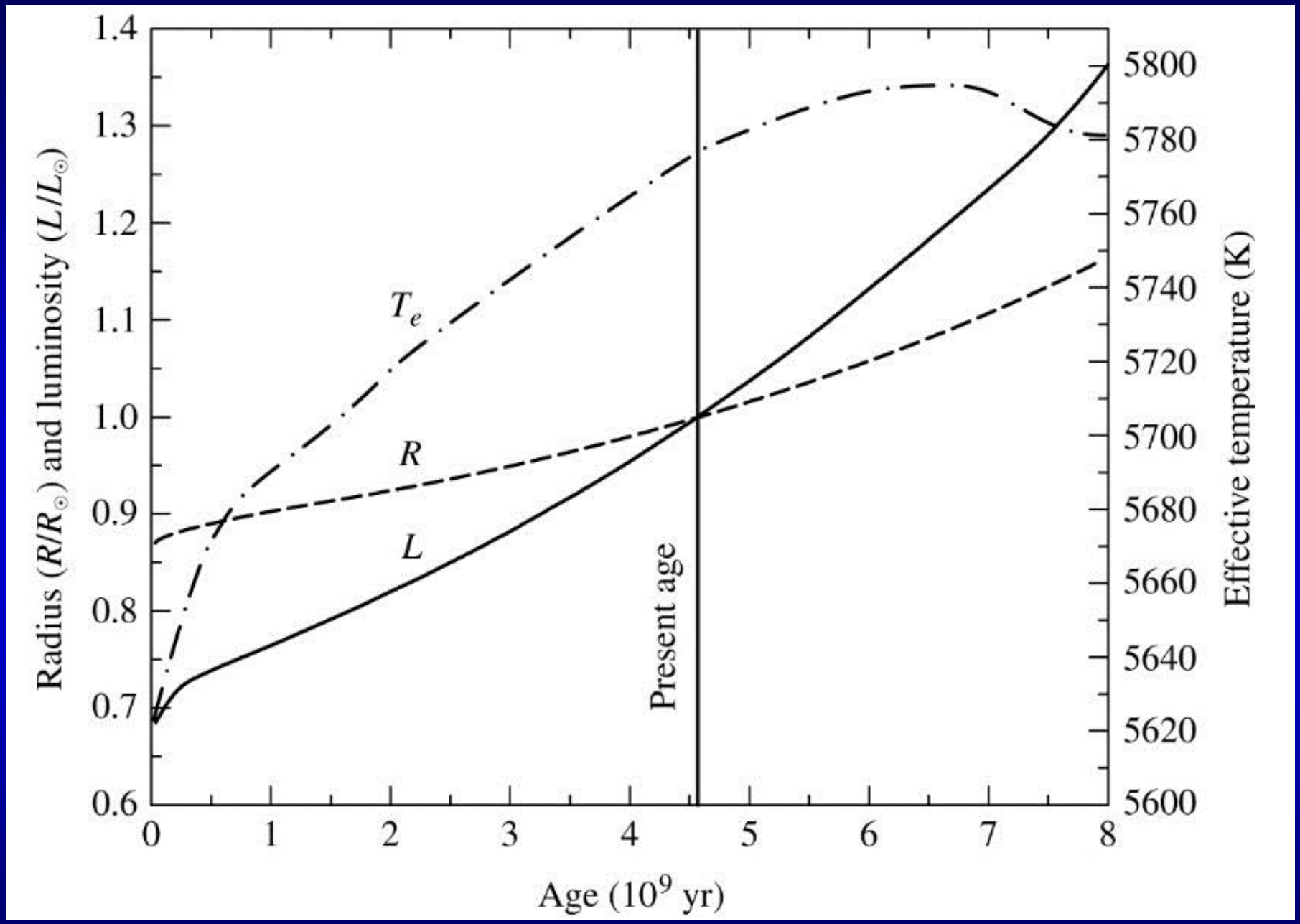
$M < 0.3\ M_{Sun} \Rightarrow$ konvektivna središta

SUNCE

ZAMS: 4.57 milijarde godina

- Porast luminoziteta, polumjera, temperature uslijed povećanja srednje molekulske mase μ u središtu pri fuziji vodika u helij:

$$\frac{1}{\mu_i} \simeq 2X + \frac{3}{4}Y + \left\langle \frac{1+Z}{A} \right\rangle_i Z$$



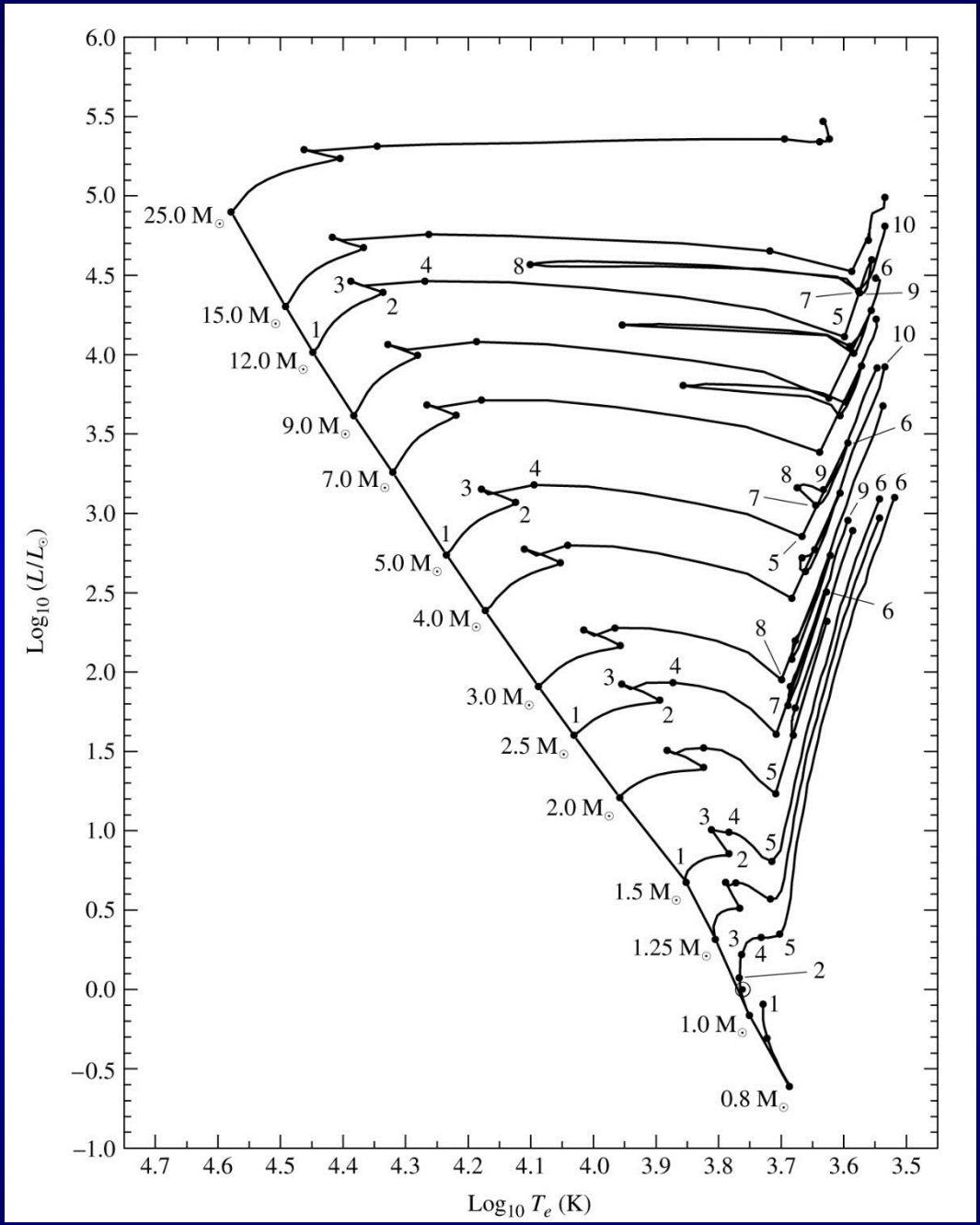
Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson
(Data from Bahcall et al. 2001, *Ap.J.*, 555, 990)

EVOLUCIJA ZVIJEZDA

Tlak idealnog plina: $P_g = \frac{\rho k T}{\mu m_H}$

μ raste $\Rightarrow$ ρ, T raste kako bi tlak ostao konstantan $\Rightarrow$
KOMPRESIJA SREDIŠTA

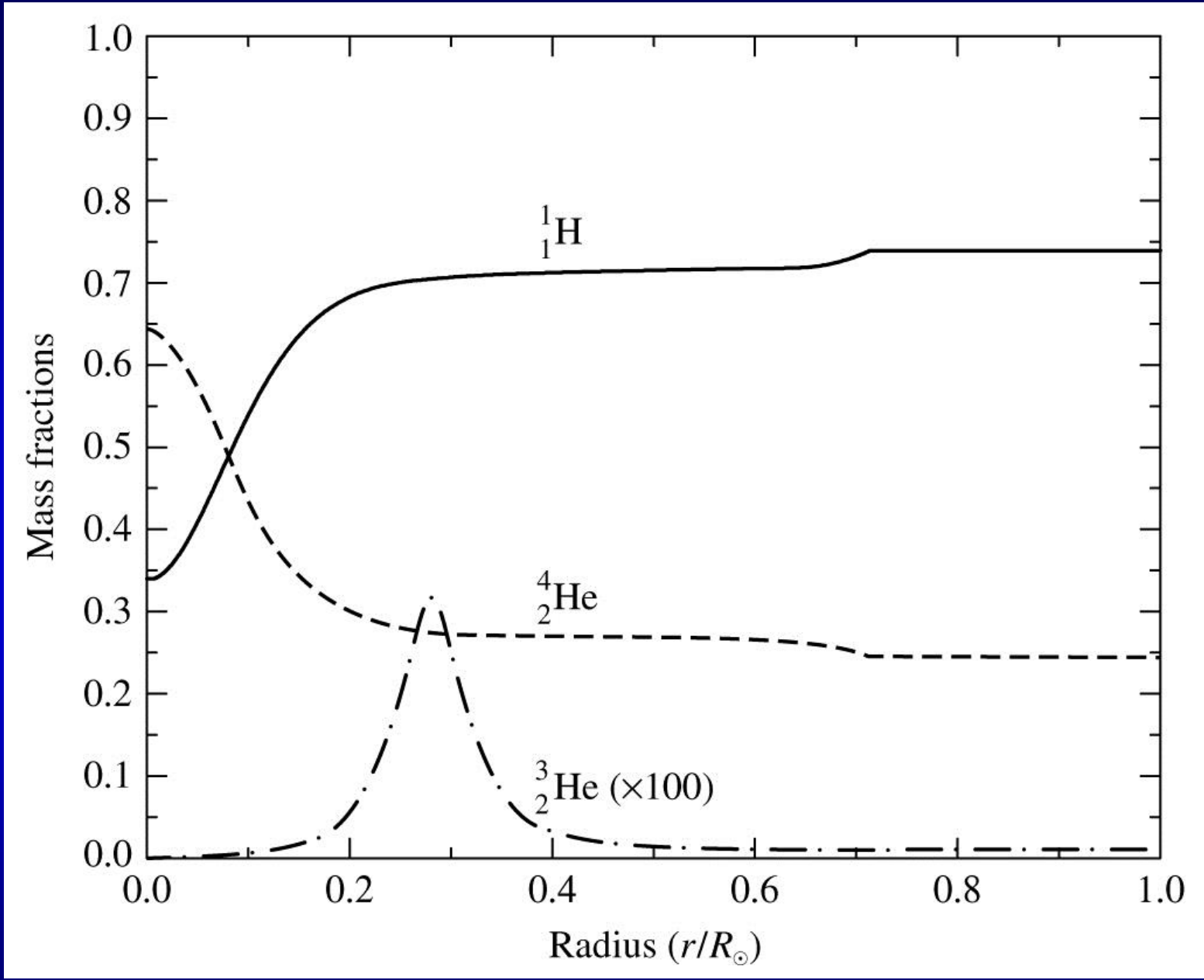
Kompresija središta $\Rightarrow$ otpuštanje grav. Potencijalne energije: ½ zračenjem, ½ povećanje termalne energije i temperature $\Rightarrow$ T raste $\Rightarrow$ povećanje zone nuklearnih reakcija $\Rightarrow$ $\epsilon \sim \rho X^2 T_6^4$ $\Rightarrow$ ϵ raste $\Rightarrow$ luminozitet, radijus i efektivna temperatura rastu



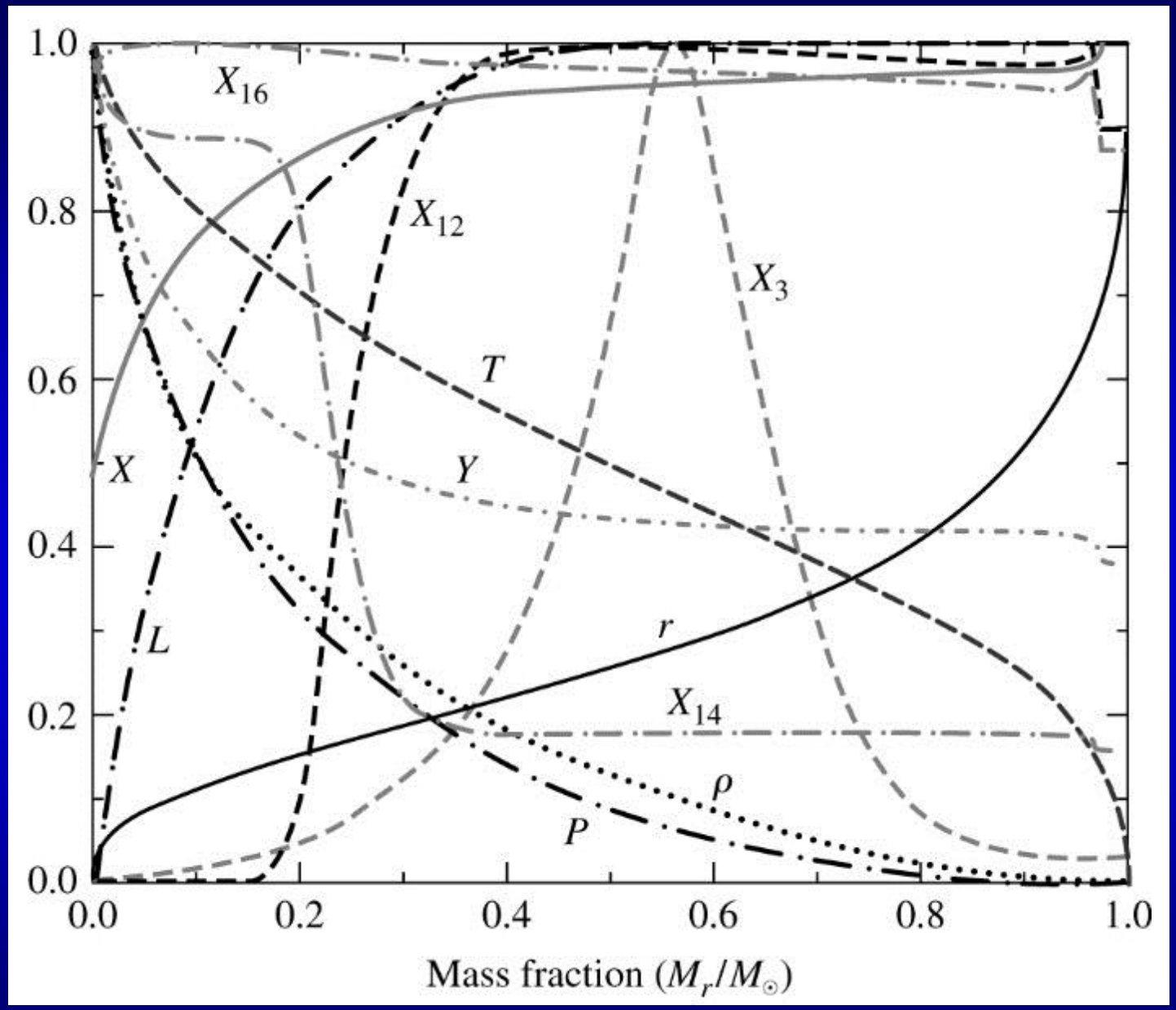
Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson

Initial Mass ($M_\odot$)	1 6	2 7	3 8	4 9	5 10
25	0 6.51783	6.33044 7.04971	6.40774 7.0591	6.41337	6.43767
15	0 11.6135	11.4099 11.6991	11.5842 12.7554	11.5986	11.6118
12	0 16.1150	15.7149 16.4230	16.0176 16.7120	16.0337 17.5847	16.0555 17.6749
9	0 26.5019	25.9376 27.6446	26.3886 28.1330	26.4198 28.9618	26.4580 29.2294
7	0 43.4304	42.4607 45.3175	43.1880 46.1810	43.2291 47.9727	43.3388 48.3916
5	0 95.2108	92.9357 99.3835	94.4591 100.888	94.5735 107.208	94.9218 108.454
4	0 166.362	162.043 172.38	164.734 185.435	164.916 192.198	165.701 194.284
3	0 357.310	346.240 366.880	352.503 420.502	352.792 440.536	355.018
2.5	0 595.476	574.337 607.356	584.916 710.235	586.165 757.056	589.786
2	0 1148.10	1094.08 1160.96	1115.94 1379.94	1117.74 1411.25	1129.12
1.5	0 2910.76	2632.52	2690.39	2699.52	2756.73
1.25	0 5588.92	4703.20	4910.11	4933.83	5114.83
1	0 12269.8	7048.40	9844.57	11386.0	11635.8
0.8	0	18828.9	25027.9		

Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson



Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson
(Data from Bahcall et al. 2001, *Ap.J.*, 555, 990)

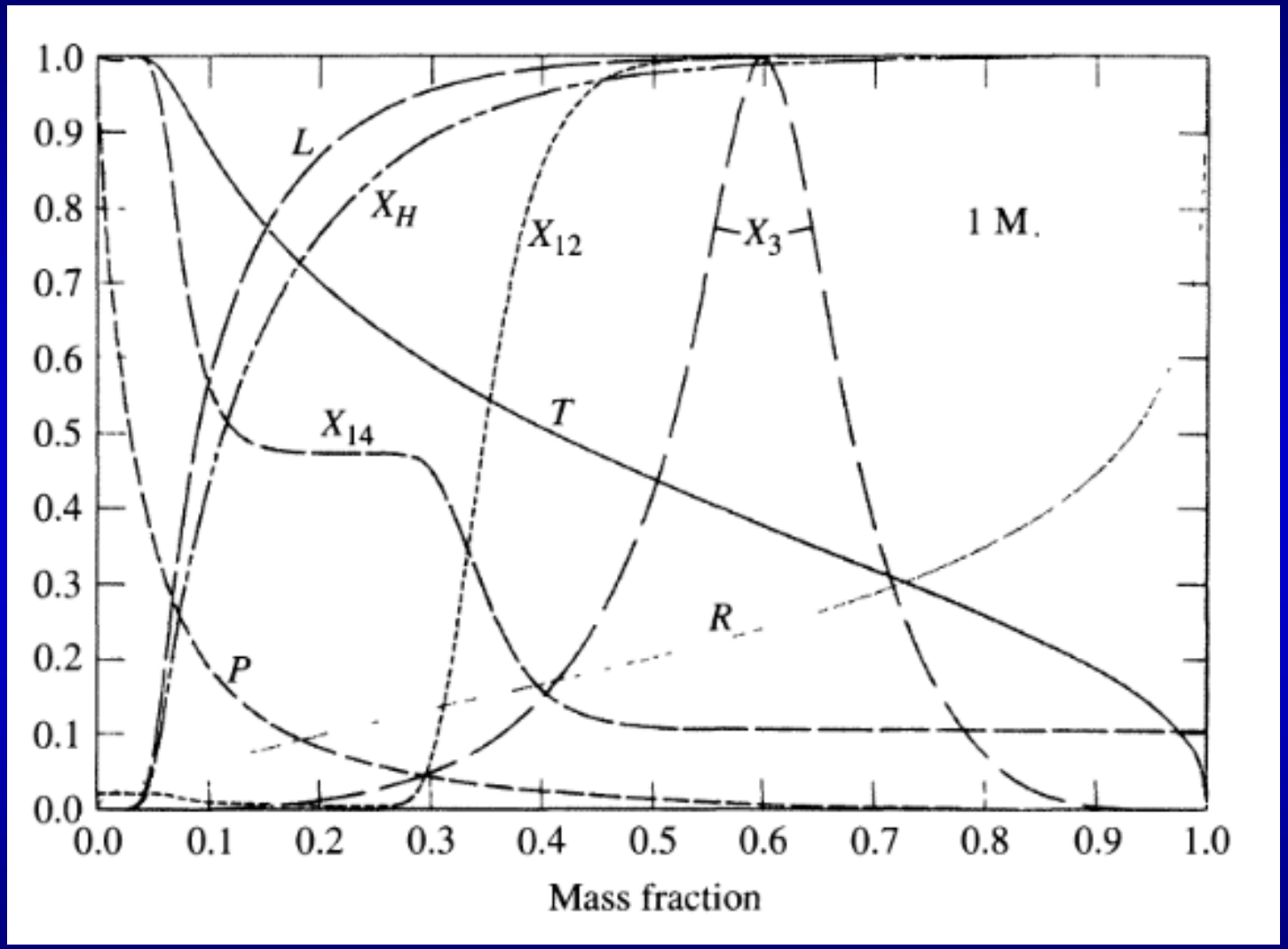


Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson
(Data from Bahcall et al. 2001, *Ap.J.*, 555, 990)

EVOLUCIJA ZVIJEZDA

- Vodik nestaje u središtu: 9.8 milijardi godina nakon ZAMS $\Rightarrow$ točka 3

- Nestanak vodika u središtu $\Rightarrow$ prestanak nuklearnih reakcija
- Temperatura u središtu dovoljno visoka za popčetak nuklearnih reakcija u **DEBELOJ LJUSCI** oko **MALOG SREDIŠTA** od HELIJA



Iben, 1967, *Ap.J.*, 47, 624)

EVOLUCIJA ZVIJEZDA

L ≈ 0 unutar 3% mase zvijezde
Temperatura u središtu je **KONSTANTNA** ⇒
<u>IZOTERMNA HELIJEVA JEZGRA</u>

Temperaturni gradijent za radijativni prijenos:

$$\frac{dP_{rad}}{dr} = -\frac{\bar{\kappa}\rho}{c} F_{rad}$$

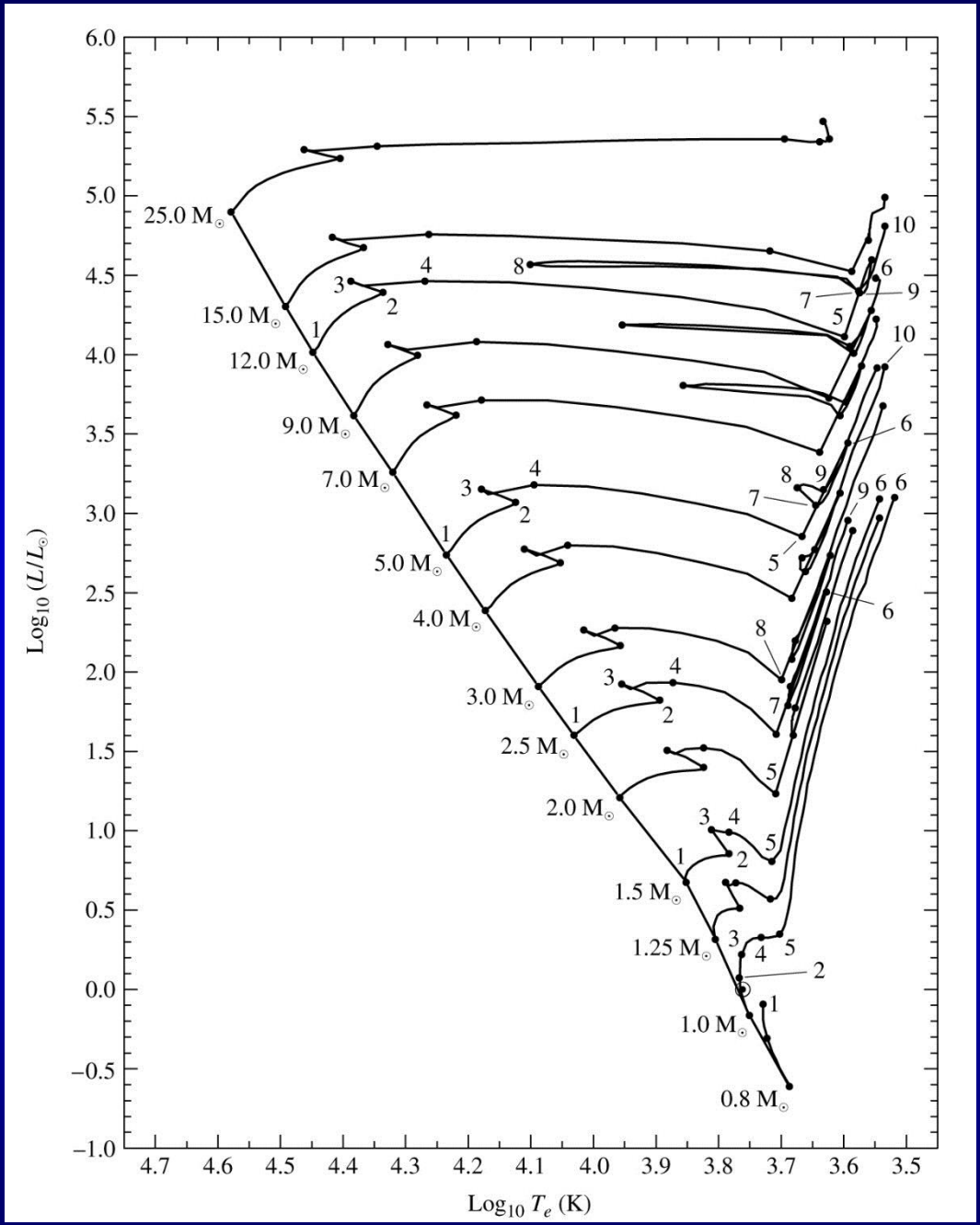
$$P_{rad} = \frac{1}{3} a T^4 \Rightarrow \frac{dP_{rad}}{dr} = \frac{4}{3} a T^3 \frac{dT}{dr}$$

$$\boldsymbol{\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{4ac} \frac{\bar{\kappa}\rho}{T^3} \frac{L_r}{4\pi r^2}}$$

Ako je $L_r \simeq 0 \Rightarrow \frac{dT}{dr} \simeq 0 \Rightarrow$ **JEZGRA JE IZOTERMNA**

EVOLUCIJA ZVIJEZDA

- Gustoća mora rasti u izotermnoj jezgri da zadrži hidrostatsku ravnotežu!
- Luminozitet u debeloj ljusci je veći nego u fazi gorenja vodika u središtu $\Rightarrow$ luminozitet raste, TOČKA 3
- Dio energije se troši na sporu ekspanziju ovojnice $\Rightarrow$ efektivna temperatura pada $\Rightarrow$ staza se pomiče u desno
- Vodikova ljuska troši vodik $\Rightarrow$ izotermno helijevo središte raste



Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson

SCHONBERG-CHANDRASEKHAROVA GRANICA

- Faza rasta izotermne jezgre se zaustavlja kada masa jezgre postane prevelika da održi hidrostatsku ravnotežu

Najveći dio mase u izotermnoj helijevoj jezgri sposoban da održi ravnotežu:

$$\left(\frac{M_{ic}}{M}\right)_{SC} \cong 0.37\left(\frac{\mu_{env}}{\mu_{ic}}\right)^2$$

$\Rightarrow$ Posljedica virijalnog teorema

$$\left(\frac{M_{ic}}{M}\right)_{SC} = f(\mu_{env}, \mu_{ic})$$

$$\left(\frac{M_{ic}}{M}\right) > \left(\frac{M_{ic}}{M}\right)_{SC} \Rightarrow \textbf{KOLAPS JEZGRE}$$

- Kelvin-Helmholtzova vremenska skala
- Vrlo BRZI RAZVOJ $\Rightarrow$ točka 4

DEGENERIRANI ELEKTRONSKI PLIN

Masa izotermne jezgre može biti veća od SC granice ako postoji dodatan izvor tlaka ⇒ **ELEKTRONSKA DEGENERACIJA**

- Za dovoljno visoku gustoću plina ⇒ elektroni zauzimaju najniža moguća energetska stanja

Elektroni: fermioni ⇒ **Paulijev princip isključenja**

- Ne mogu se nalaziti u istom kvantnom stanju

KOMPLETNA DEGENERACIJA: tlak plina uzrokovan netermalnim gibanjem elektrona ⇒ **NEOVISNOST O TEMPERATURI**

DEGENERIRANI ELEKTRONSKI PLIN:

$$P_e = K\rho^{5/3}$$

DEGENERIRANI ELEKTRONSKI PLIN

Izotermna jezgra između 3 i 4 je djelomično degenerirana $\Rightarrow$ masa jezgre može postići veću vrijednost nego u stanju idealnog plina: 13% ukupne mase umjesto 8%

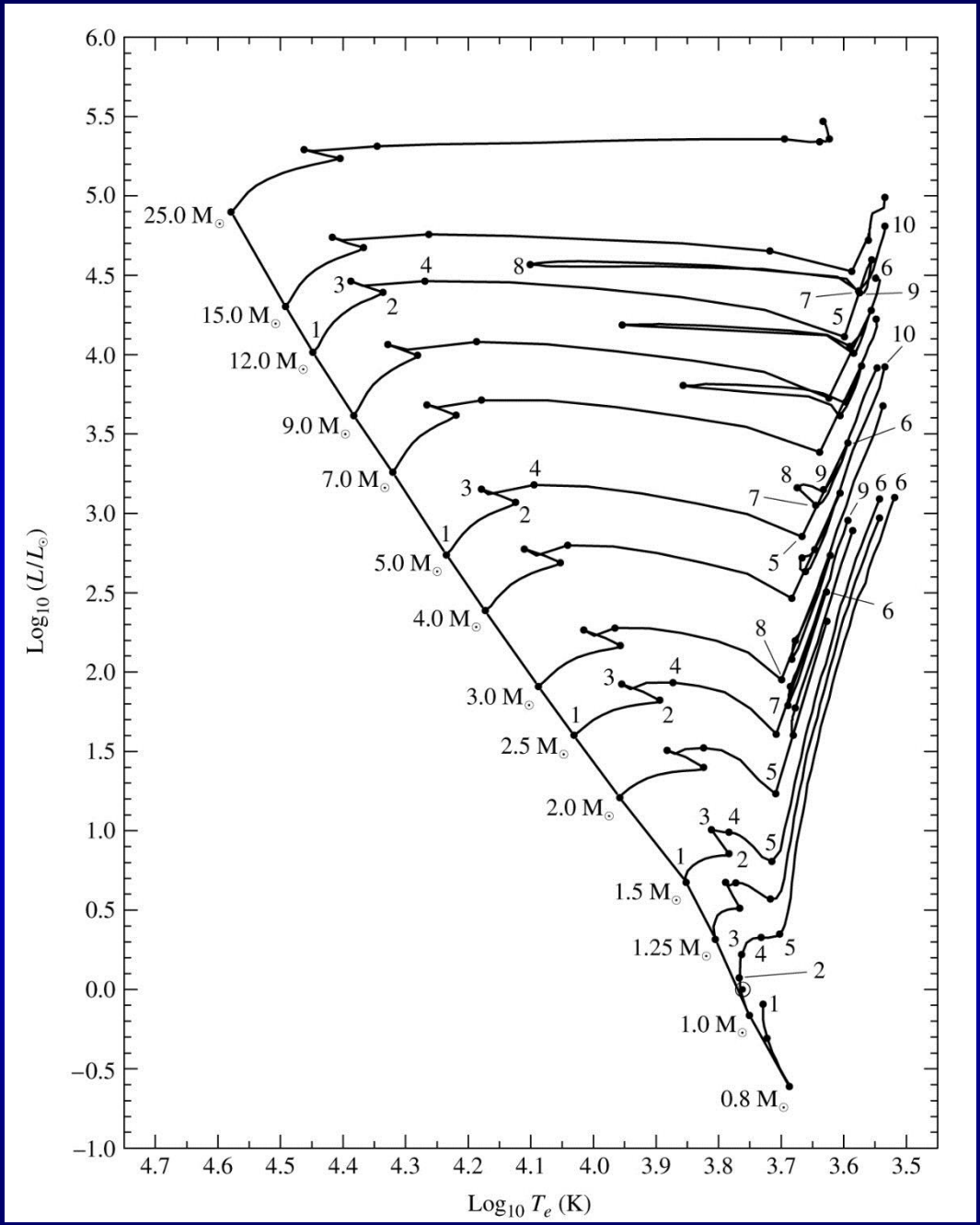
- Manje zvijezde pokazuju veću degeneraciju

EVOLUCIJA MASIVNIH ZVIJEZDA

- Slično kao i kod manje masivnih, samo postoji konvektivna jezgra $\rightarrow$ **HOMOGEN sastav** (vremenska skala konvekcija kraća od nuklearne)
- Konvektivna zona se smanjuje tijekom evolucije $\Rightarrow$ kod 10 M_{Sun} konvektivna zona nestaje prije nego što se iscrpi vodik

Točka 2: X=0.05 u jezgri za M = 5 M_{Sun} $\Rightarrow$ započinje KONTRAKCIJA $\Rightarrow$ oslobađa se grav. energija $\Rightarrow$ porast luminoziteta $\Rightarrow$ smanjuje se polumjer $\Rightarrow$ raste efektivna temperatura

$\Rightarrow$ **Kraj evolucije na glavnom nizu**



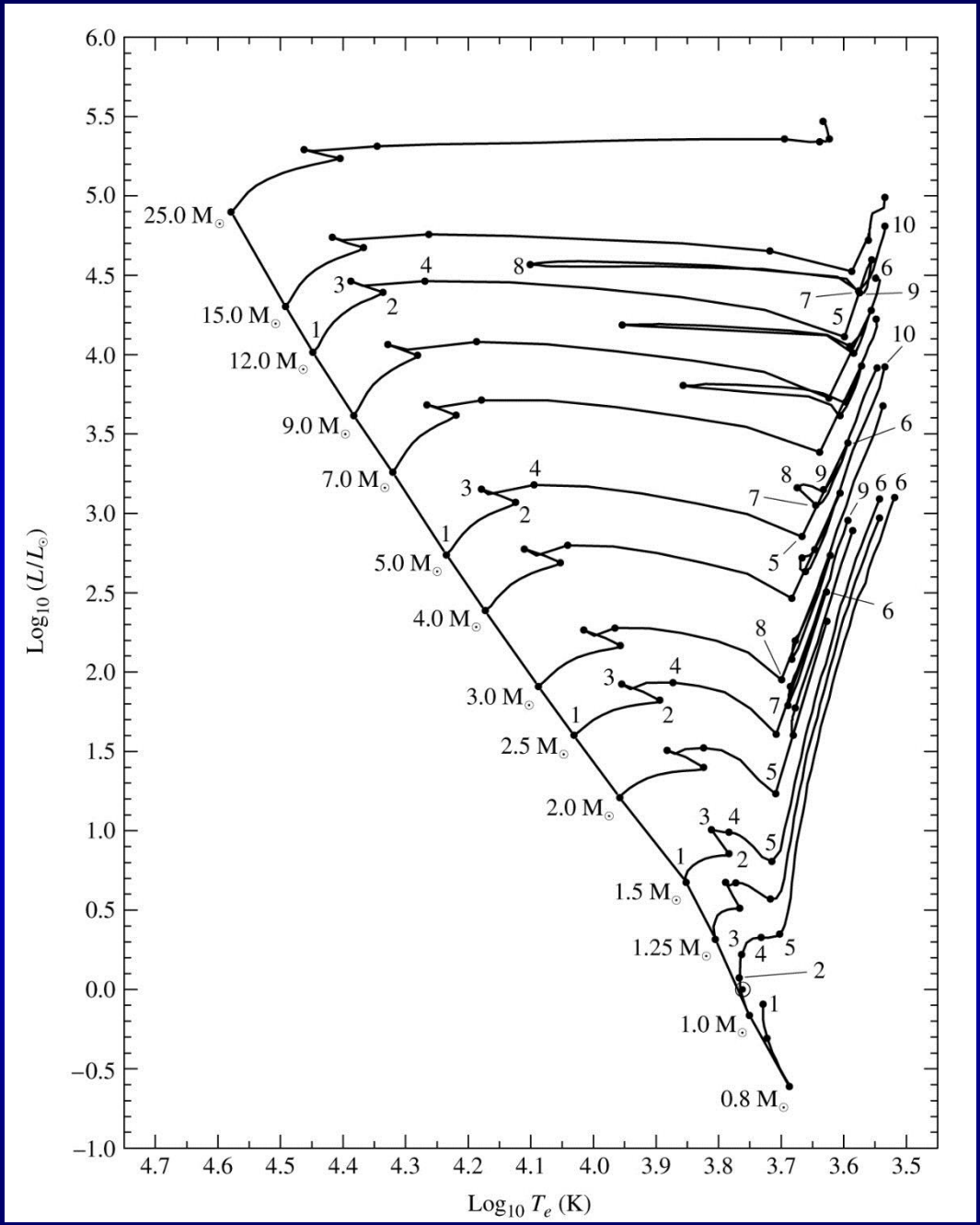
Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson

KASNE FAZE ZVJEZDANE EVOLUCIJE

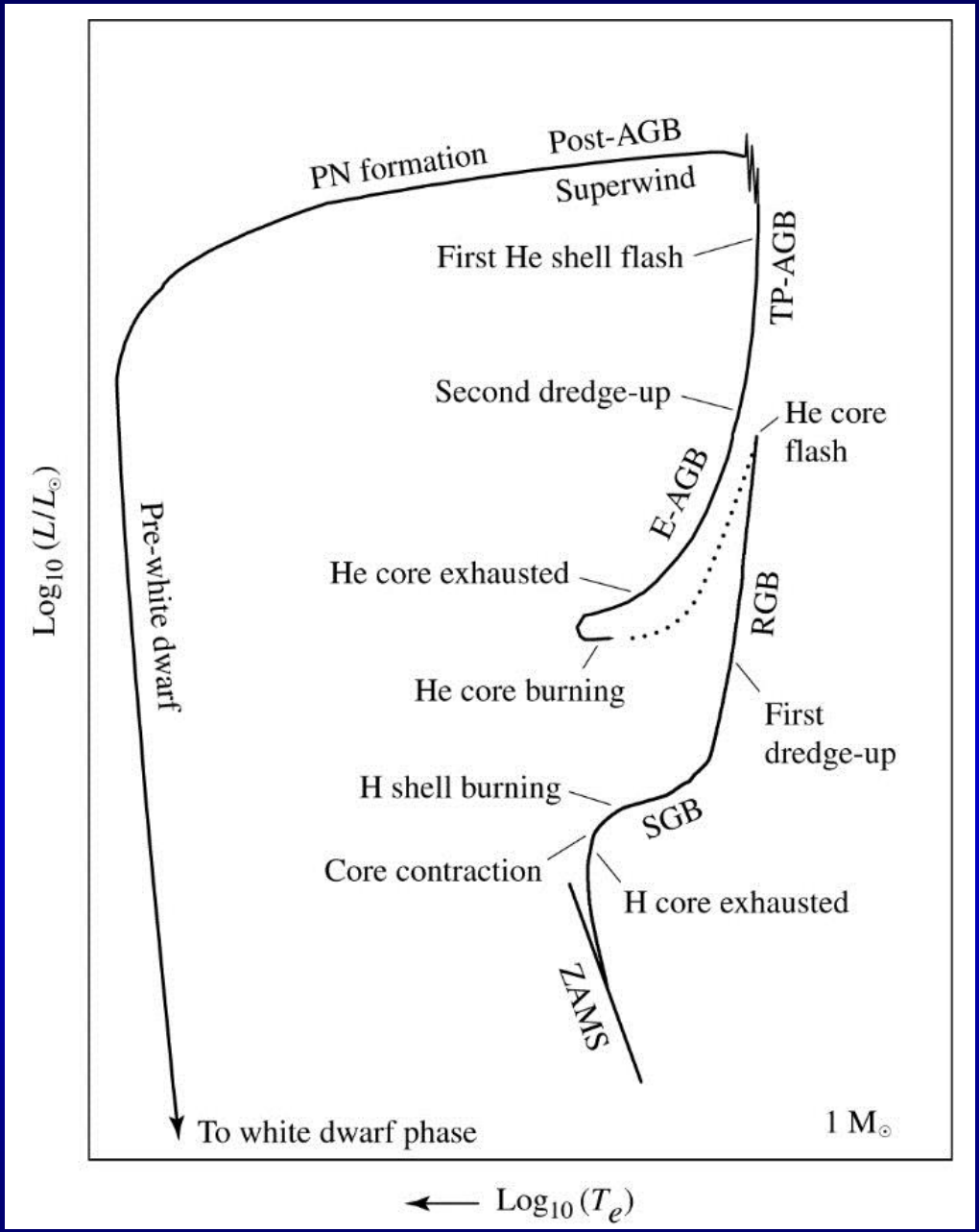
- Kraj faze glavnog niza $\Rightarrow$ složeni niz evolucijskih faza: nuklearno gorenje u središtu i u ljuskama $\Rightarrow$ gorenje u središtu i ljuskama se pali i gasi $\Rightarrow$ promjena strukture zvijezde: ekspanzija/kontrakcija središta/ljusaka, razvoj proširenih konvektivnih zona
- Značajni gubitak mase određuje konačnu sudbinu zvijezde

ZAVRŠETAK GLAVNOG NIZA: prestanak gorenja vodika u središtu (točka 3 za 1 M_{Sun}; točka 2 za 5 M_{Sun})

1 M_{Sun} : kontrakcija središta $\rightarrow$ povećanje temperature $\rightarrow$ vodik gori u debeloj ljusci $\rightarrow$ luminozitet raste $\rightarrow$ ekspanzija ovojnice $\rightarrow$ pad efektivne temperature



Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson



Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson

KASNE FAZE ZVJEZDANE EVOLUCIJE

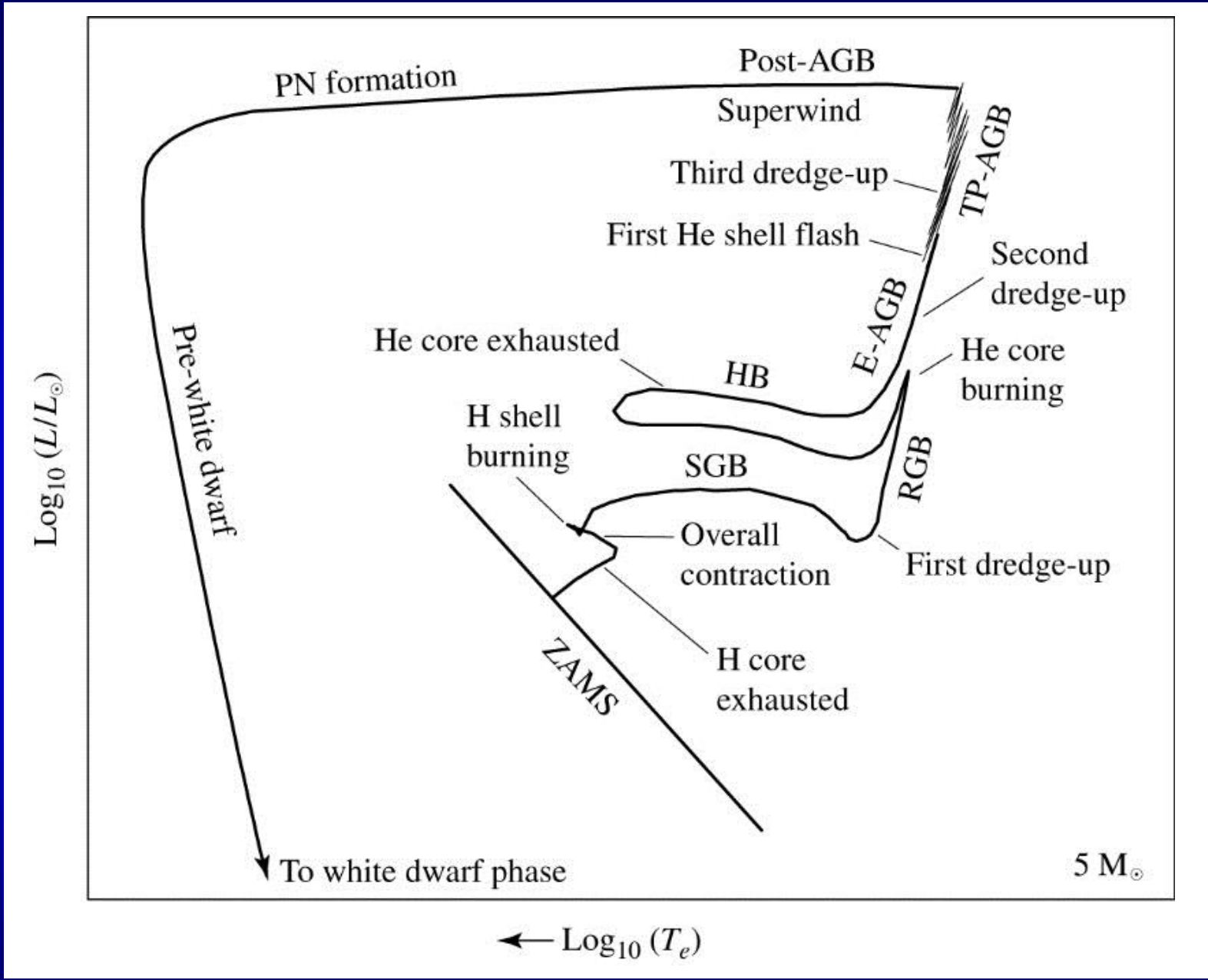
5 M_{Sun} : prije nego započne gorenje vodika u ljusci: cijela zvijezda brzo kontrahira $\rightarrow$ oslobađanje grav. energije $\rightarrow$ luminozitet raste $\rightarrow$ radijus pada (zbog kontrakcije) $\rightarrow$ efektivna temperatura raste

Točka 2 $\rightarrow$ 3

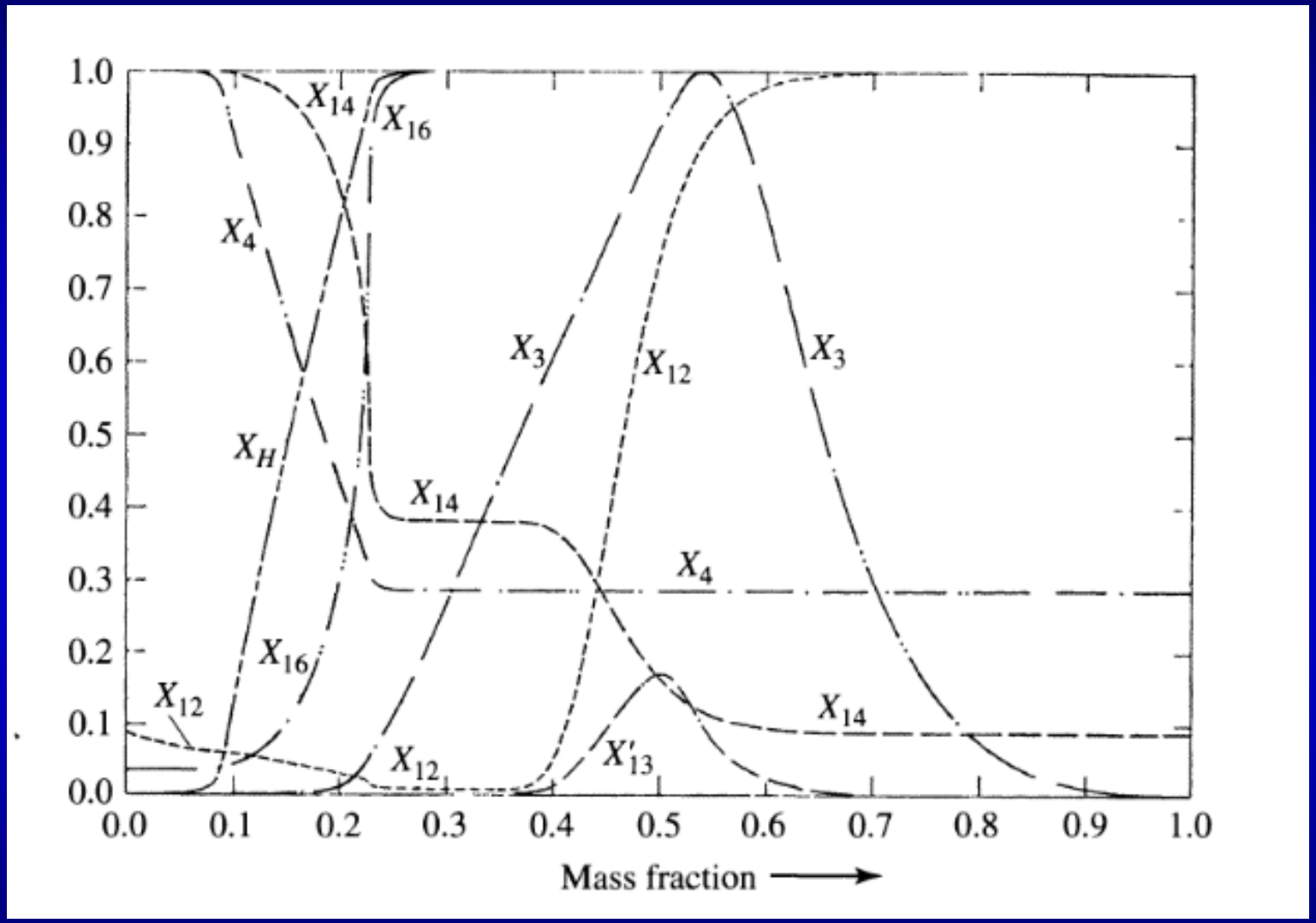
temperatura u ljusci postaje dovoljna za fuziju:

Točka 3

Kemijski sastav zvijezde



Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson

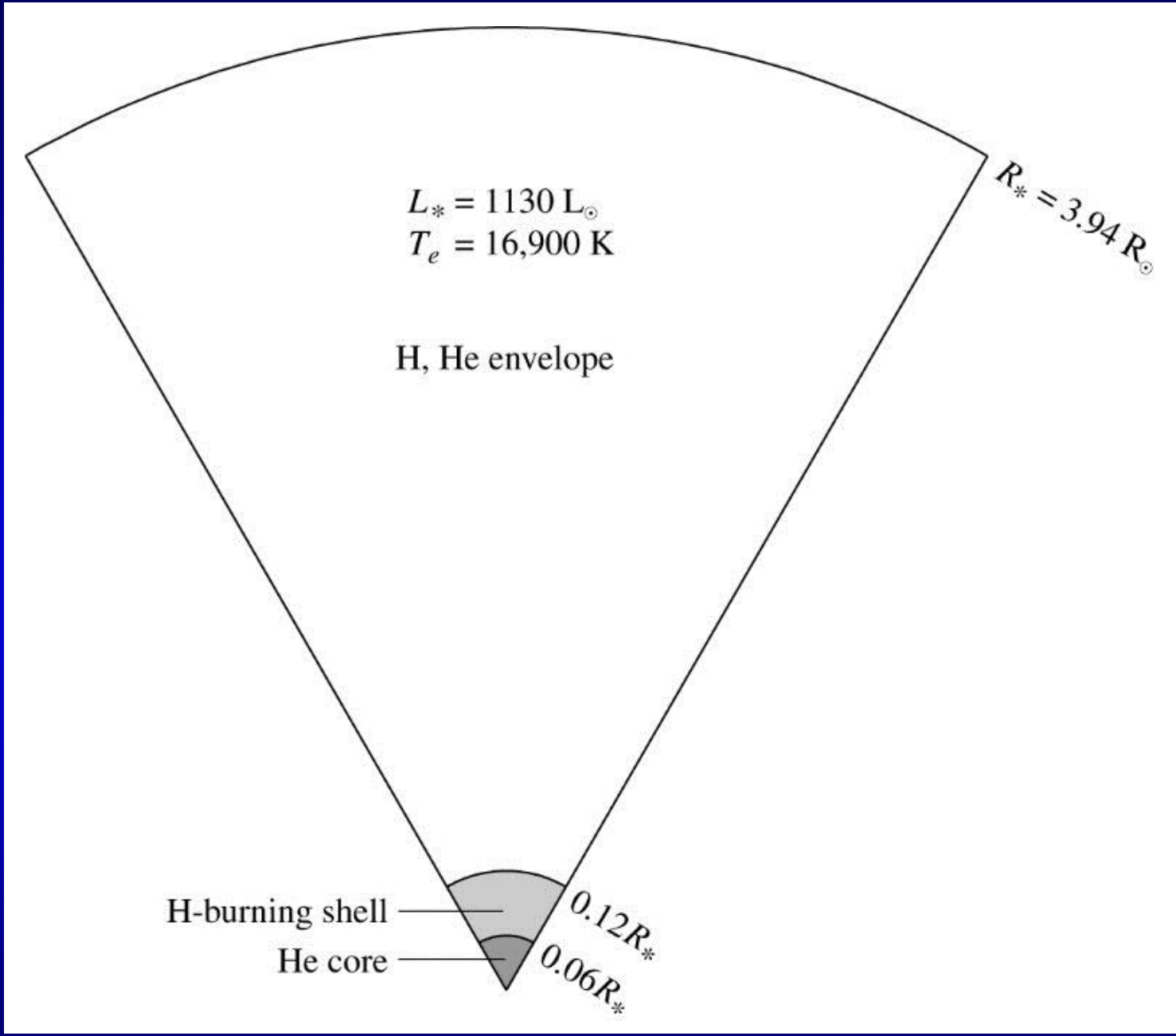


Iben, 1967, *Ap.J.*, 47, 624)

KASNE FAZE ZVJEZDANE EVOLUCIJE

5 M_{Sun} : kada temperatura postane dovoljna za fuziju (točka 3): brzo paljenje ljuske $\rightarrow$ ekspanzija ovojnice, apsorpcija dijela energije $\rightarrow$ luminozitet pada $\rightarrow$ efektivna temperatura pada

Kemijska struktura zvijezde



Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson
(Data from Iben, 1966, *Ap.J.*, 143, 483)

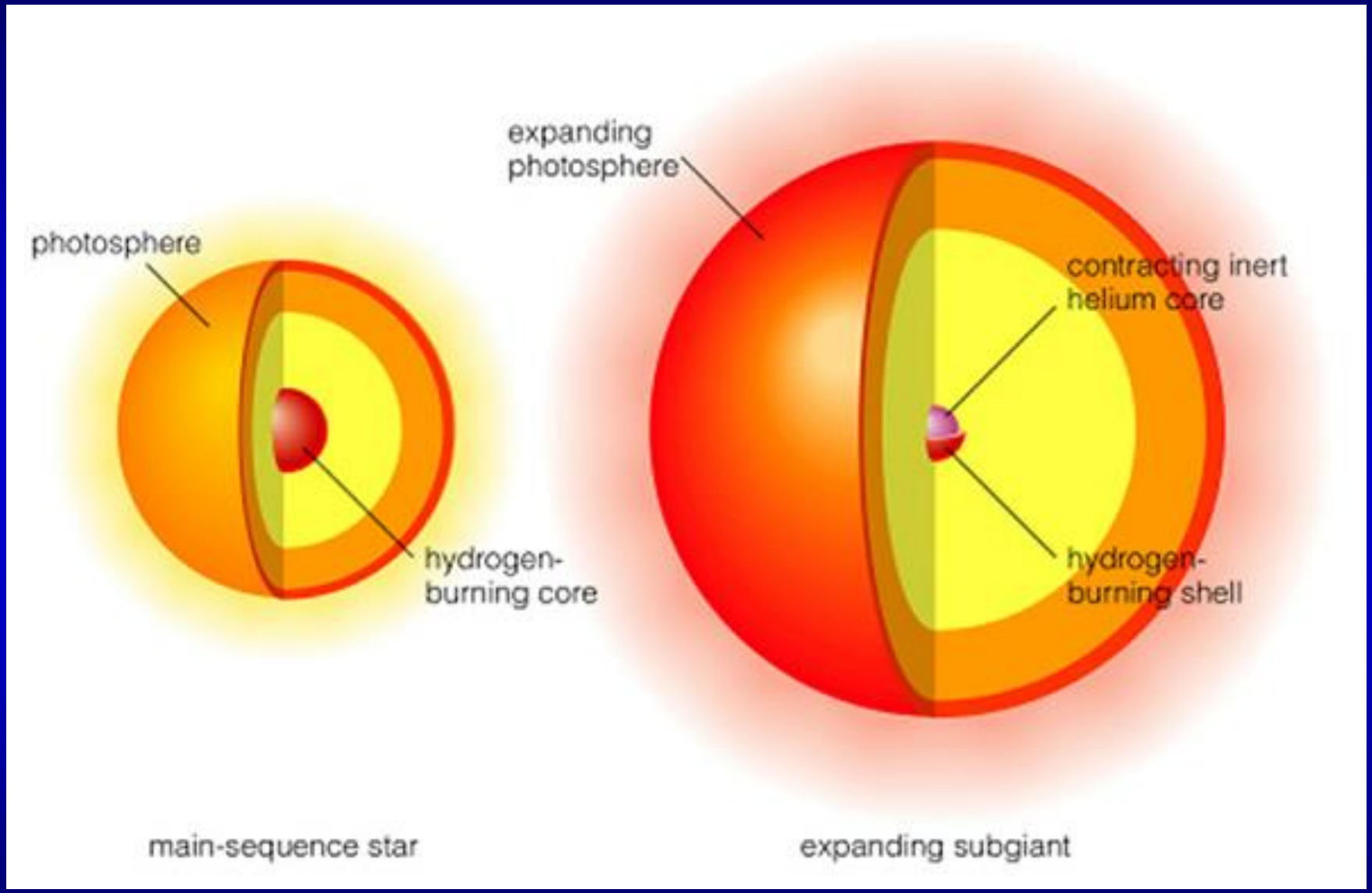
GRANA PODDIVOVA (SGB)
'subgiant branch'

- Masa izotermne helijeve jezgre raste do SC granice
- Točka 4: prelazak SC granice → nestaje ravnoteže → **NAGLI KOLAPS SREDIŠTA**
- Brza evolucija na Kelvin-Helmholtz vremenskoj skali

Kontrakcija središta → oslobađanje grav. pot. energije → ekspanzija ovojnice → efektivna temperatura pada → pomak u crveno u HR dijagramu →

GRANA PODDIVOVA (SGB)

Kontrakcija središta → temperatura i gustoća ljuske raste → brzina proizvodnje energije u ljusci raste → ekspanzija ovojnice koja apsorbira dio oslobođene energije



T. Harrison, 'Astronomy 110: Introduction to Astronomy'
(http://ganymede.nmsu.edu/tharriso/ast110/class18.html)

5 M_{Sun} : ekspandirajuća ovojnica apsorbira dovoljno energije oslobođene u ljusci da se smanji luminozitet (točka 5)

GRANA CRVENIH DIVOVA (RGB) 'red giant branch'

Ekspanzija ovojnice i pad efektivne temperature → fotosferski opacitet raste zbog H^- iona → nastanak **KONVEKTIVNE ZONE** u blizini površine → konvekcijska zona postaje duboka → visoka efikasnost prijenosa energije → **LUMINOZITET DRASTIČNO RASTE** → uspinjanje **GRANOM CRVENIH DIVOVA**

Duboka konvektivna zona: do zone nuklearnog gorenja

LITIJ: reagira pri niskim temperaturama: manjak litija u unutrašnjosti zvijezde (98% mase za 5 M_{Sun})

^3_2He: nuklearne reakcije obogaćuju unutrašnjost zvijezde

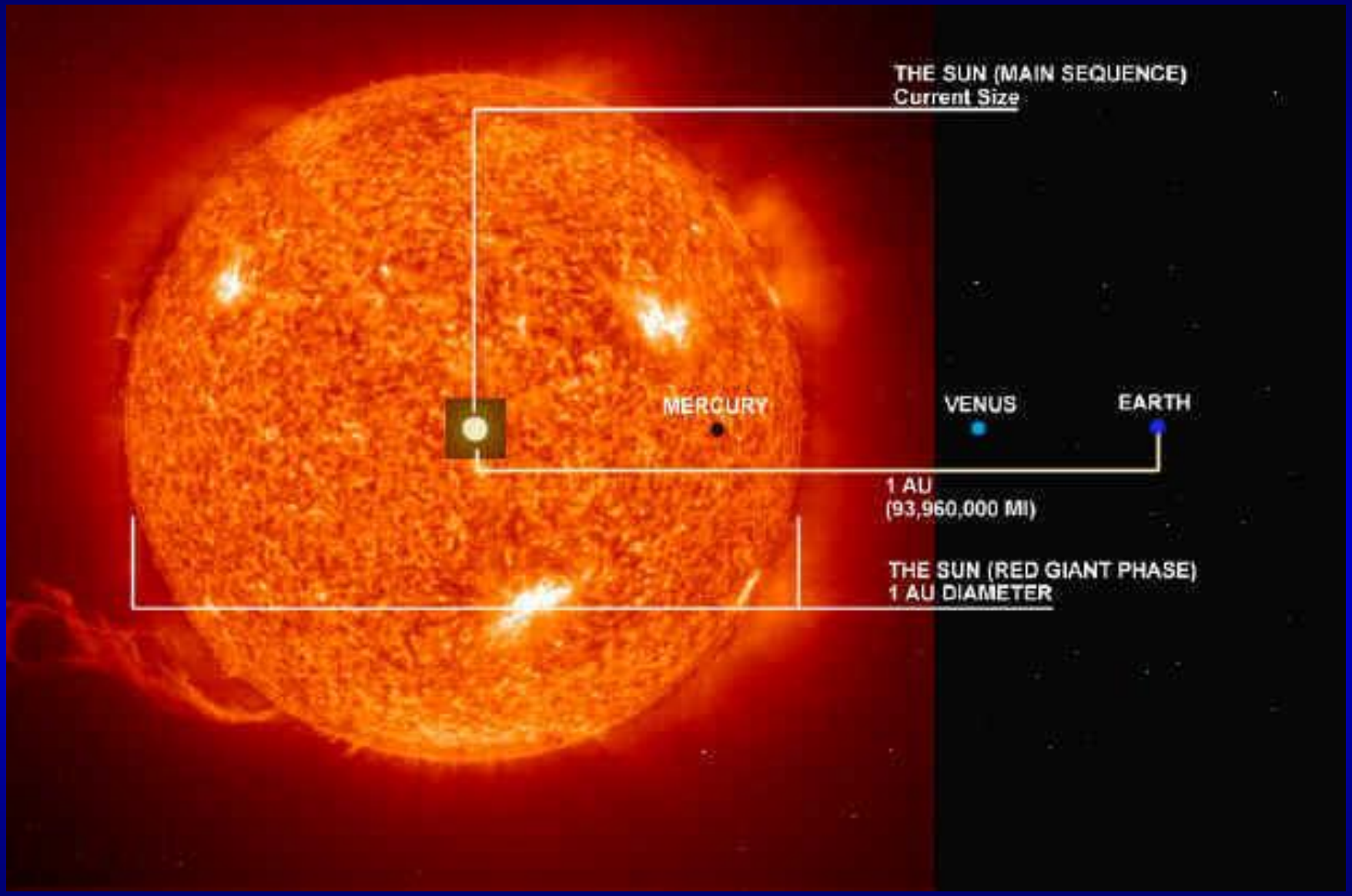
CNO: promijenjena zastupljenost CNO elemenata u unutrašnjosti

Duboka konvekcijska zona miješa ove elemente s gornjim slojevima i transportira ih na površinu:

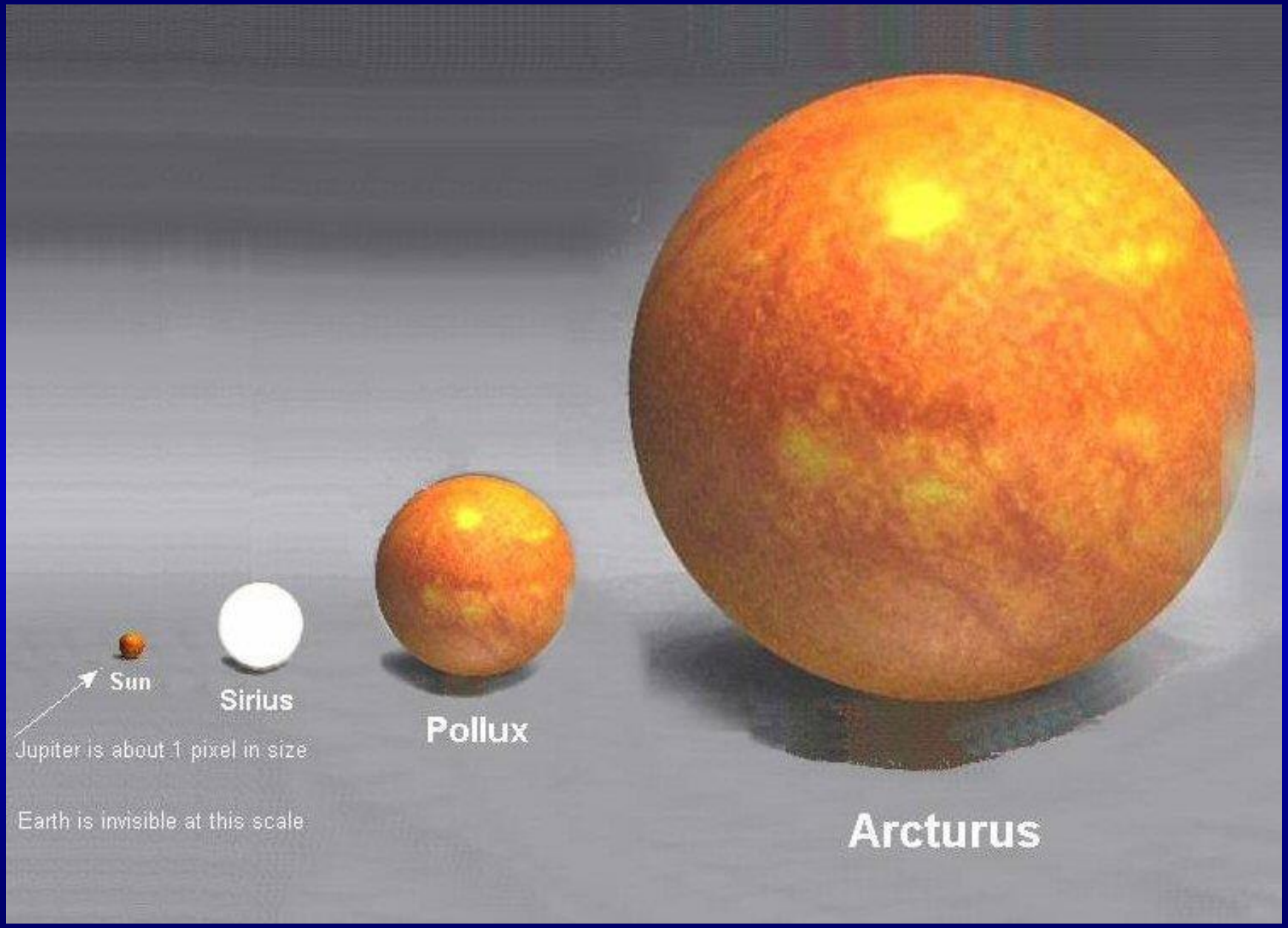
FOTOSFERA MIJENJA SASTAV:

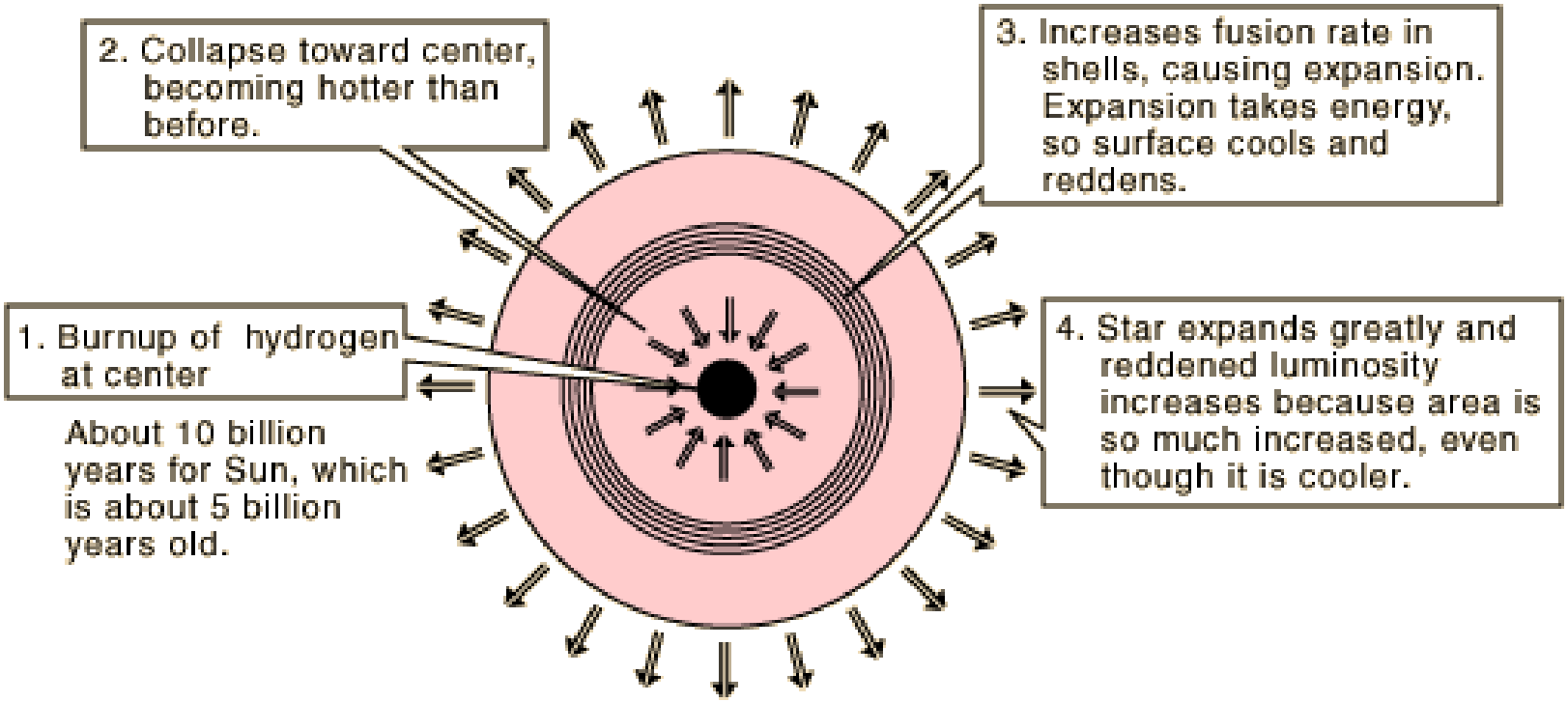
- Pada sadržaj litija u fotosferi
- Raste sadržaj 3He u fotosferi
- 12C se transportira u unutrašnjost, a 14N prema površini

Transport materijala iz unutrašnjosti prema površini: PRVO MIJEŠANJE (FIRST DREDGE-UP)



(SOHO-EIT Consortium, ESA, NASA)


Sun
Sirius
Pollux
Arcturus
Jupiter is about 1 pixel in size
Earth is invisible at this scale



R. Nave, 'Hyperphysics/Astrophysics' (http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/astro/redgia.html)

VRH GRANE CRVENIH DIVOVA 'subgiant branch'

5 M_{Sun} : $T_c \sim 1.3 \cdot 10^8$ K

$\rho_c \sim 7.7 \cdot 10^6$ kg/m^3

Temperatura i gustoća dovoljno visoki za kvantno tuneliranje kroz barijeru između helijevih atoma:

$$ {}^{4}_{2}He + {}^{4}_{2}He \rightleftharpoons {}^{8}_{4}Be $$

$$ {}^{8}_{4}Be + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{12}_{6}C + \gamma $$

$$ {}^{12}_{6}C + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{16}_{8}O + \gamma $$

$$ \epsilon_{3\alpha} \sim \rho^2 Y^3 T_8^{41} $$

Novi izvor energije je **VRLO OSJETLJIV** na **TEMPERATURU**!

Ekspanzija središta uslijed zapaljenja vodika → vodikova ljuska je izgurana prema površini (gorenje vodika je dominantni izvor energije) → hlađenje ljuske, proizvodnja energije pada → **BRZO OPADANJE LUMINOZITETA** → ovojnica se kontrahira → efektivna temperatura raste

HELIJEV BLJESAK

Helijeva jezgra kolapsira do vrha grane crvenih divova → snažna degeneracija → neutrini odnose energiju: hlađenje jezgre neutrinima

- Helij se pali u ljusci oko središta: paljenje je **NAGLO** i **EKSPLOZIVNO**:

$$L \sim 10^{11} L_{Sun}$$

- Paljenje helija traje vrlo kratko
- Oslobođena energija se apsorbira u gornjim slojevima $\rightarrow$ prvo se troši na uklanjanje degeneracije, a zatim u kinetičku energiju i ekspanziju jezgre (usporavaju se reakcije)

HORIZONTALNA GRANA (HB)

- Gorenje helija analogno gorenju vodika na glavnom nizu
- Porast srednje molekulske težine jezgre: točka 8 za 5 M_{Sun} $\rightarrow$ kontrakcija jezgre $\rightarrow$ ekspanzija i hlađenje ovojnice
- Iscrpljivanje helija u središtu $\rightarrow$ CO jezgra kontrahira $\rightarrow$ pomicanje u desno na HR dijagramu: analogno sa SGB fazom!
- Trajanje HB faze je **KRATKO**!

NESTABILNOSTI U VANJSKIM OVOJNICAMA $\Rightarrow$ PERIDOČKE PULZACIJE

- Promjene luminoziteta, polumjera, radijalne brzine površine, efektivne temperature

- Kontrakcija središta $\rightarrow$ debeli sloj oko CO jezgre u kojem gori helij $\rightarrow$ sloj se stanjuje i komprimira, raste proizvodnja energije $\rightarrow$ gornji slojevi ekspandiraju i hlade $\rightarrow$ gasi se vodikova ljuska
- Neutrini hlade jezgru $\rightarrow$ snažna degeneracija u CO jezgri

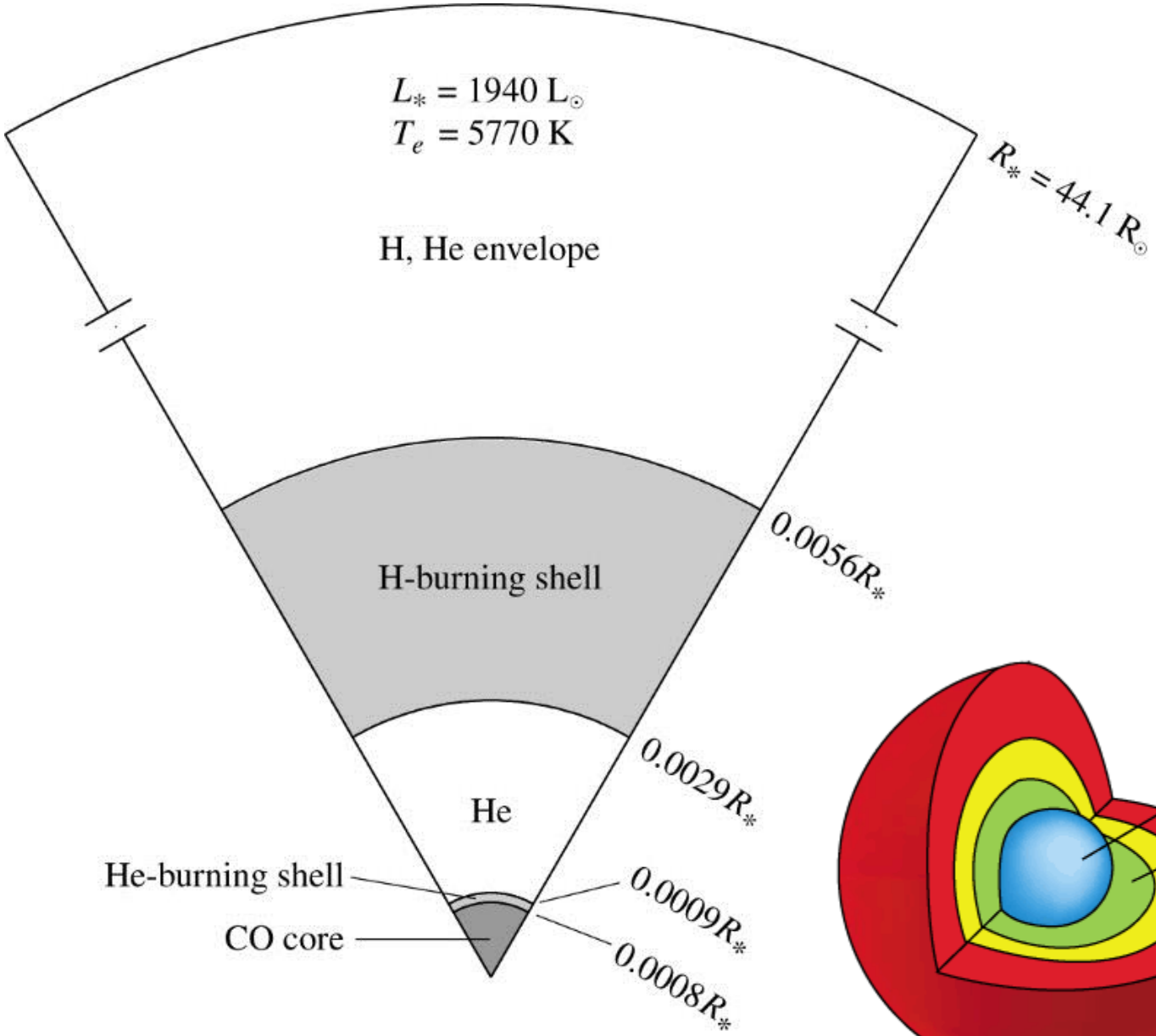
RANA FAZA ASIMPTOTSKIH DIVOVA (AGB)
'asymptotic giant branch'

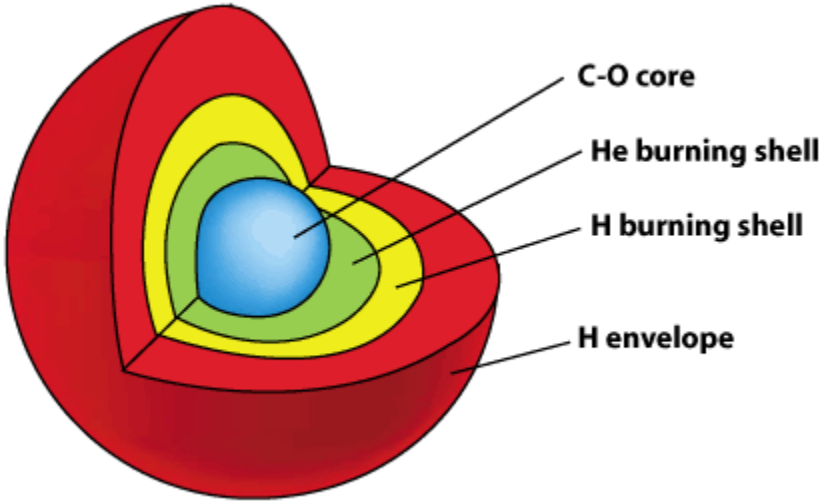
- Slično kao i pri iscrpljivanju vodika
- Nagli porast luminoziteta $\rightarrow$ uspinjanje **GRANOM ASIMPTOTSKIH DIVOVA**
- Dominantno gori helijeva ljuska

5 M_{Sun}: $T_c \approx 2 \cdot 10^8$ K

$\rho_c \approx 10^9$ kg/m^3

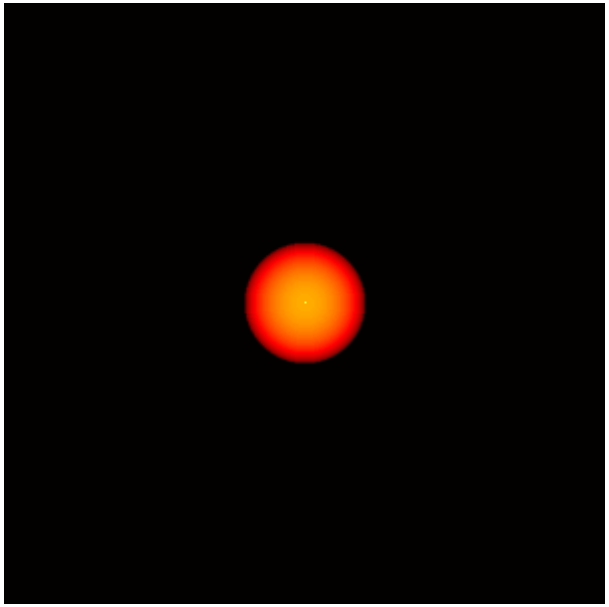
HELIJEVA LJUSKA + VODIKOVA LJUSKA (gotovo neaktivna)



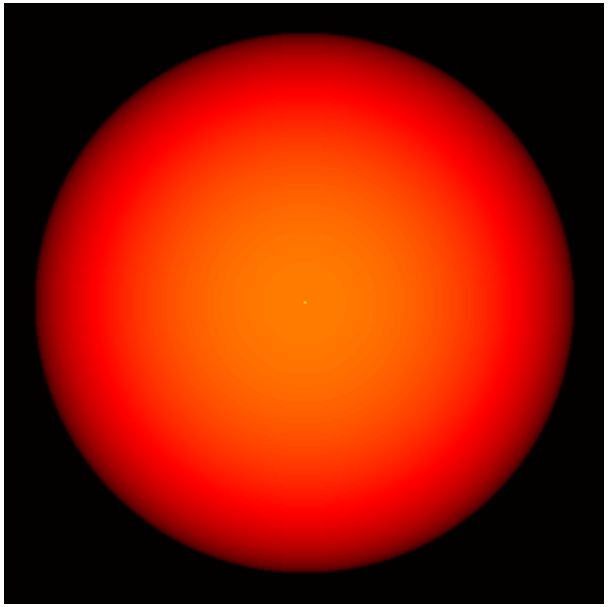


Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson (Data from Iben, 1966, *Ap.J.*, 143, 483)

GLAVNI NIZ (MS)



CRVENI DIV (RGB)



ASIMPTOTSKI DIV (AGB)

- Ekspandirajuća ovojnica apsorbira većinu oslobođene energije $\rightarrow$ polumjer raste $\rightarrow$ efektivna temperatura opada $\Rightarrow$ razvija se

DUBOKA KONVEKTIVNA OVOJNICA

- Konvekcija do zone između vodikovih vanjskih slojeva i helijeva područja iznad helijeve ljuske $\Rightarrow$

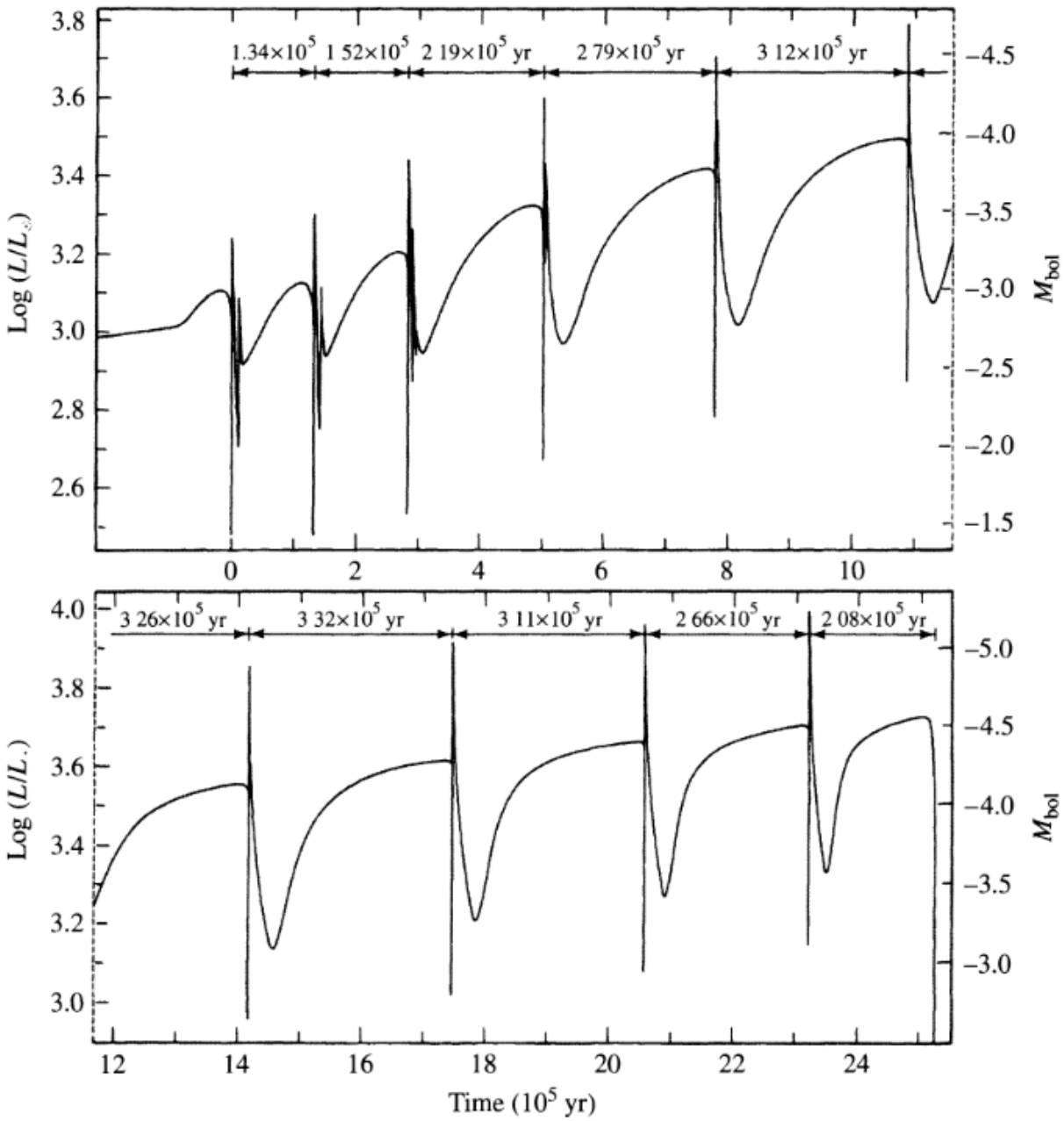
DRUGO MIJEŠANJE

- Porast sadržaja helija i dušika u ovojnici

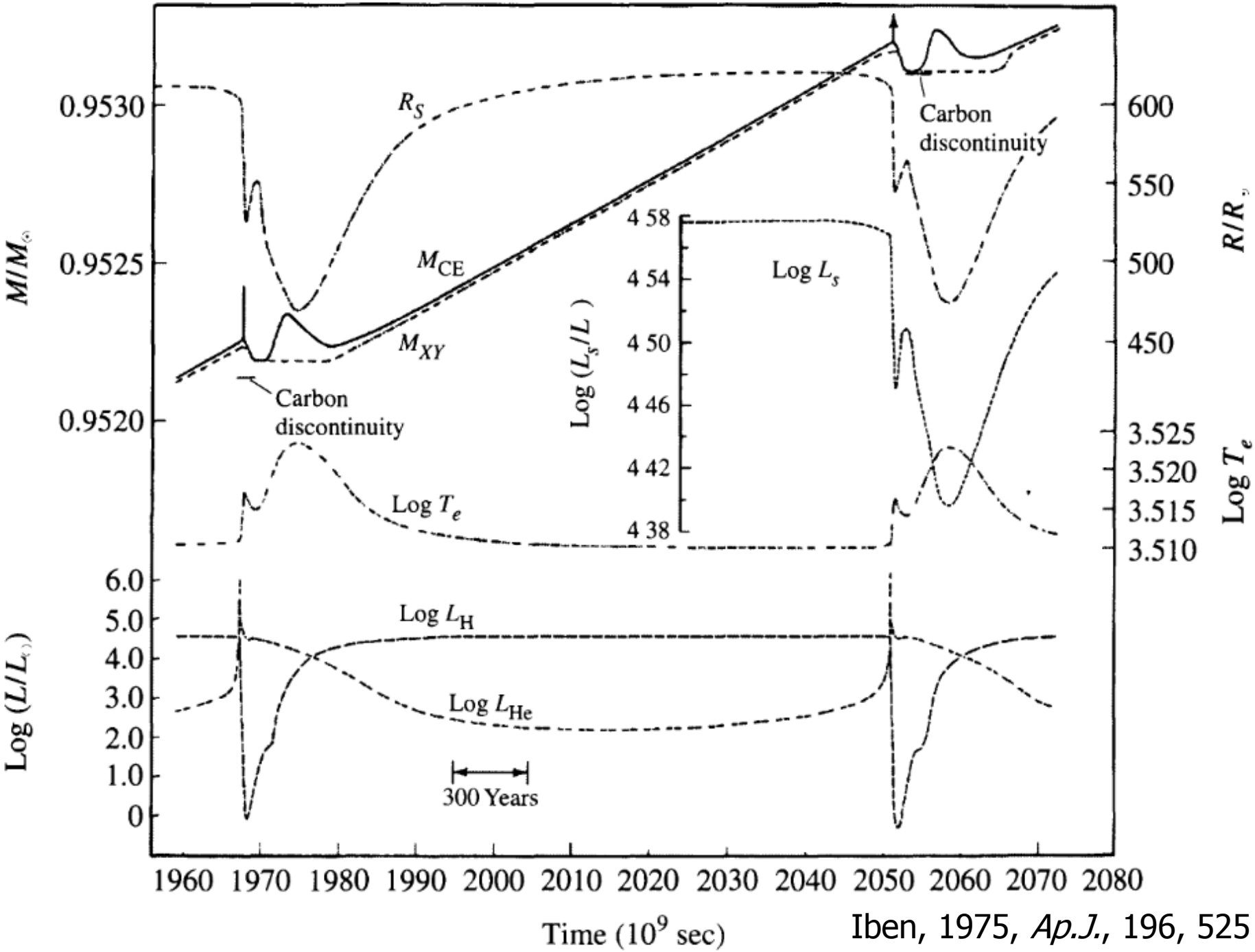
AGB S TERMALNIM PULSEM

- Neaktivna vodikova ljuska se pali i dominira → helijeva ljuska je vrlo tanka: pali se i gasi PERIODIČNO
- Nastanak periodičnih HELIJEVIH BLJESKOVA: vodikova ljuska stvara dodatni helij → masa helijevog sloja raste → degeneracija helijeve ljuske → temperatura helijeve ljuske raste → helijev bljesak → ekspanzija gornjih slojeva → hlađenje i gašenje vodikova ljuske → gorenje helija u ljusci slabi → vodikova ljuska se komprimira i pali

Perioda pulseva ovisi o masi: $\sim$ 1000 god. za 5 M_{Sun}
$\sim$ 100 000 god. za 0.6 M_{Sun}



Iben, 1982, *Ap.J.*, 260, 821)



Iben, 1975, *Ap.J.*, 196, 525

AGB S TERMALNIM PULSEM

7 M_{Sun}:
Helijev bljesak u ljusci → brzi pad luminoziteta vodikove ljuske uslijed hlađenja i ekspanzije → pad ukupnog luminoziteta, polumjer opada → efektivna temperatura opada
Kasnije: luminozitet helijeve ljuske opada zbog uklanjanja degeneracije → pali se vodikova ljuska → raste polumjer i luminozitet, opada efektivna temperatura

Područje nestabilnosti u ovojnici:
DUGOPERIODIČNE PROMJENJIVE ZVIJEZDE (LPV)
MIRE: P ~ 100-700 dana

TREĆE MIJEŠANJE i UGLJIČNE ZVIEJZDE

Termalni puls: povećanje toka energije iz helijeve ljuske $\rightarrow$ dvije konvekcije zone:

1. Između helijeve i vodikove ljuske
2. Konvekcijska zona u ovojnici

$M > 2\ M_{Sun}$: dvije konvekcijske zone se spajaju $\rightarrow$ ugljik se transportira na površinu $\Rightarrow$ **TREĆE MIJEŠANJE**

- Fotosfera se obogaćuje ugljikom: **C-rich AGB**

	O-rich AGB $\Rightarrow$	**C-rich AGB**
Spektralne klase:	K, M	C
Molekule:	SiO	SiC

Atmosfera bogata kisikom: sav ugljik je vezan u CO molekulu, kisik jedini stvara druge molekule

Atmosfera bogata ugljikom: sav kisik je vezan u CO molekulu, ugljik stvara druge molekule

S spektralna klasa: - prijelaz između M i C klase
- ZrO umjesto TiO
- sličan udio ugljika i kisika

S-PROCES NUKLEOSINTEZA

$$^{12}_{6}C + ^{12}_{6}C \rightarrow ^{23}_{12}Mg + n$$
$$^{16}_{8}O + ^{16}_{8}O \rightarrow ^{31}_{16}S + n$$

- Nastanak velikog broja neutrona koji stvaraju nestabilne radioaktivne jezgre $\rightarrow$ stvaranje $^{99}_{43}Tc$

GUBITAK MASE I EVOLUCIJA AGB ZVIJEZDA

Značajan gubitak mase: $\dot{M} \sim 10^{-4} M_{Sun}/\mathrm{god}$

- Hladne zvijezde (~3000 K)
- Nastanak prašine u atmosferi AGB zvijezde: prašina bogata kisikom (O-rich), ugljikom (C-rich)
- Obogaćivanje međuzvjezdanom medija (ISM) prašinom
- Evolucija ovisi o početnoj masi i gubitku mase

M > 8 M_{Sun}: nastavak gorenja u središtu

M < 8 M_{Sun}

- Helijeva ljuska stvara sve više ugljika i kisika → raste masa CO JEZGRE
- Jezgra kontrahira → porast gustoće → gubitak energije neutrinima, hlađenje jezgre

- **Elektronska degeneracija**

M < 4 M_{Sun}: CO jezgra nikada neće započeti gorenje
M = 4 - 8 M_{Sun}: kolaps jezgre ako se zanemari elektronska degeneracija
Masa jezgre < 1.4 M_{Sun}: za potpuno degeneriranu jezgru:
CHANDRASEKHAROVA GRANICA
- Gubitak mase sprječava kolaps → dodatno gorenje u središtu:

ONeMg JEZGRA

$$^{22}_{10}Ne + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{25}_{12}Mg + n$$
$$^{22}_{10}\mathrm{Ne} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{26}_{12}\mathrm{Mg} + \gamma$$

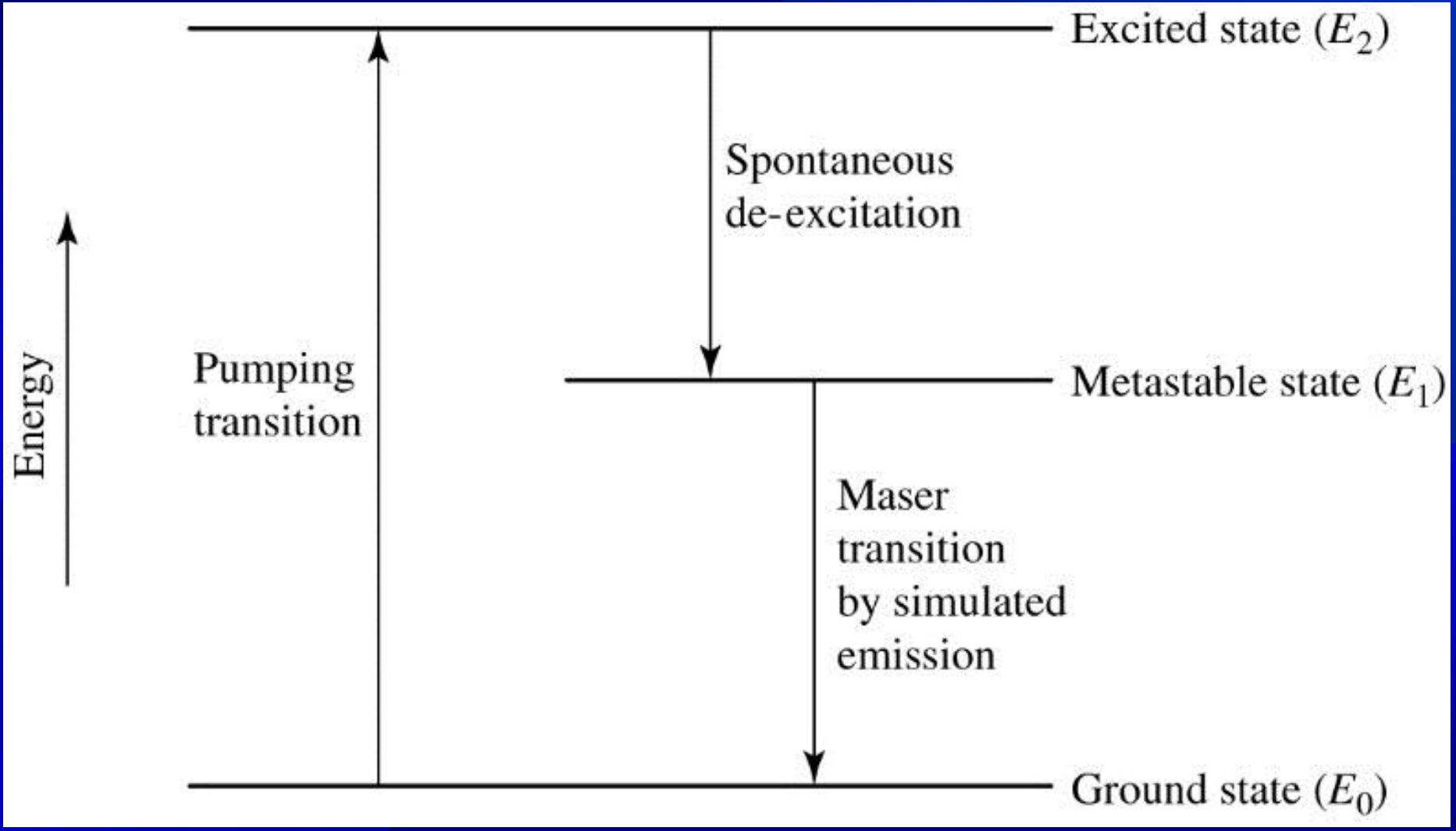
Uzroka gubitka mase:
- pulsacije atmosfere
- tlak zračenja na zrnca prašine

- Gubitak mase raste evolucijom $\rightarrow$ porast luminoziteta i polumjera, opadanje mase $\Rightarrow$ opada površinska gravitacija $\Rightarrow$ daljnji porast gubitka mase

SUPERVJETAR: $\dot{M} \sim 10^{-4} M_{Sun}/\mathrm{god} \Rightarrow$

OH/IR IZVORI

OH/IR izvori: - optički debela ovojnica prašine
- zračenje u IR dijelu spektra
- OH molekule: **MASERSKA EMISIJA**: molekulski analog laseru

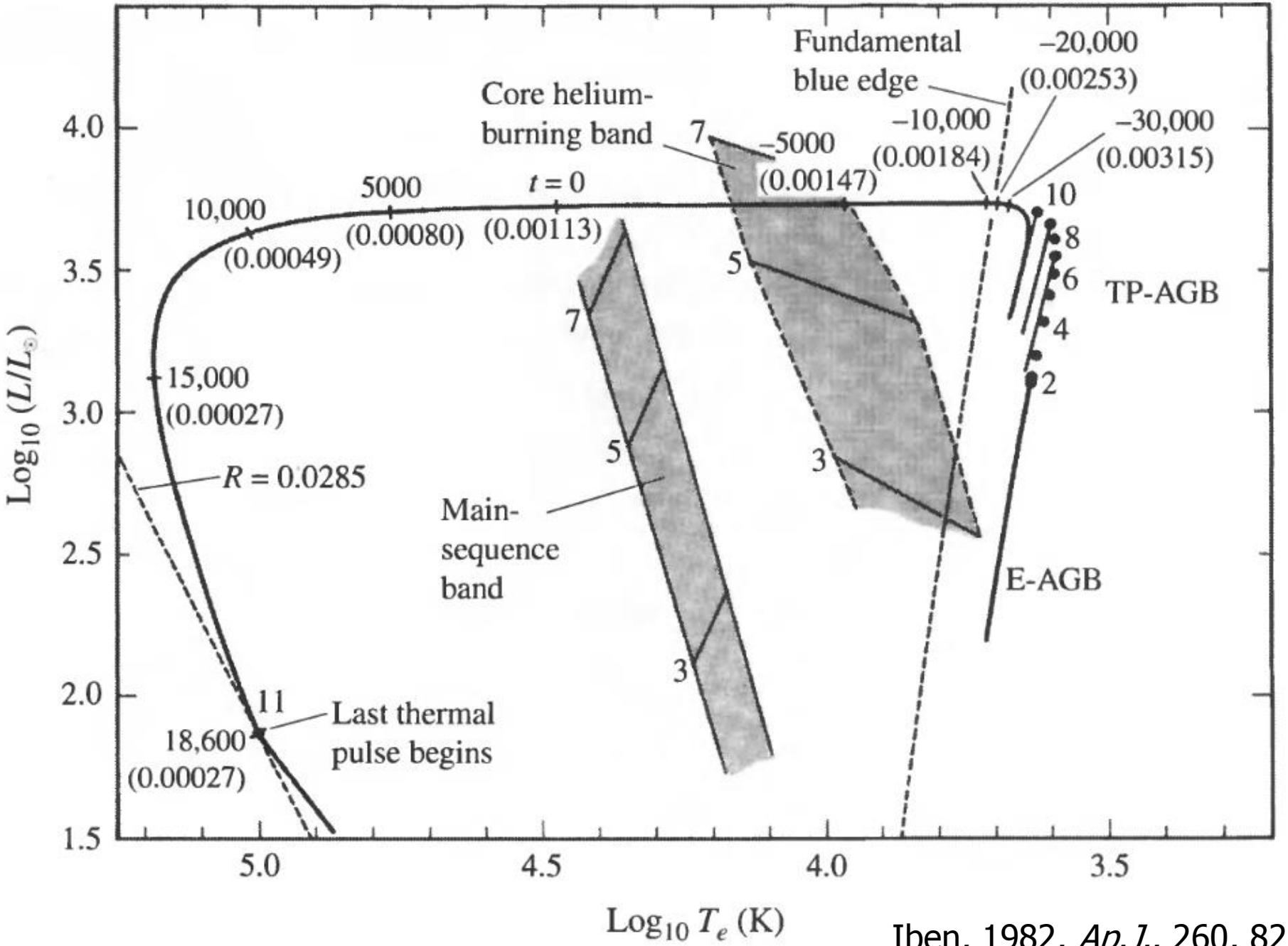


Carroll, B.W., Ostlie, D.A., 2006, 'Introduction to Modern Astrophysics', Pearson

POST-AGB FAZA

- Oblak prašine ekspandira → optički tanak → u središtu se nalazi F ili G zvijezda superdiv → evolucijske staze se pomiču u lijevo
- Ostatak ovojnice se izbacuje → gase se vodikova i helijeva ljuska, luminozitet drastično pada → preostaje **VRUĆA DEGENERIRANA CO (ONeMg) JEZGRA:**

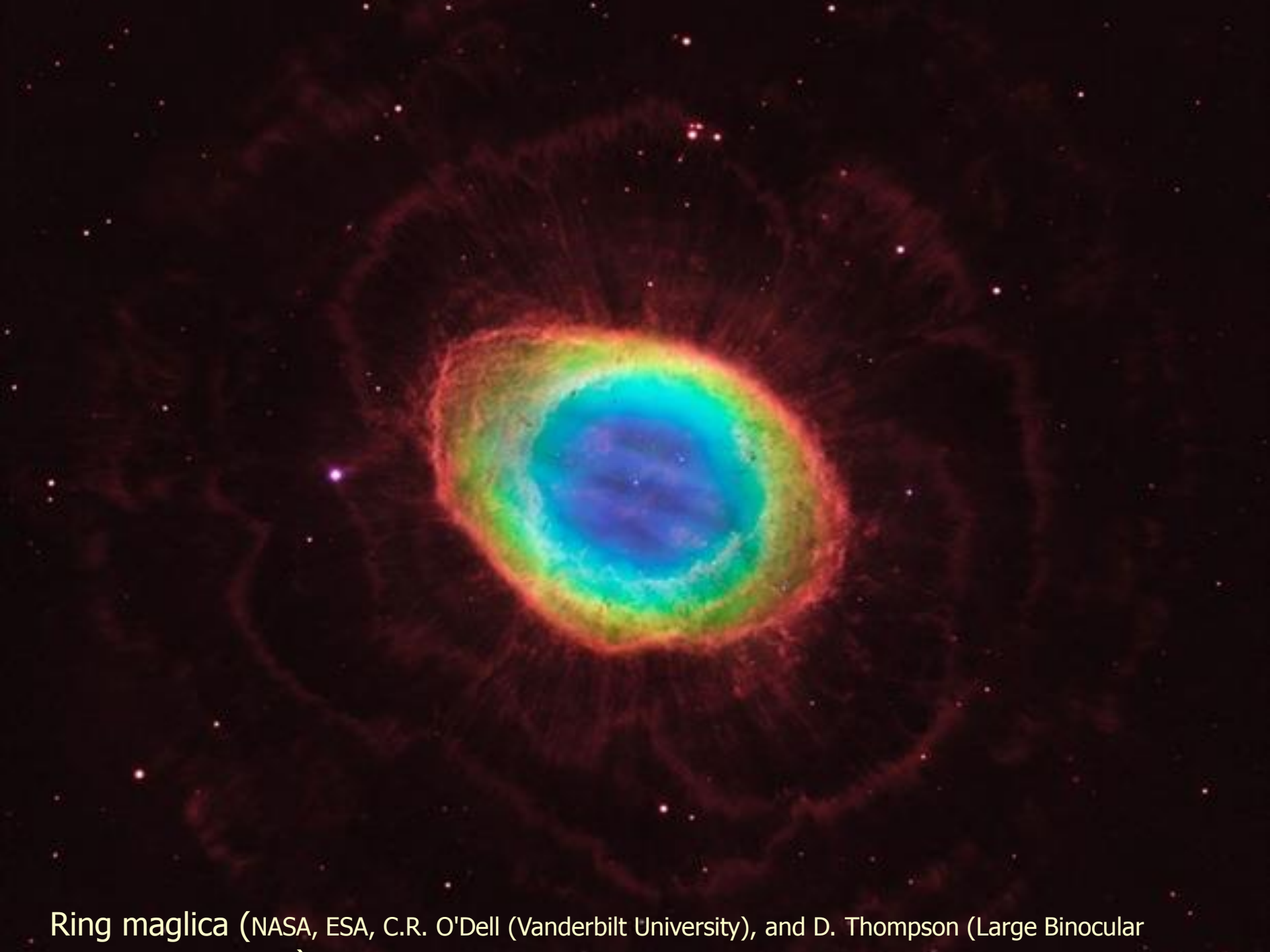
BIJELI PATULJAK



Iben, 1982, *Ap.J.*, 260, 821

PLANETARNE MAGLICE

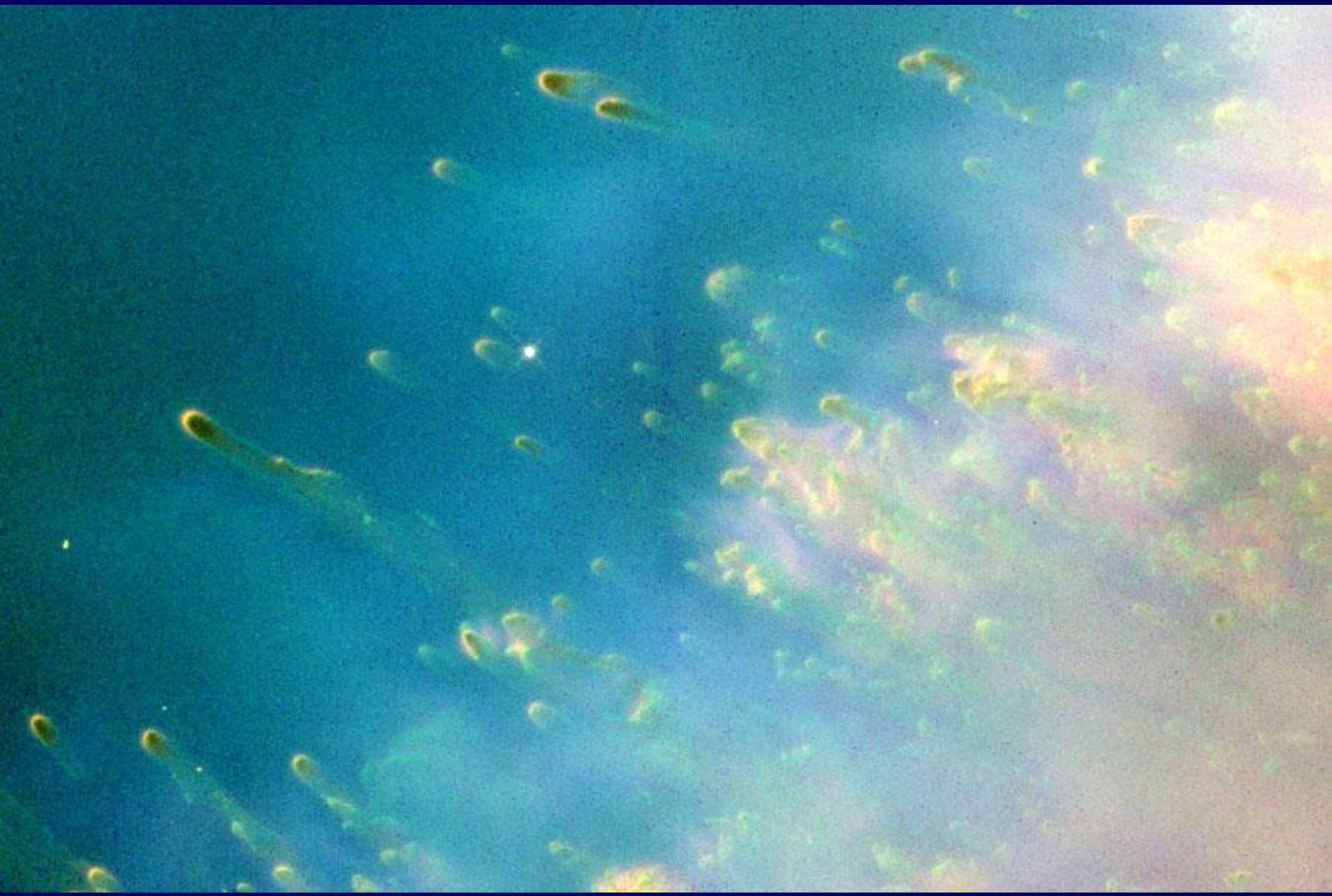
- Ekspandirajuća ljuska plina oko bijelog patuljka
- UV zračenje sa bijelog patuljka se apsorbira u plinu $\rightarrow$ ionizacija i pobuđenje plina $\rightarrow$ relaksacija atoma i emisija fotona u V
- Temperatura plina $\sim$ 10 000 K
- Metastabilna stanja: zabranjene linije [OIII], [OII], [NeIII]
- Složena struktura PN:
  - mlazevi
  - prisustvo pratioca
  - magnetska polja
  - kutna količina gibanja
- Brzina ekspanzije maglice $\sim$ 10-30 km/s
- Vrijeme života $\sim$ 50 000 god.
- Oko 1500 u Mliječnom putu



Ring maglica (NASA, ESA, C.R. O'Dell (Vanderbilt University), and D. Thompson (Large Binocular

Helix maglica (NASA, WIYN, NOAO, ESA, Hubble Helix Nebula Team, M. Meixner (STScI), & T. A. Rector (NRAO))

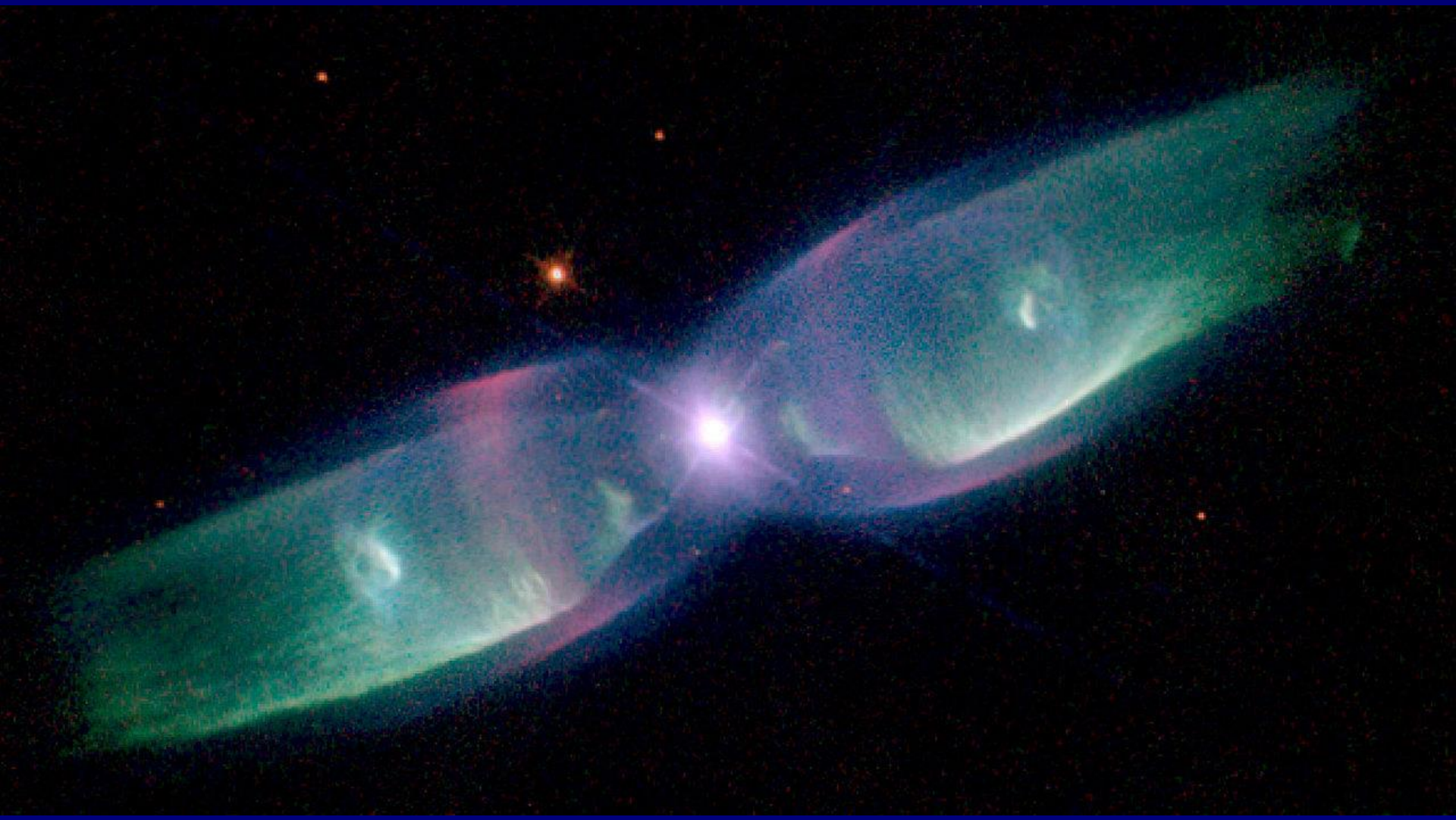
Helix maglica (NASA/JPL-Caltech)



Helix maglica (C. R. O'Dell and K. Handron (Rice University), NASA)

Mačje oko (Cat's eye) maglica (NASA, ESA, HEIC, The Hubble Heritage Team (STScI/AURA))

Mačje oko (Cat's eye) maglica (Nordic Optical Telescope & R. Corradi)



Butterfly nebula (B. Balick (U. Washington) et al., WFPC2, HST, NASA)

Planetary Nebula Mz 3

Ant nebula (R. Sahai (JPL) et al., Hubble Heritage Team, ESA, NASA)

Hubble Heritage

Eskimo maglica (Andrew Fruchter (STScI) et al., WFPC2, HST, NASA)

Dumbbell maglica (FORS Team, 8.2-meter VLT, ESO)