

Razvoj (evolucija) zvijezda

GLAVNI NIZ: PRETVORBA (FUZIJA) VODIKA U HELIJ

ZAMS – Zero Age Main Sequence (Nulto doba glavnog niza)

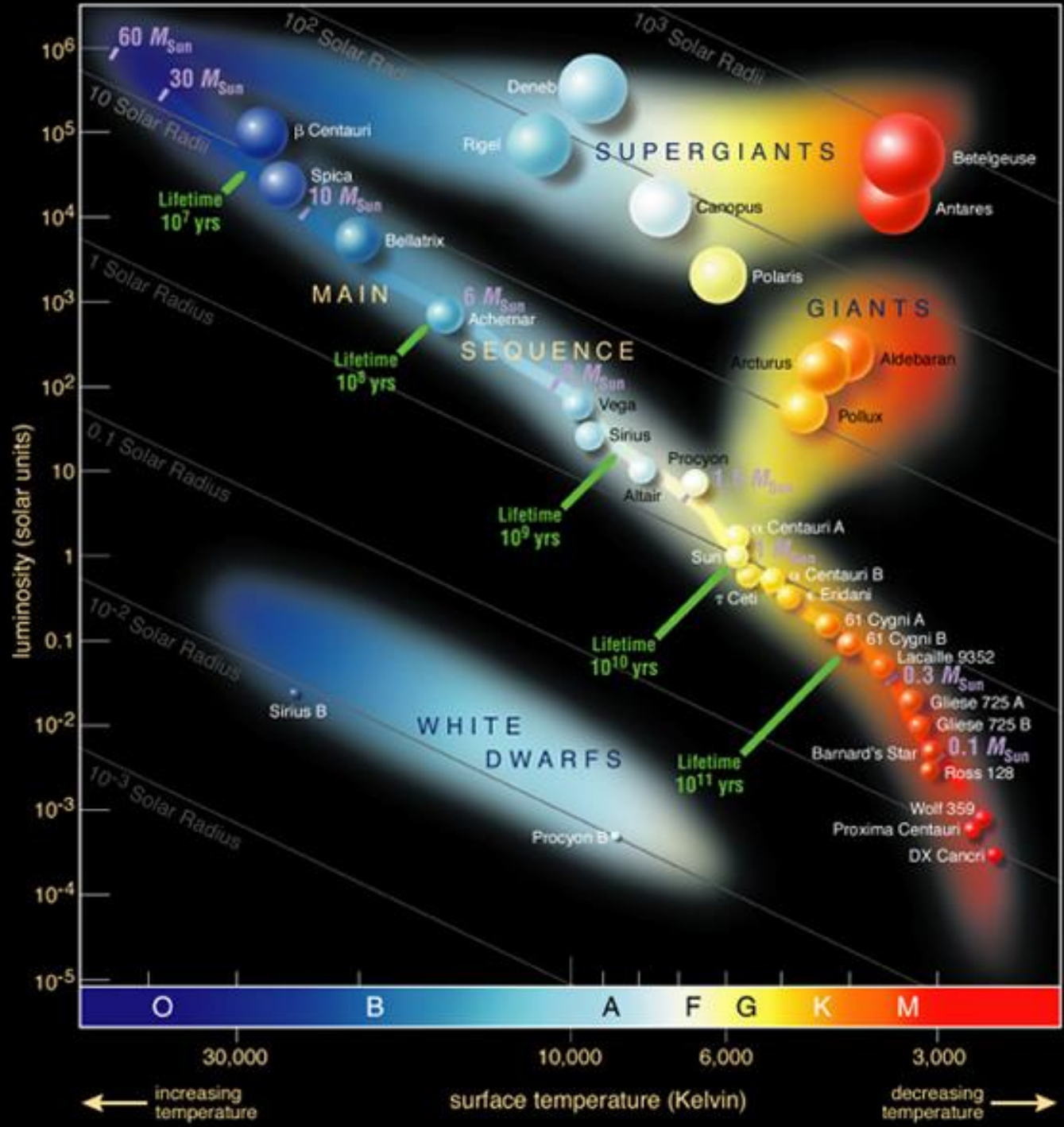
MASA ZVIJEZDE → određuje:

1. VRIJEME ŽIVOTA ZVIJEZDE
2. RAZVOJNI PUT I SUDBINU
3. BRZINU TERMONUKLEARNIH REAKCIJA
4. VRSTU TERMONUKLEARNIH REAKCIJA

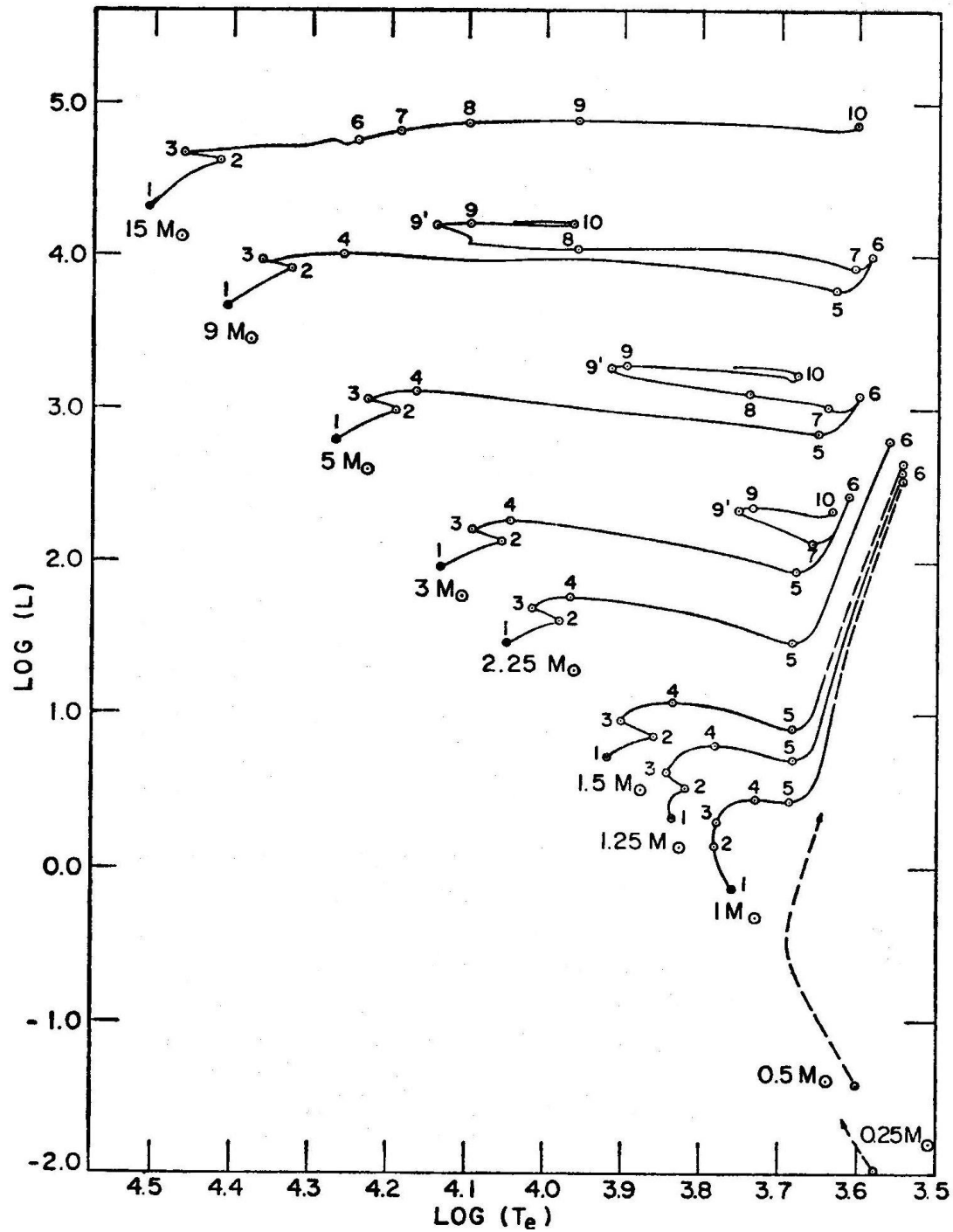
VREMENSKA SKALA GLAVNOG NIZA: **NUKLEARNA SKALA 10^{10} godina**

RAZLIKE:

1. ZVIJEZDE $M > 1.2 M_{\text{Sun}}$ → CNO ciklus, konvektivno središte
2. ZVIJEZDE $M < 1.2 M_{\text{Sun}}$ → pp lanac, radijativno središte



← increasing temperature surface temperature (Kelvin) decreasing temperature →



Evolucija zvijezda malih masa

pp lanac: fuzija vodika u helij → raste srednja molekulska masa → pada tlak plina → jezgra se gravitacijski stišće → $\frac{1}{2}$ gravitacijske energije se izrađi a druga $\frac{1}{2}$ utroši na grijanje → porast gustoće i temperature → porast brzine nuklearnih reakcija → **porast luminoziteta** (1→2)

Nestaje vodika u središtu → prestanak nuklearnih reakcija → gorenje vodika u sloju ljuske oko male neaktivne helijeve jezgre (2→3)

Helijeva jezgra je **IZOTERMALNA**

Gorenje vodika u ljusci → ekspanzija (širenje) vanjskih slojeva zvijezde → opadanje efektivne temperature → evolucijska staza se pomiće u desno na HR dijagramu (4) → raste izotermalna helijeva jezgra

Evolucija zvijezda malih masa

GRANICA MASE IZOTERMALNE HELIJEVE JEZGRE:
**TLAK PLINA JE NEDOVOLJAN DA SPRIJEĆI GRAVITACIJSKI
KOLAPS**

Izotermalna jezgra postaje **DEGENERIRANA!**

**DEGENERIRANI ELEKTRONSKI PLIN SPRIJEĆAVA
GRAVITACIJSKI KOLAPS** i održava hidrostatsku ravnotežu u središtu
zvijezde

Evolucija zvijezda malih masa

DEGENERIRANI ELEKTRONSKI PLIN

Dovoljno visoka gustoća → elektroni zauzimaju najniža moguća energijska stanja

FERMIJEV PRINCIP ISKLJUČENJA → sva najniža stanja su zauzeta

TLAK NE OVISI O TEMPERATURI već o **NETERMALNOM GIBANJU ELEKTRONU**

TLAK DEGENERIRANOG ELEKTRONSKOG PLINA:

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

Idealni plin: $P \propto \rho T$

DEGENERIRANI PLIN SPRIJEČAVA KOLAPS IZOTERMALNOG SREDIŠTA

KASNIJE FAZE EVOLUCIJE

Složeni niz evolucijskih faza: **1. nuklearno gorenje u središtu**
2. nuklearno gorenje u ljuskama

Paljenje/gašenje nuklearnog gorenja u središtu/ljuskama

KRAJ FAZE GLAVNOG NIZA: PRESTANAK GORENJA VODIKA U SREDIŠTU

- debela ljuska vodika u kojoj vodik gori oko izotermne neaktivne helijeve jezgre

Grana pod-divova (subgiant)

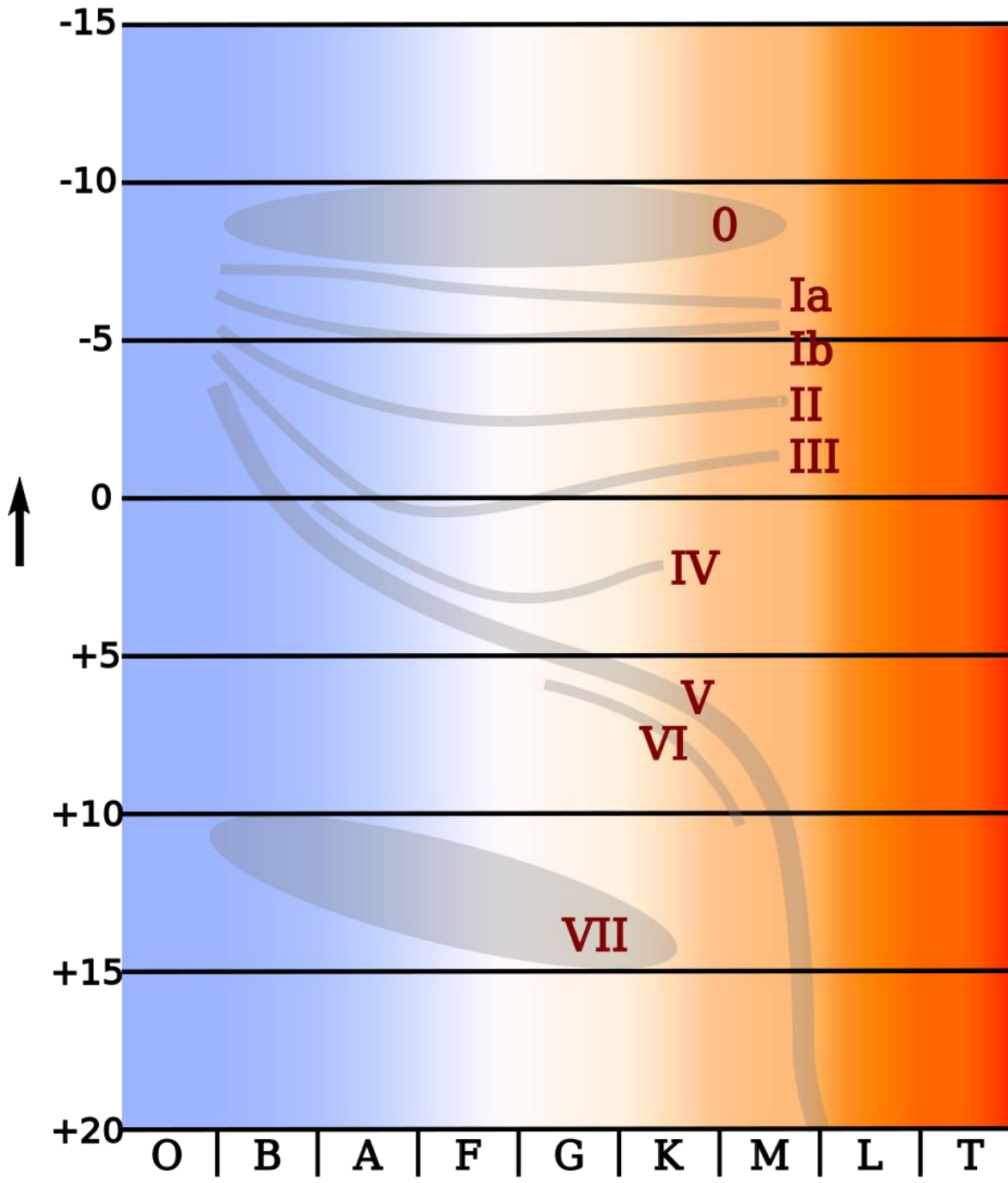
Raste izotermna jezgra → dovoljno masivna jezgra: nestaje ravnoteže → kolaps (sažimanje) jezgre → gravitacijska energija: **ZVIJEZDA SE ŠIRI → EFEKTIVNA TEMPERATURA PADA (4→5)**

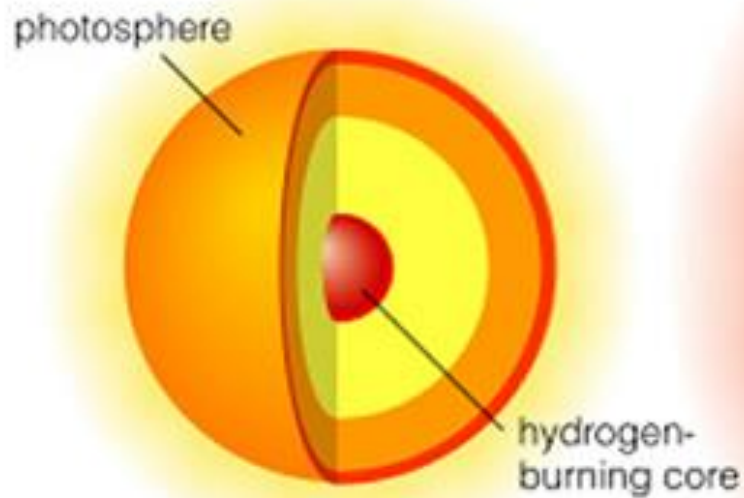
Grana crvenih divova (RGB)

Kontrakcija jezgre + širenje vanjskih slojeva → povećanje efikasnosti prijenosa energije → **NAGLO POVEĆANJE LUMINOZITETA I RADIJUSA → CRVENI DIV**

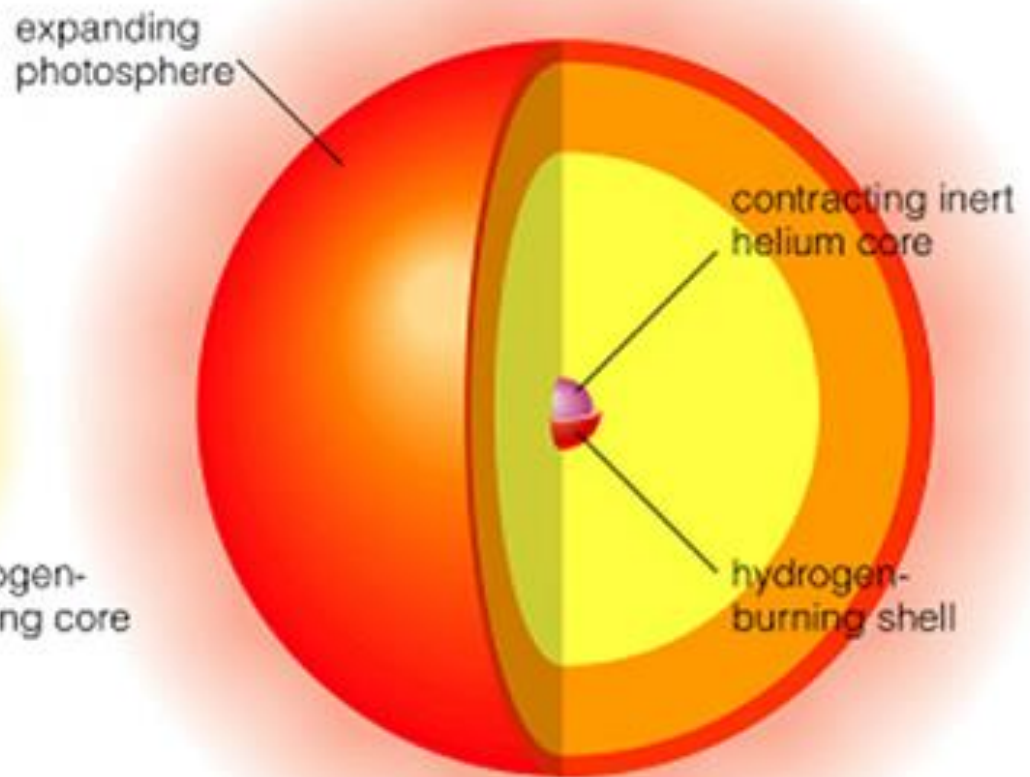
TEMPERATURA U SREDIŠTU RASTE I POSTAJE DOVOLJNO VISOKA ZA POČETAK TROSTRUKIH α PROCESA KVANTNIM TUNELIRANJEM → FUZIJA HELIJA

$1.3 \cdot 10^8$ K; $7.7 \cdot 10^6$ kg/m³ za $5 M_{\text{Sun}}$

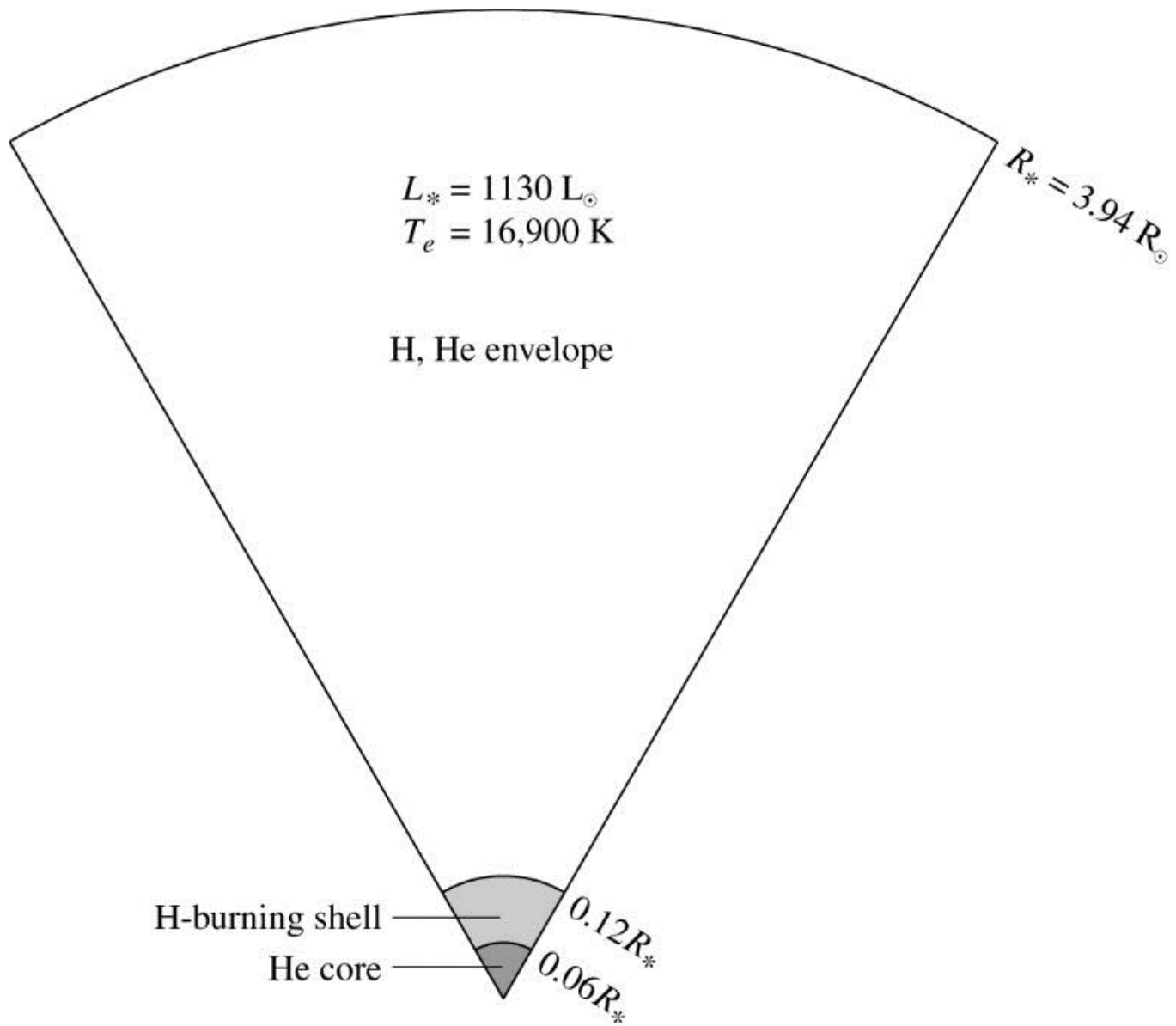


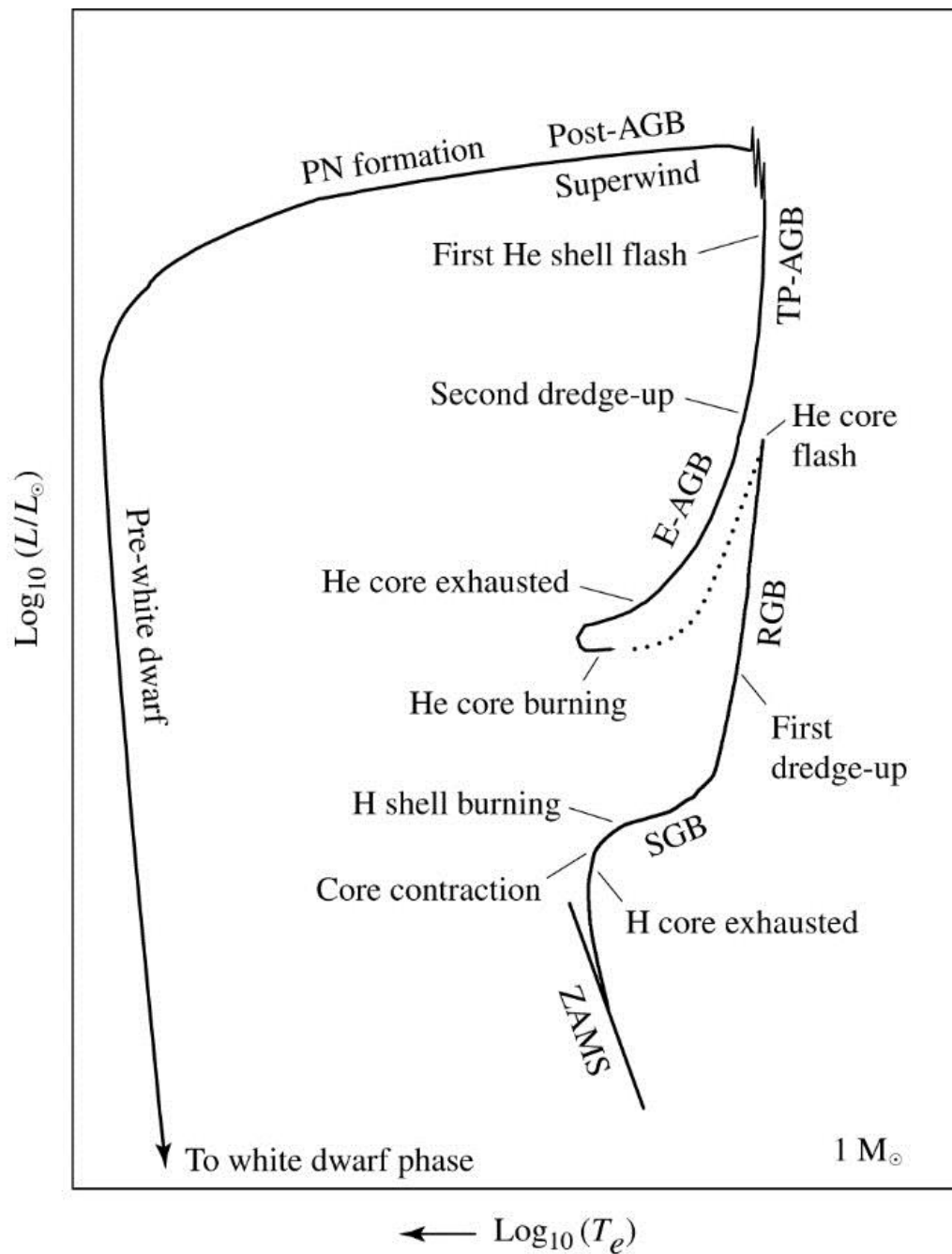


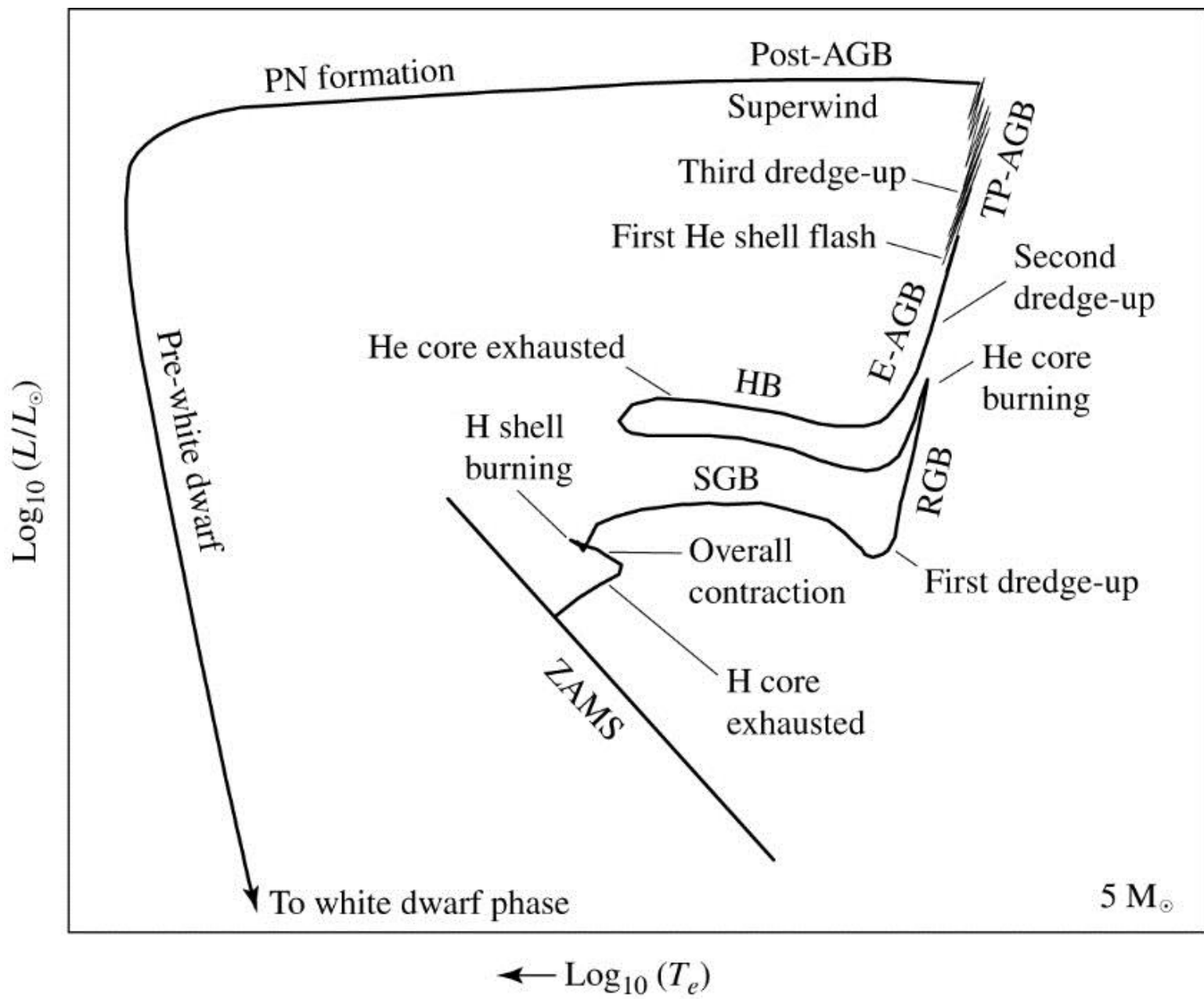
main-sequence star



expanding subgiant







Grana pod-divova (subgiant)

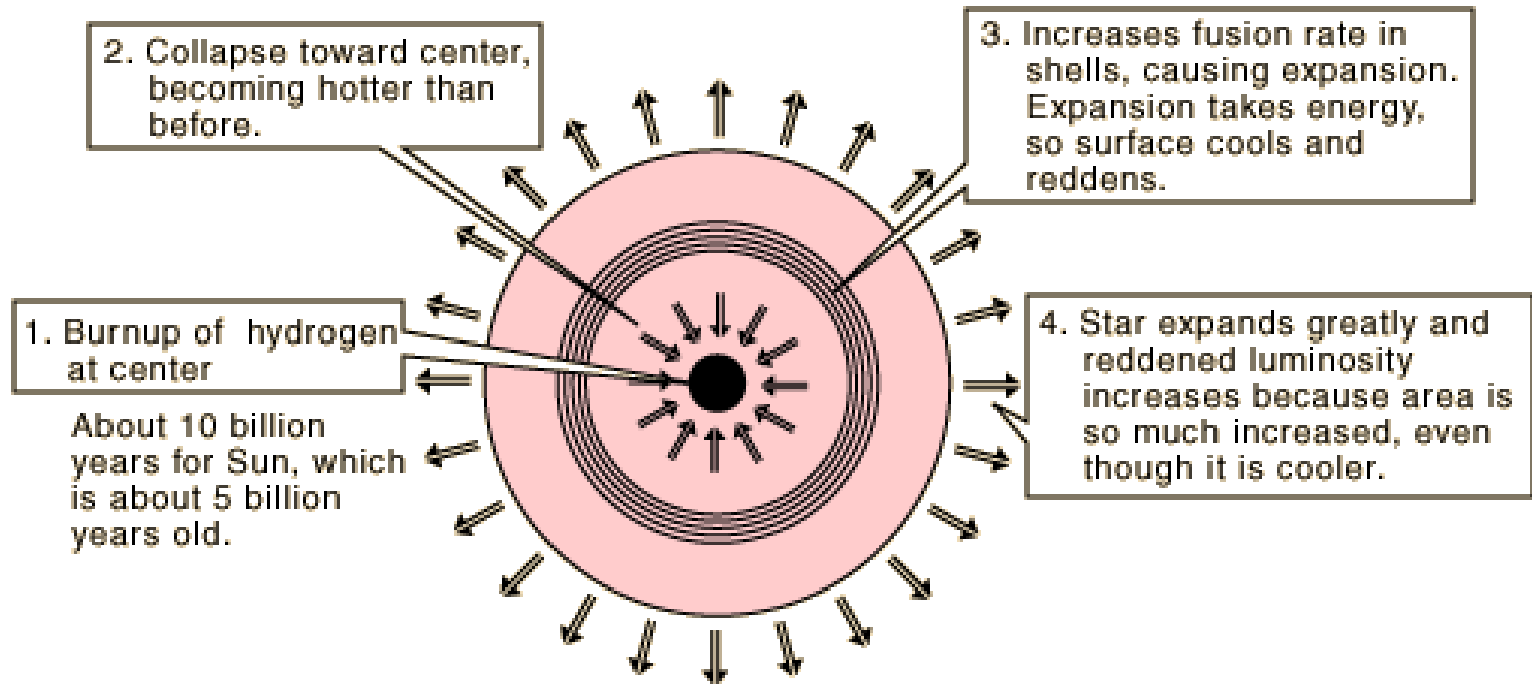
Raste izotermna jezgra → dovoljno masivna jezgra: nestaje ravnoteže → kolaps (sažimanje) jezgre → gravitacijska energija: **ZVIJEZDA SE ŠIRI → EFEKTIVNA TEMPERATURA PADA (4→5)**

Grana crvenih divova (RGB)

Kontrakcija jezgre + širenje vanjskih slojeva → povećanje efikasnosti prijenosa energije → **NAGLO POVEĆANJE LUMINOZITETA I RADIJUSA → CRVENI DIV**

TEMPERATURA U SREDIŠTU RASTE I POSTAJE DOVOLJNO VISOKA ZA POČETAK TROSTRUKIH α PROCESA KVANTNIM TUNELIRANJEM → FUZIJA HELIJA

$1.3 \cdot 10^8$ K; $7.7 \cdot 10^6$ kg/m³ za $5 M_{\text{Sun}}$



Sun

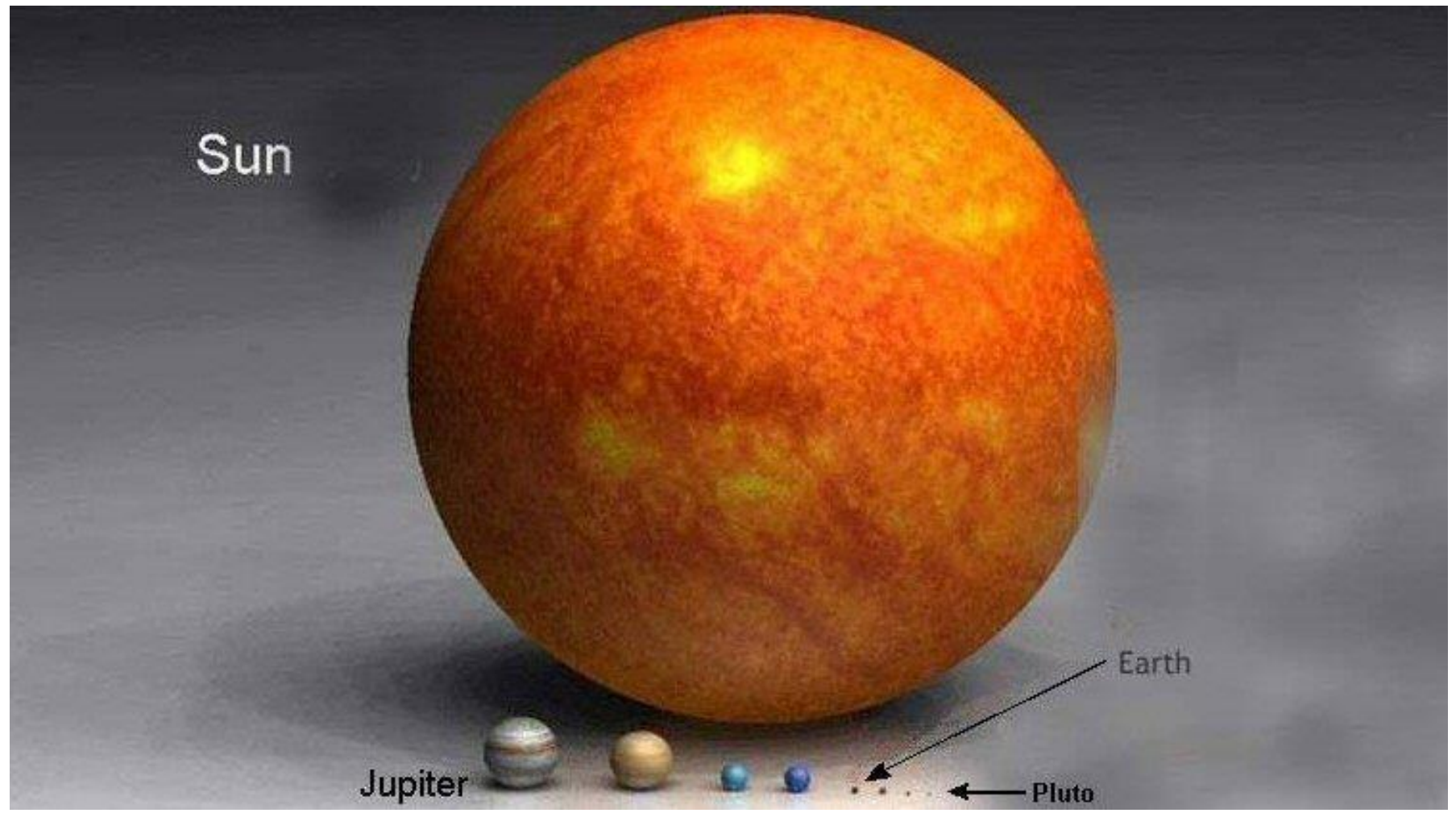


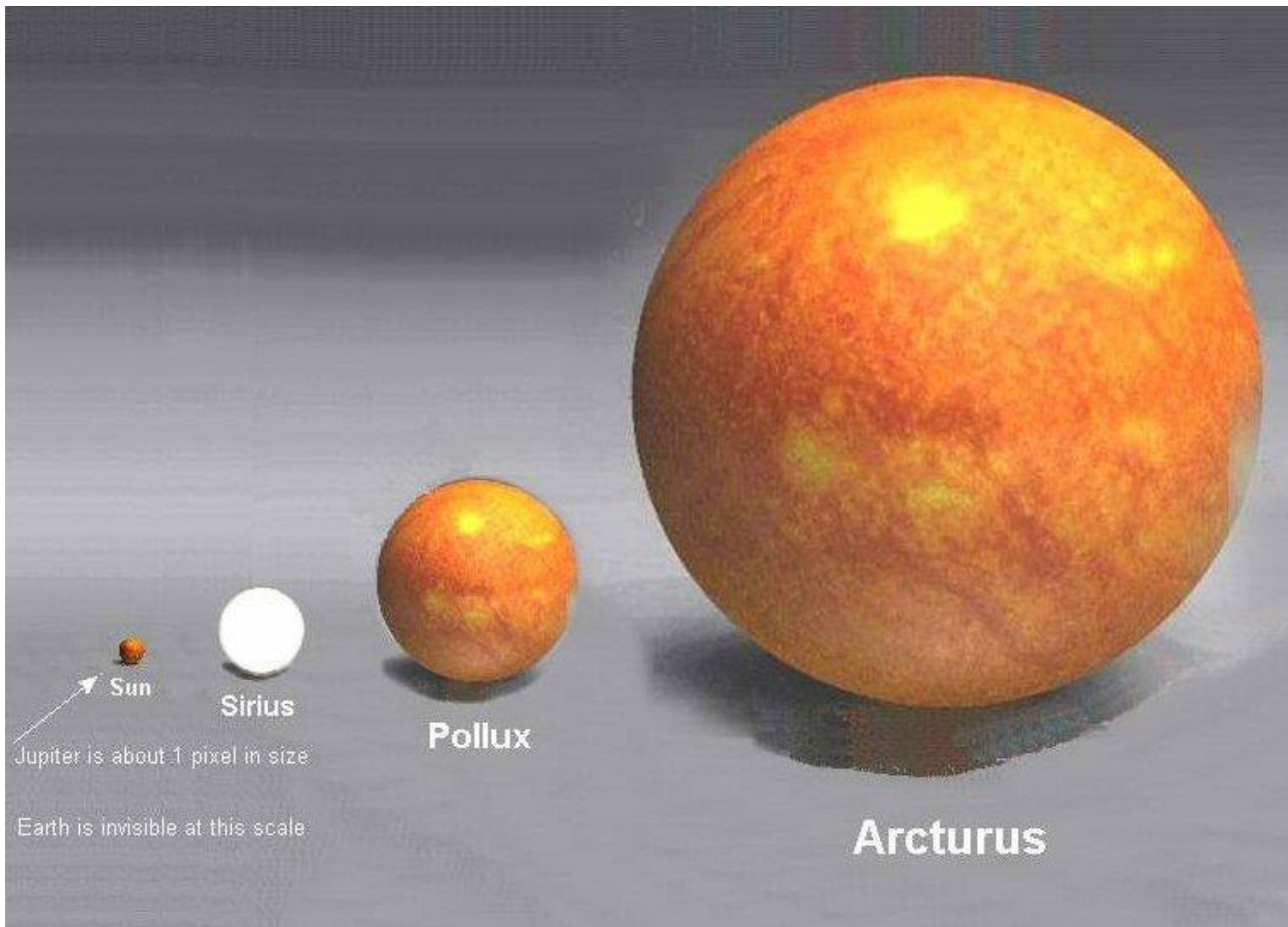
Jupiter



Earth

Pluto





Sun

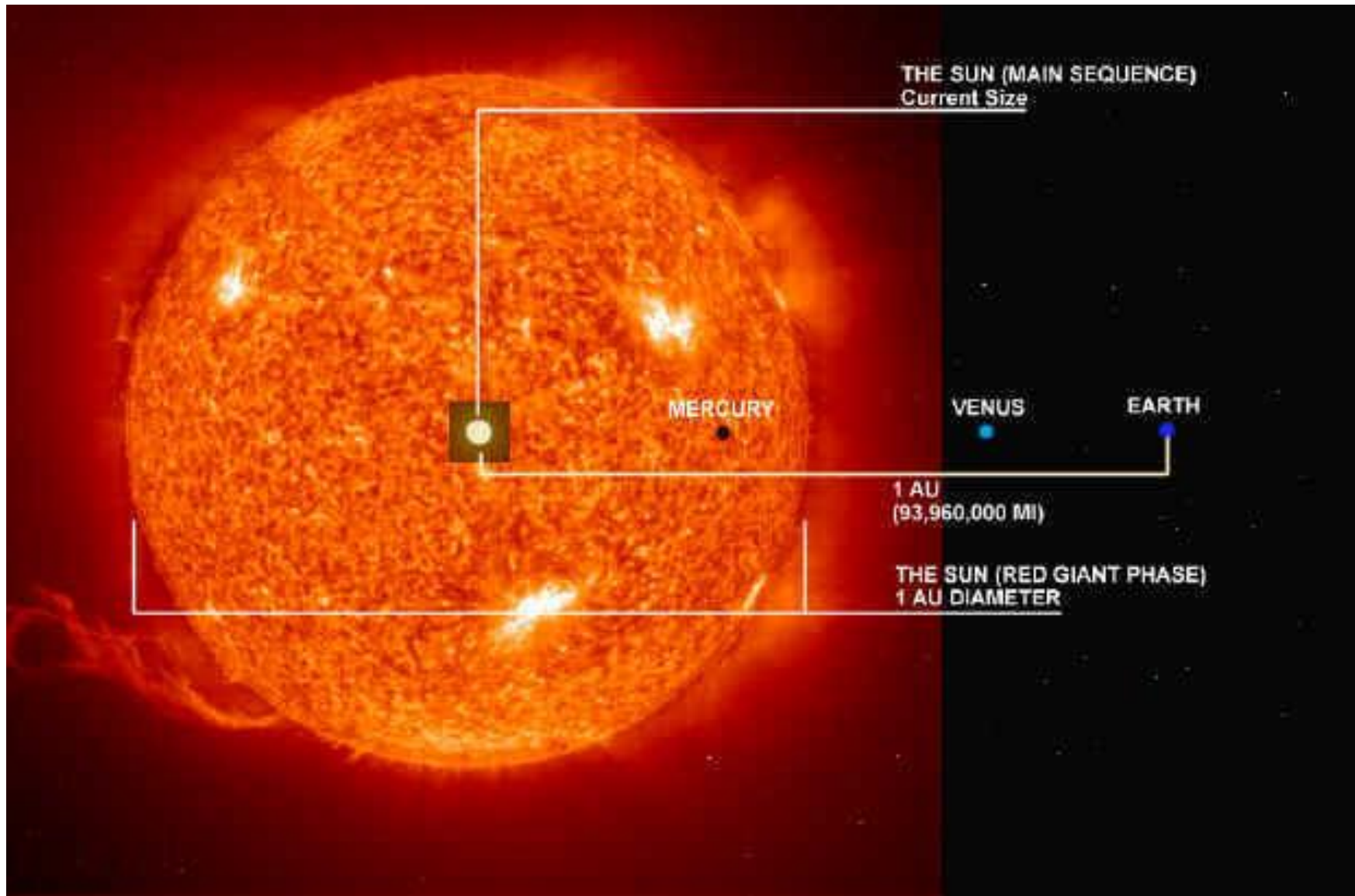
Sirius

Pollux

Arcturus

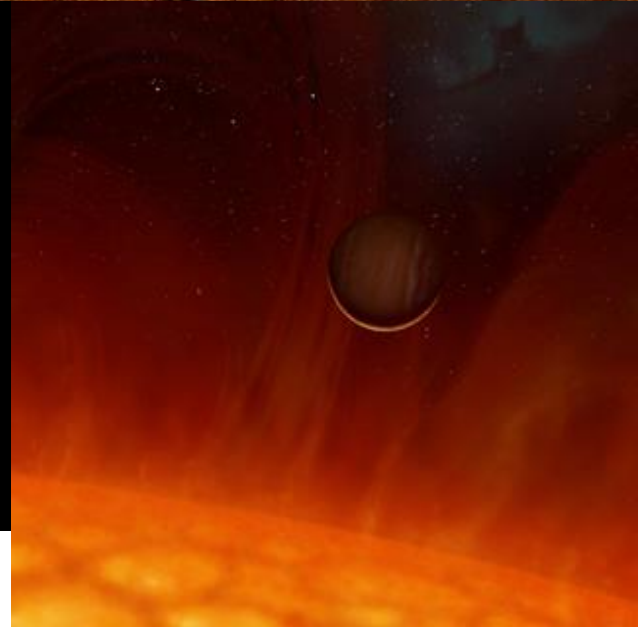
Jupiter is about 1 pixel in size

Earth is invisible at this scale



The Sun as a red giant
(diameter ≈ 2 AU)

The Sun as a main-sequence star
(diameter ≈ 0.01 AU)



HELIJEV BLJESAK

Za male mase $M < 1.8 M_{\text{Sun}}$:

- jezgra je degenerirana, hladi se neutrinima
- dovoljno visoke temperature \rightarrow početak gorenja helija \rightarrow
HELIJEV BLJESAK (10^8 K; 10^7 kg/m³)

Porast luminoziteta u središtu $\rightarrow 10^{11} L_{\text{Sun}}$ (apsorbirano u vanjskim slojevima)

Horizontalna grana (HB)

Smanjenje luminoziteta \rightarrow kontrakcija \rightarrow kompresija vodikove ljuske \rightarrow ponovno gorenje vodika u ljusci \rightarrow povećanje efektivne temperature

FAZA GORENJA HELIJA U SREDIŠTU ZVIJEZDE (8) \rightarrow
puno kraće od faze gorenja vodika na glavnom nizu

FUZIJA HELIJA U UGLJIK/KISIK U SREDIŠTU ZVIJEZDE

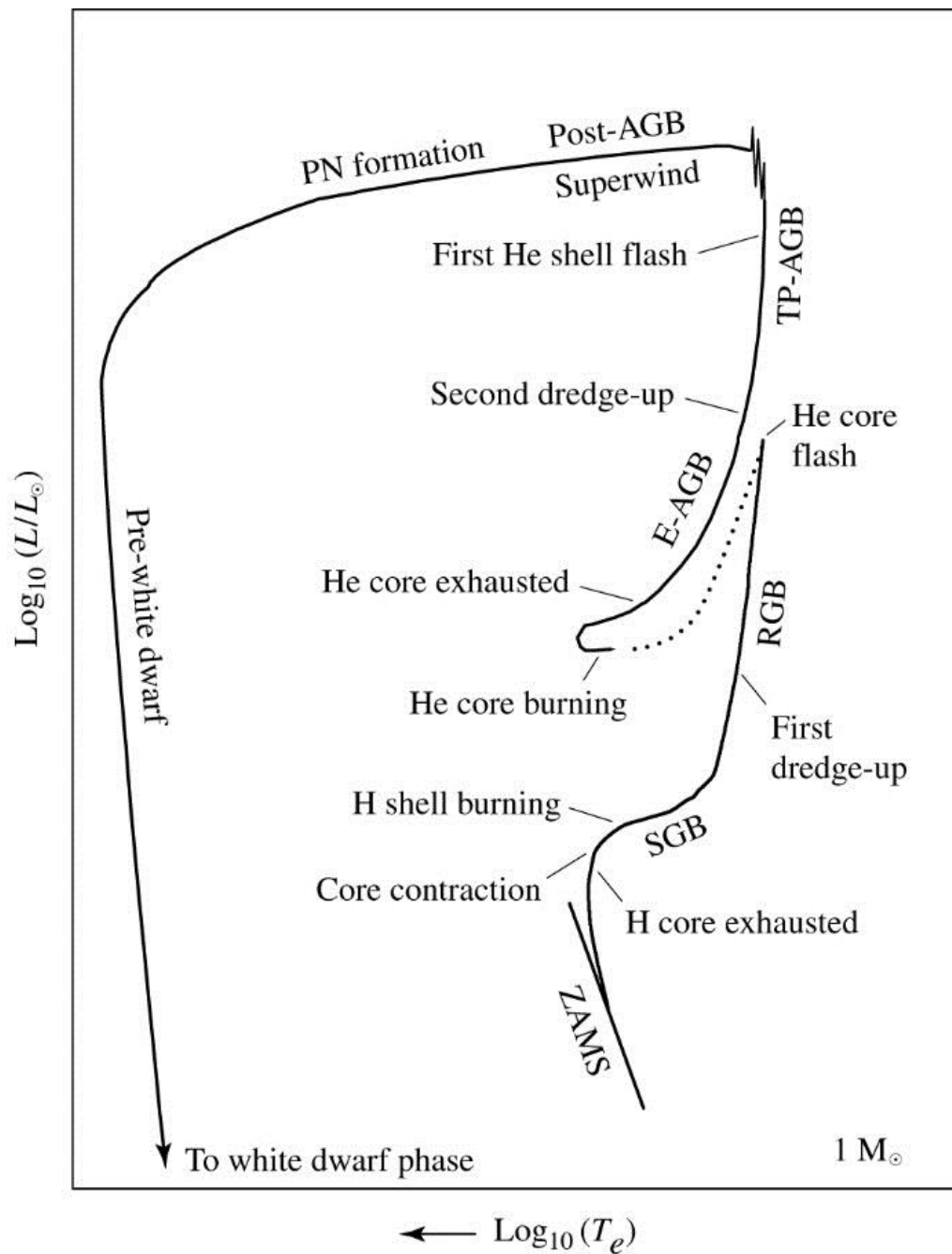
Povećava se srednja molekulska težina fuzijom helija u ugljik/kisik → kontrakcija jezgre → ekspanzija i hlađenje vanjskih dijelova → **ISCRPLJIVANJE HELIJA U SREDIŠTU, PRESTANAK NUKLEARNIH REAKCIJA** → kontrakcija CO jezgre → daljnje širenje vanjskih slojeva zvijezde

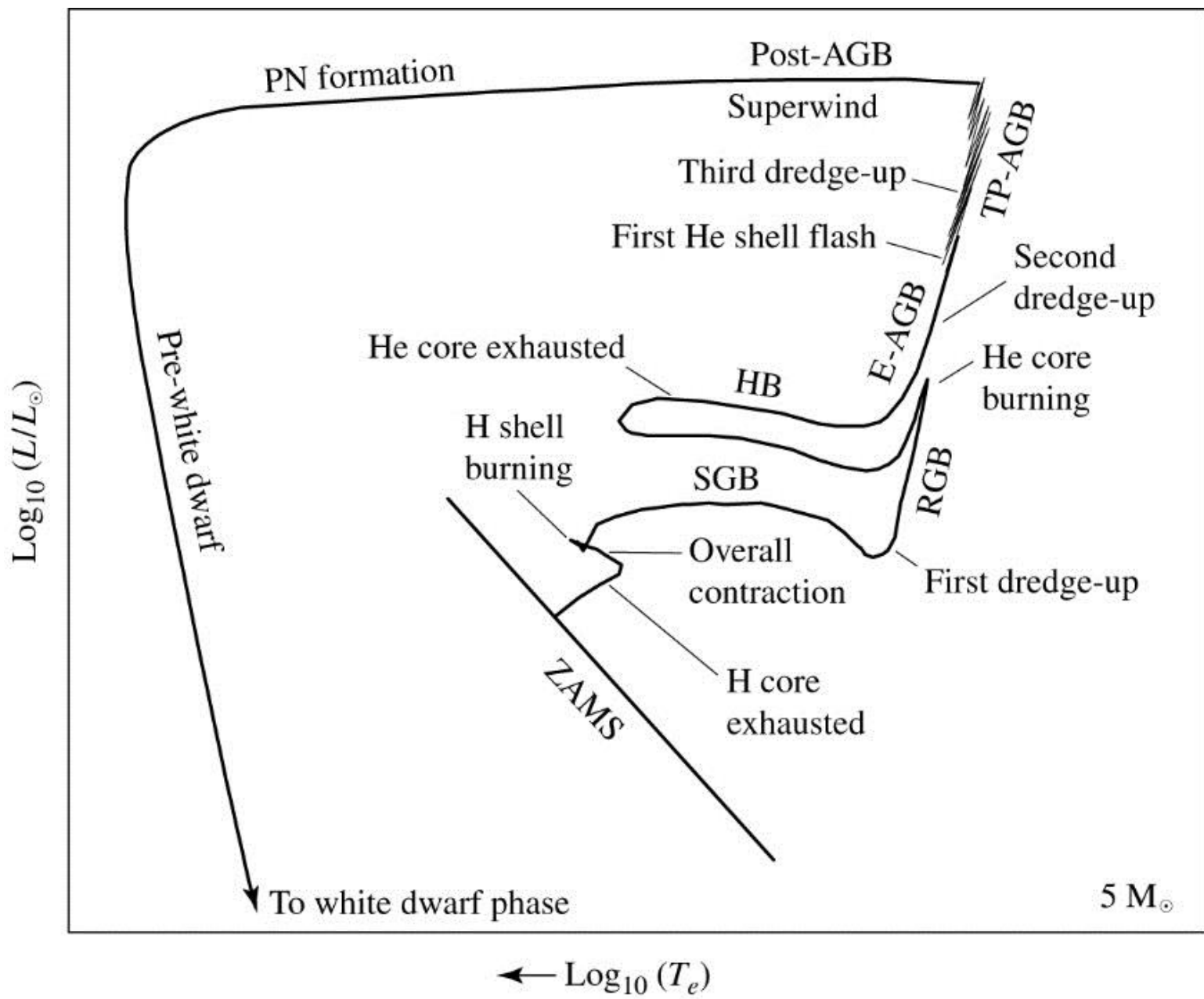
NESTABILNOSTI: periodične **PULZACIJE**

Promjene luminoziteta, temperature radijusa

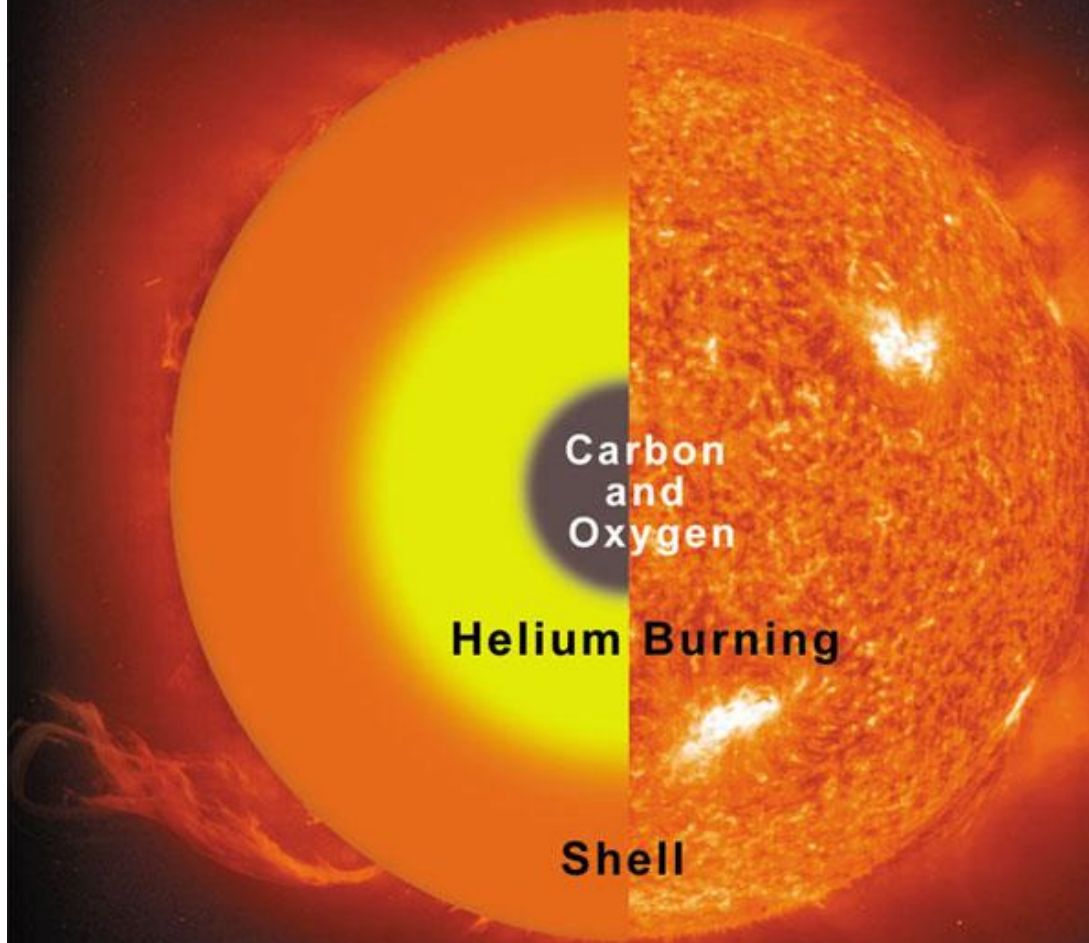
Promjenjive zvijezde: **CEFEIDE**
RR LYRAE

FAZA GORENJA HELIJA U LJUSCI + NEAKTIVNA CO JEZGRA → ekspanzija i hlađenje vanjskih slojeva





Red Giant Star



Grana asimptotskih divova (AGB)

FAZA GORENJA HELIJA U LJUSCI

$5 M_{\text{Sun}}$; $2 \cdot 10^8 \text{ K}$; $\approx 10^9 \text{ kg/m}^3$

Kontrakcija jezgre + širenje vanjskih slojeva \rightarrow povećanje efikasnosti prijenosa energije \rightarrow **NAGLO POVEĆANJE LUMINOZITETA I RADIJUSA \rightarrow ASIMPTOTSKI DIV**

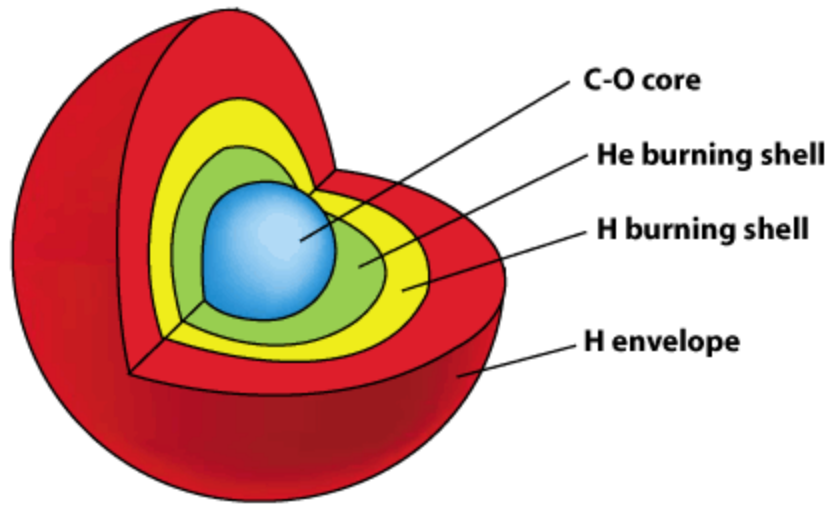
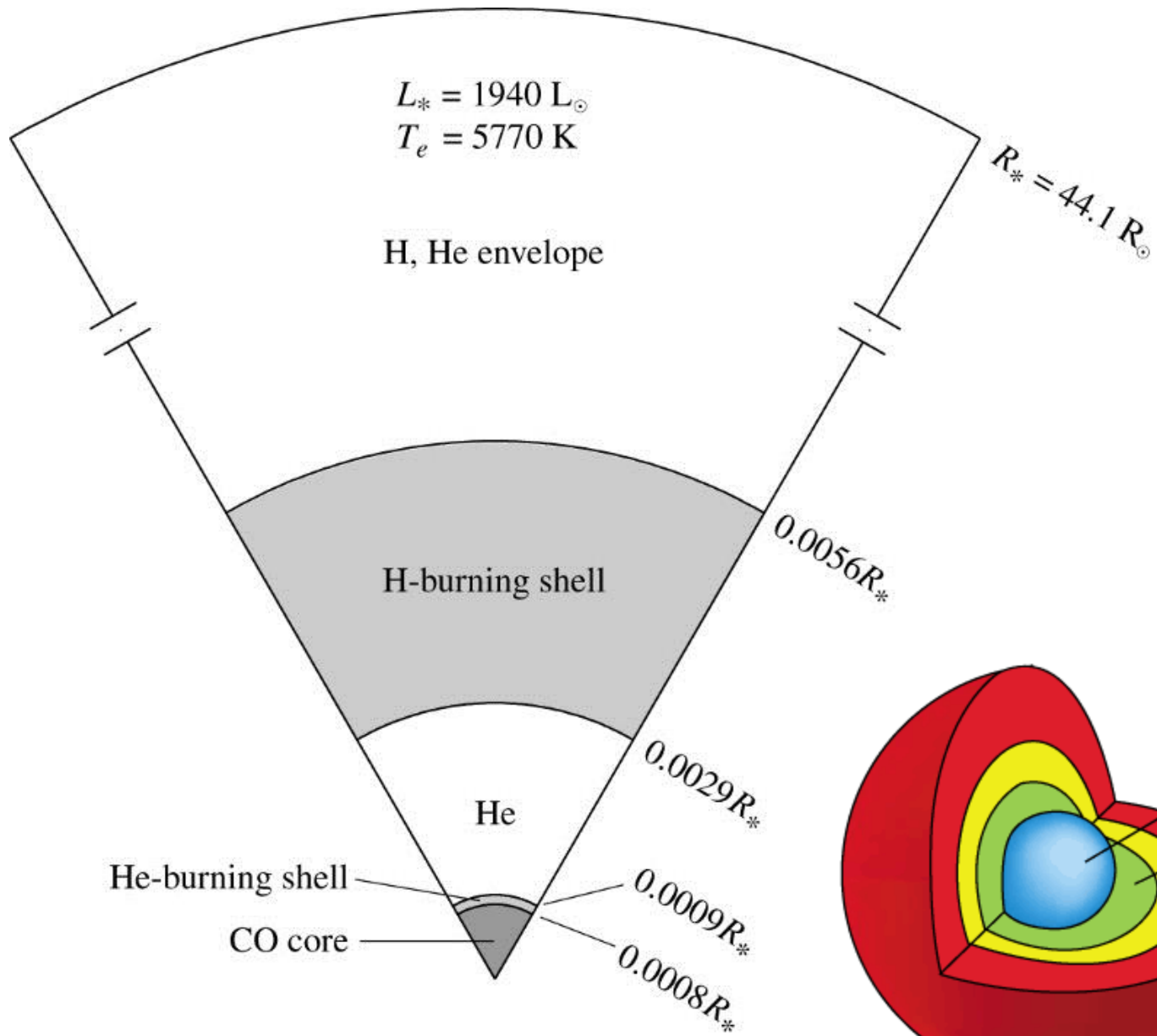
STRUKTURA ZVIJEZDE:

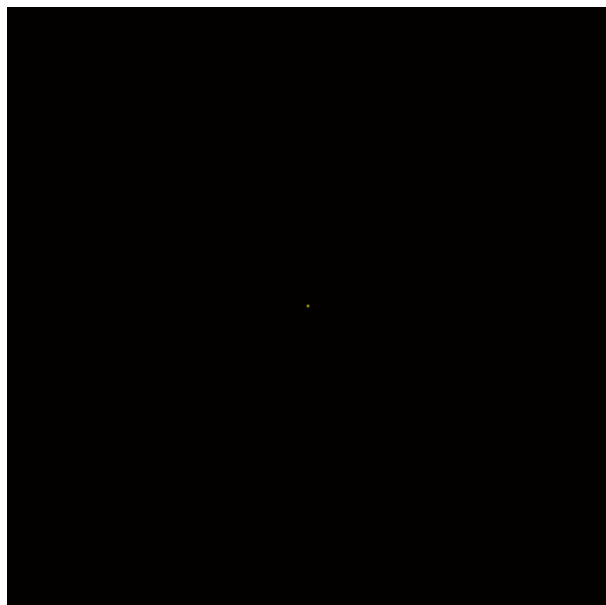
- 1. NEAKTIVNA CO JEZGRA**
- 2. HELIJEVA LJUSKA**
- 3. VODIKOVA LJUSKA**

Područje **PULZACIJSKIH NESTABILNOSTI**

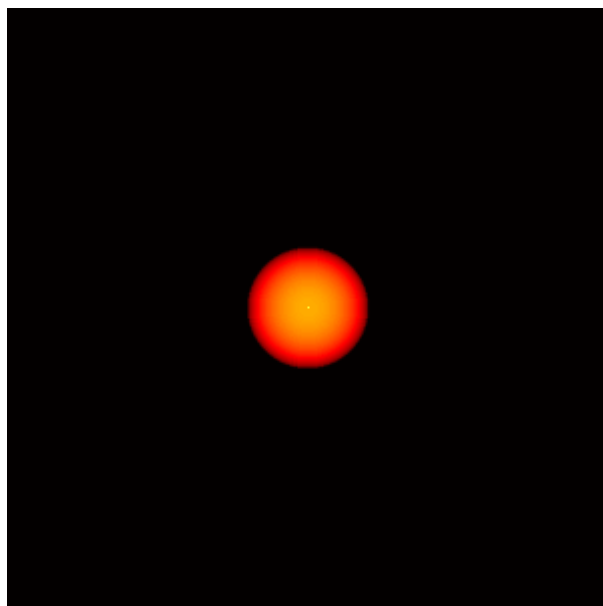
\Rightarrow **DUGOPERIODIČNE PROMJENJIVE ZVIJEZDE**
(LPV, periodi 100-700 dana)

PROMJENJIVE ZVIJEZDE TIPA MIRA (period oko 350 dana)

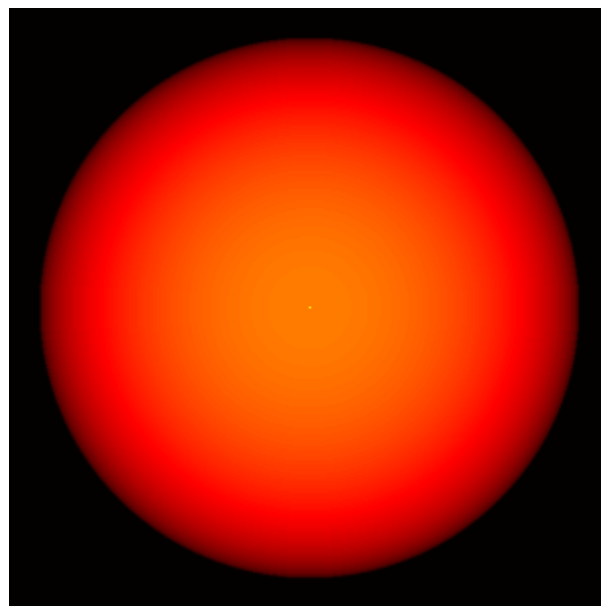




GLAVNI NIZ (MS)



CRVENI DIV (RGB)



ASIMPTOTSKI DIV (AGB)

MIJEŠANJE zvjezdanog materijala tijekom evolucije: transport ugljika iz unutrašnjosti na površinu \Rightarrow **UGLJIČNE ZVIJEZDE** (carbon stars):

- C spektralni tip
- bogate SiC

Gubitak mase i evolucija AGB zvijezda

Sudbina AGB zvijezda je određena **GUBITKOM MASE**, a ne dostupnošću nuklearnog goriva

Gubitak mase: $\approx 10^{-6} M_{\text{Sun}}/\text{godina}$

Efektivna temperatura: oko 3000 K (hladne, crvene zvijezde) \rightarrow formiraju se zrna prašine i ovojnica plina i prašine

SUDBINA AGB ZVIJEZDA: malih masa $M < 8 M_{\text{Sun}}$
velikih masa $M > 8 M_{\text{Sun}}$

Ljuska u kojoj gori helij proizvodi sve više ugljika i kisika → raste masa CO jezgre → kontrakcija jezgre → povećanje gustoće → elektronska degeneracija → CO jezgra postaje **degenerirana**

$M < 8 M_{\text{Sun}}$ → CO jezgra nikada ne dostigne temperaturu potrebnu za slijedeću fazu nuklearnog gorenja (fuzije)

$M = 4 - 8 M_{\text{Sun}}$ → daljnje gorenje ugljika i kisika u središtu → nastanak **kisik-neon-magnezij jezgre (ONeMg)**

Luminozitet i polumjer rastu → **PORAST GUBITKA MASE** → OH/IR zvijezde

OH/IR zvijezde → AGB zvijezde uronjene u gusti oblak plina i prašine

Post-AGB faza

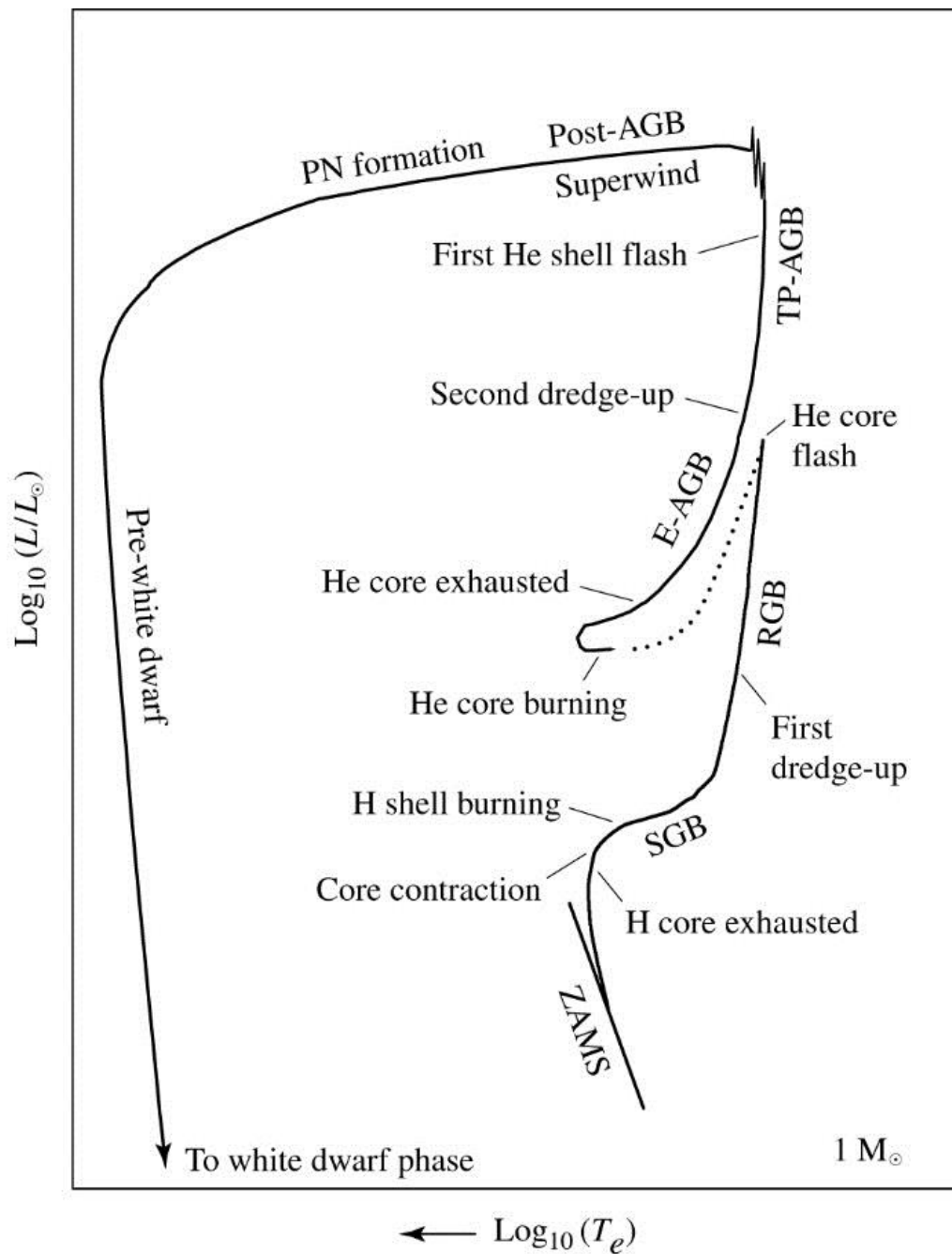
Oblak oko OH/IR zvijezda ekspandira i postaje proziran → E ili G
SUPERDIV

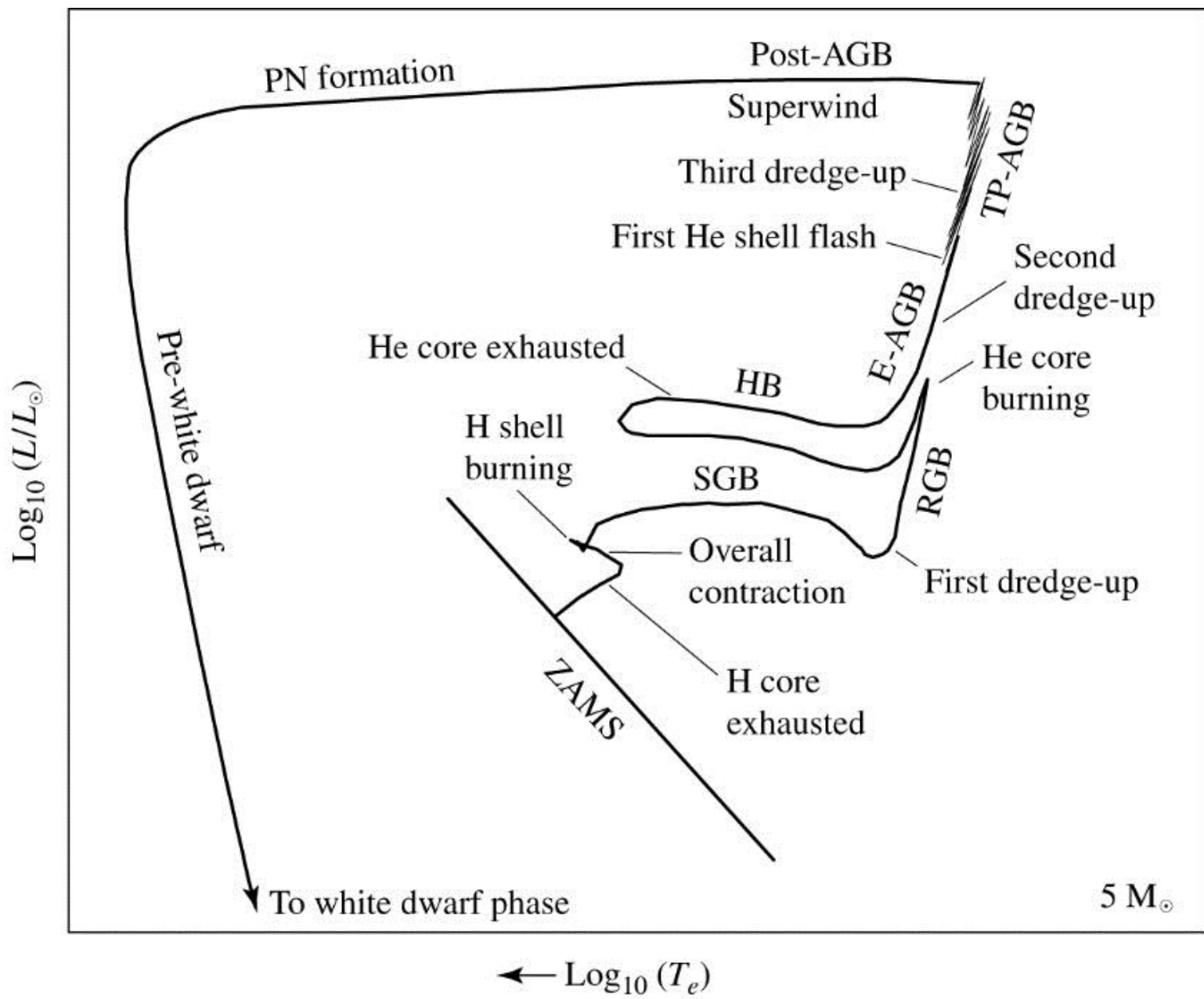
ZVIJEZDA ODBACUJE PREOSTALE VANJSKE SLOJEVE →
prestanak nuklearnih reakcija → **LUMINOZITET ZNATNO PADA**

BIJELI PATULJAK → preostalo vruće, kompaktno središte
zvijezde

BIJELI PATULJAK je **DEGENERIRANA CO JEZGRA** crvenog diva,
vrlo vruća (ONeMg jezgra kod masivnijih zvijezda)

Bijeli patuljak se **HLADI** milijardama godina (problem primordijalnih
bijelih patuljaka, zvijezda prve generacije)





Post-AGB faza

PLANETARNA (PN) MAGLICA

- Ekspandirajuća ovojnica plina koja se širi oko bijelog patuljka, ostaci izbačenog materijala sa zvijezde

ZAŠTO SVIJETLI?

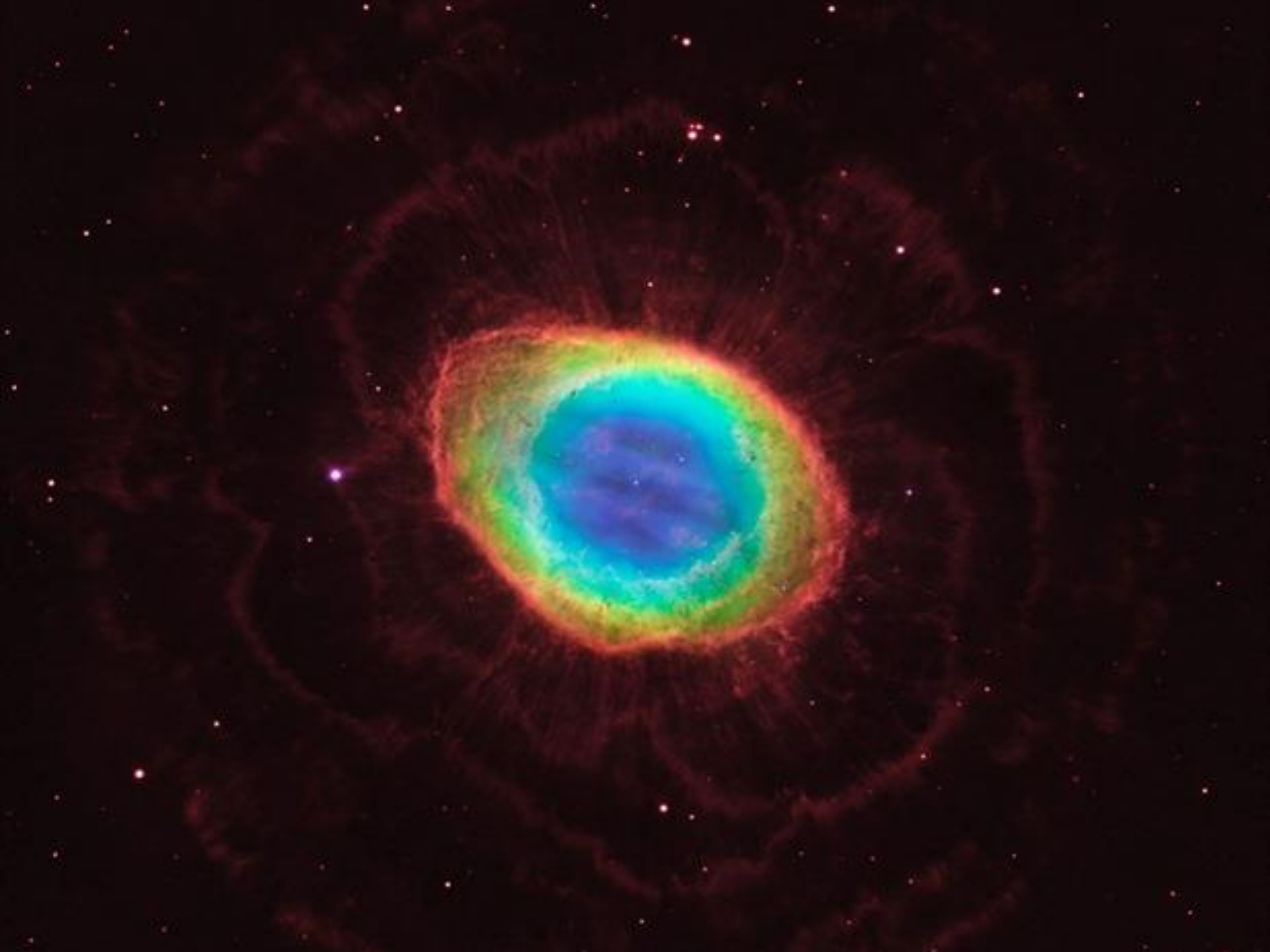
UV zračenje (vrući bijeli patuljak) → apsorpcija u plinu u maglici → pobuđeni ili ionizirani atomi → emisija fotona u vidljivom dijelu spektra

ZABRANJENE LINIJE [O III] plavo-zeleno (oko 500 nm)

Složena morfologija → asimetrični izbačaji (npr. Helix maglica)

Starost: 10 000 – 50 000 godina

1500 poznatih PN (oko 150 000 u galaksiji)



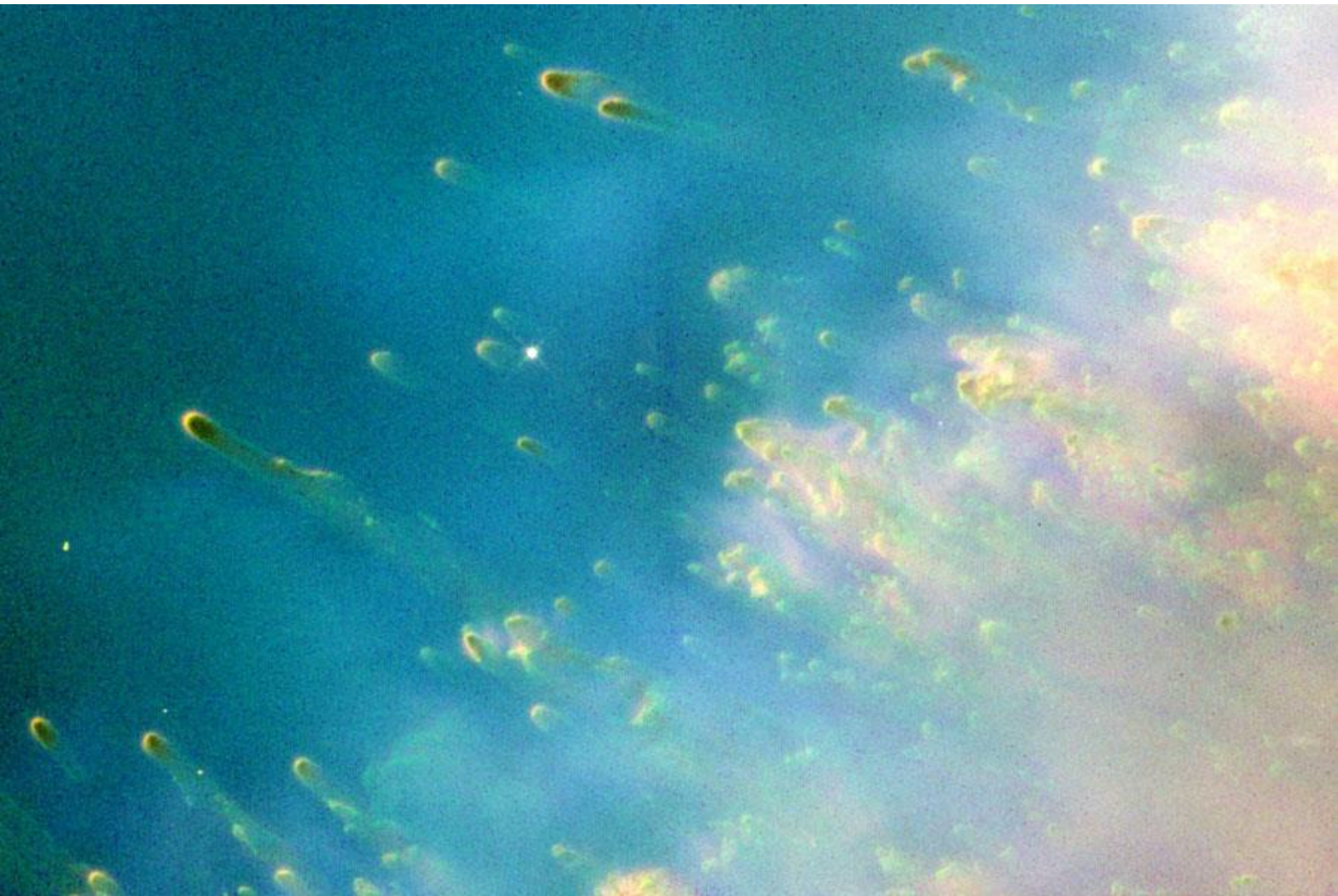


The Helix Nebula — NGC 7293



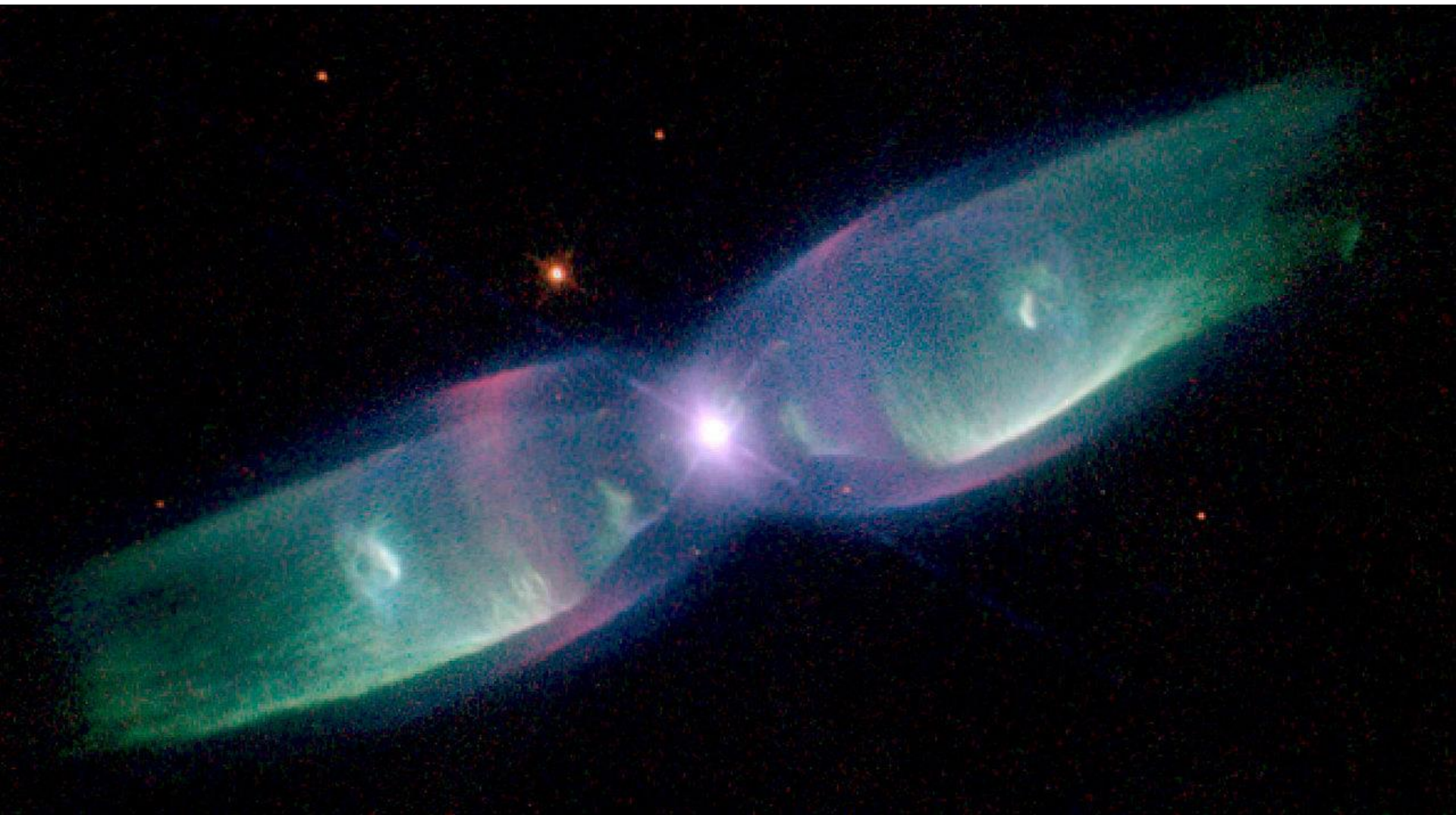
HUBBLESITE.org





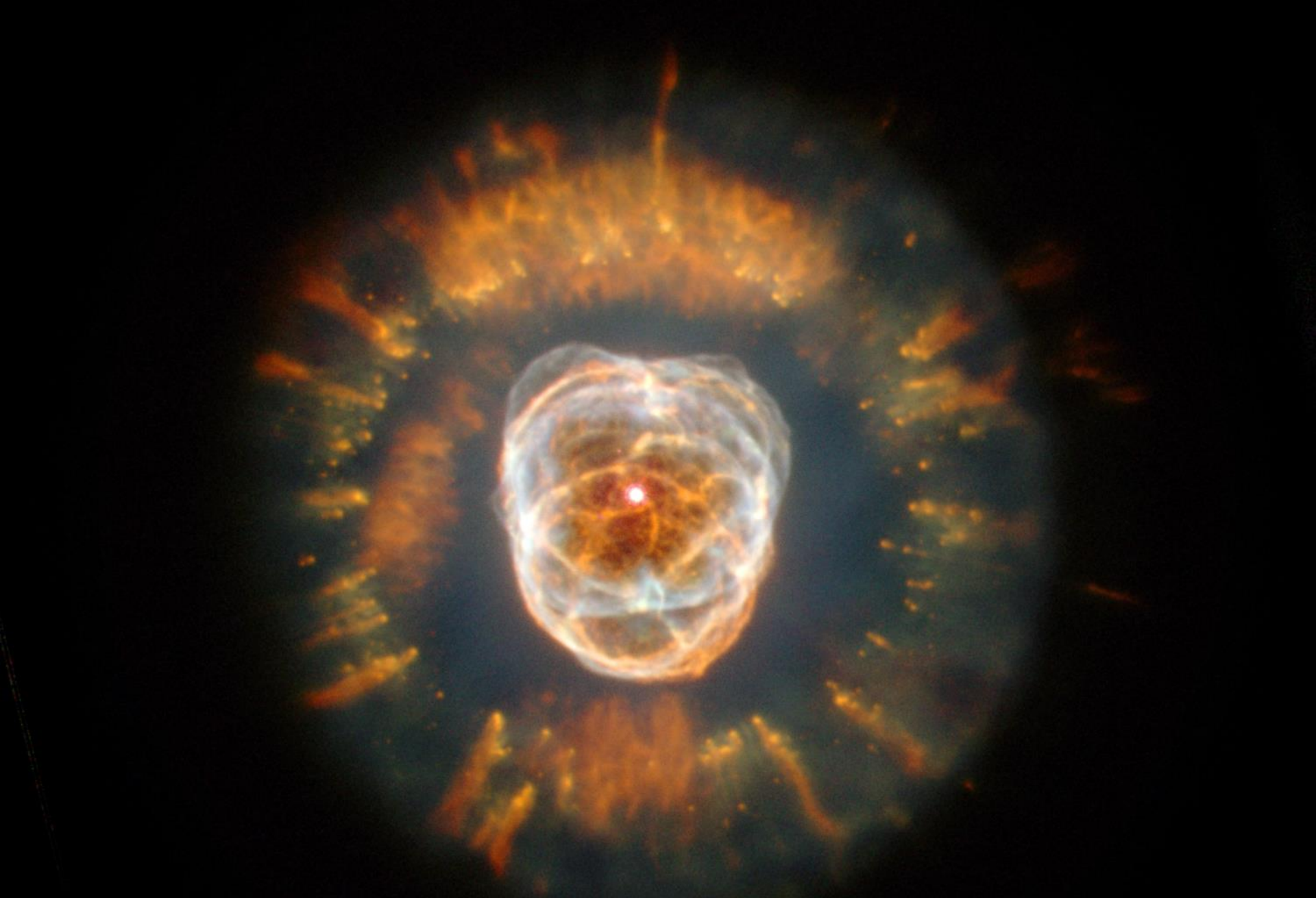






Planetary Nebula Mz 3





Eskimo maglica



Dumbbell maglica

Bijeli patuljci

Bessel (1844) – teorijsko predviđanje komponente dvojnog sustava
Sirius (**Sirius B**)

Clark (1862) – otkriće Siriusa B → prvi bijeli patuljak ($0.03 L_{\text{Sun}}$)

	SIRIUS	SIRIUS B
L	23.5	$0.03 L_{\text{Sun}}$
T_{eff}	9910 K	27000 K
R		$0.008 R_{\text{Sun}}$ (veličine Zemlje)
ρ		$3 \cdot 10^9 \text{ kg/m}^3$

16 tona u čajnoj žličici!

BIJELI PATULJAK → preostalo vruće, kompaktno središte
zvijezde

BIJELI PATULJAK je **DEGENERIRANA CO JEZGRA** crvenog diva,
preostalo vruće kompaktno središte jezgre

Bijeli patuljci

Svojstva bijelog patuljka:

VRUĆA zvijezda (10 000 – 40 000 K)

MALI LUMINOZITETI (0.01 – 0.1 L_{Sun})

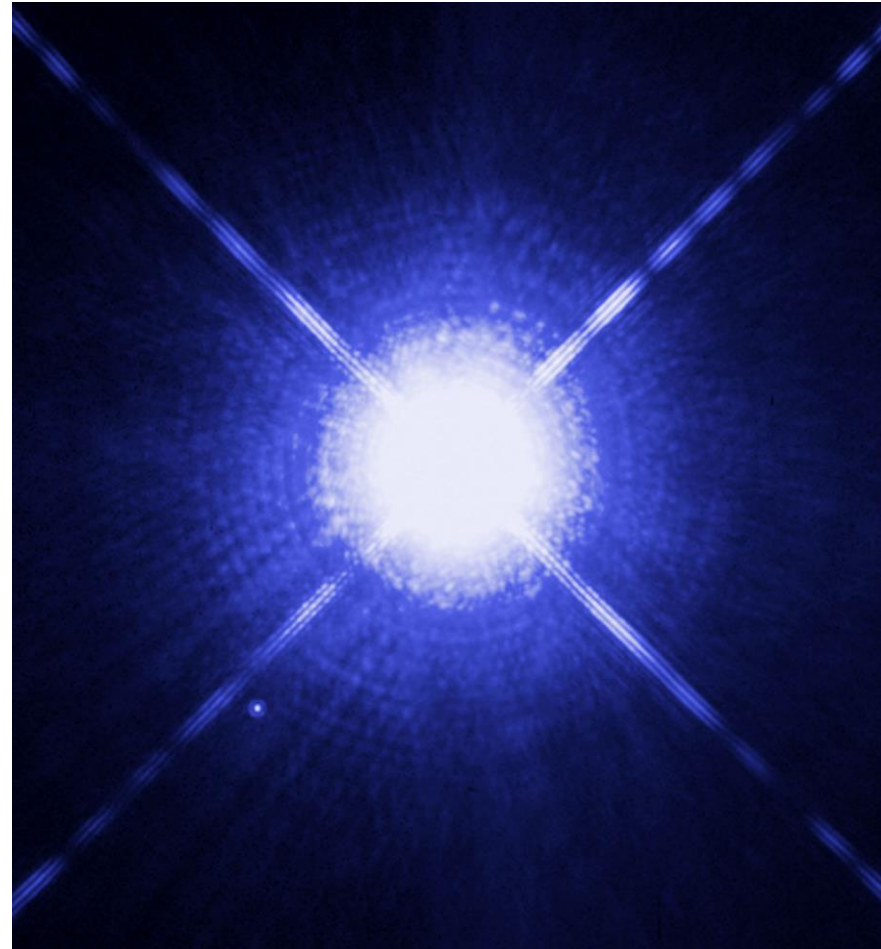
KOMPAKTNI objekti (oko 0.01 R_{Sun} ,
veličine Zemlje do Jupitera)

Mase 0.4 – 0.7 M_{Sun}

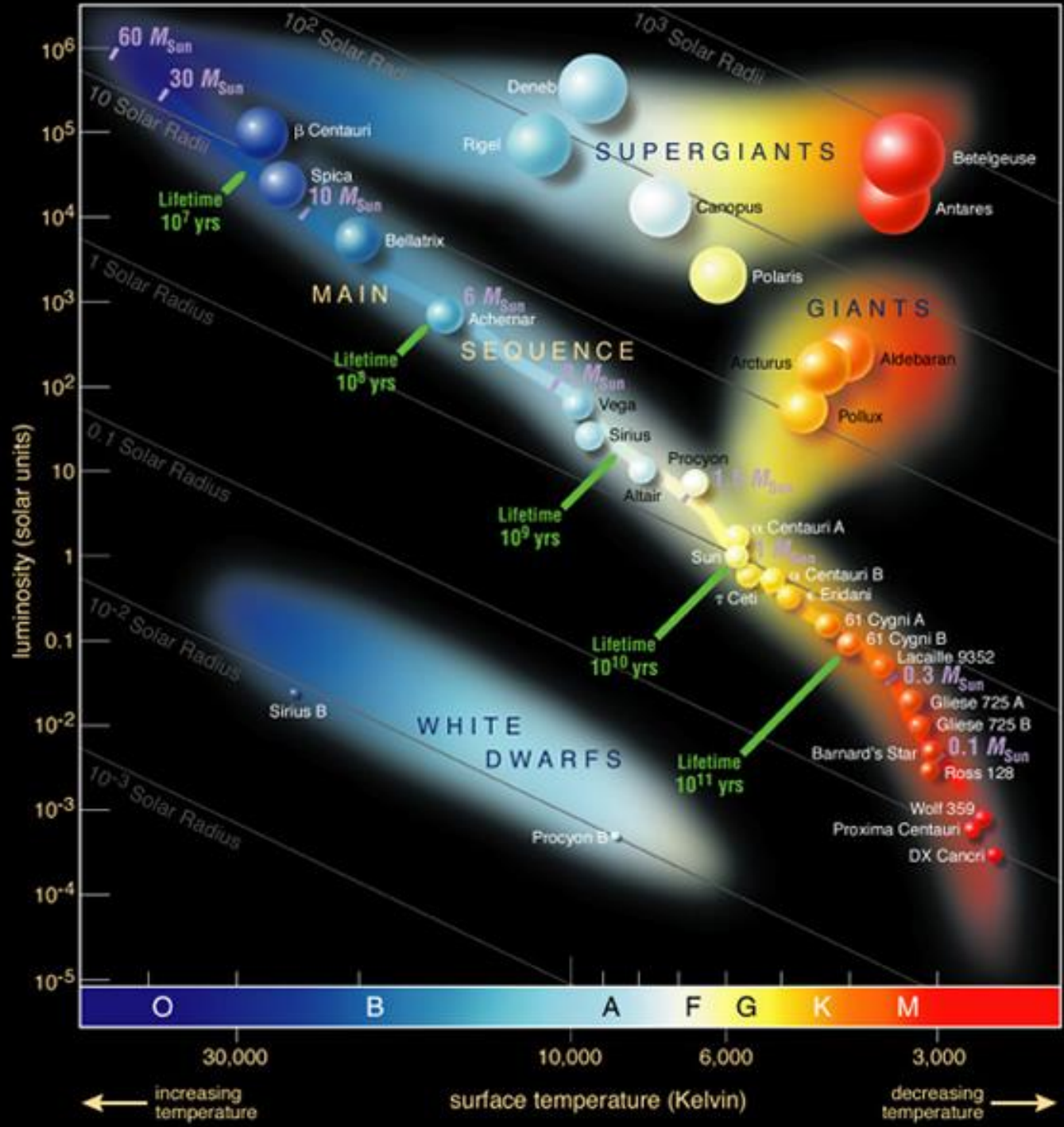
DEGENERIRANI ELEKTRONSKI
PLIN:

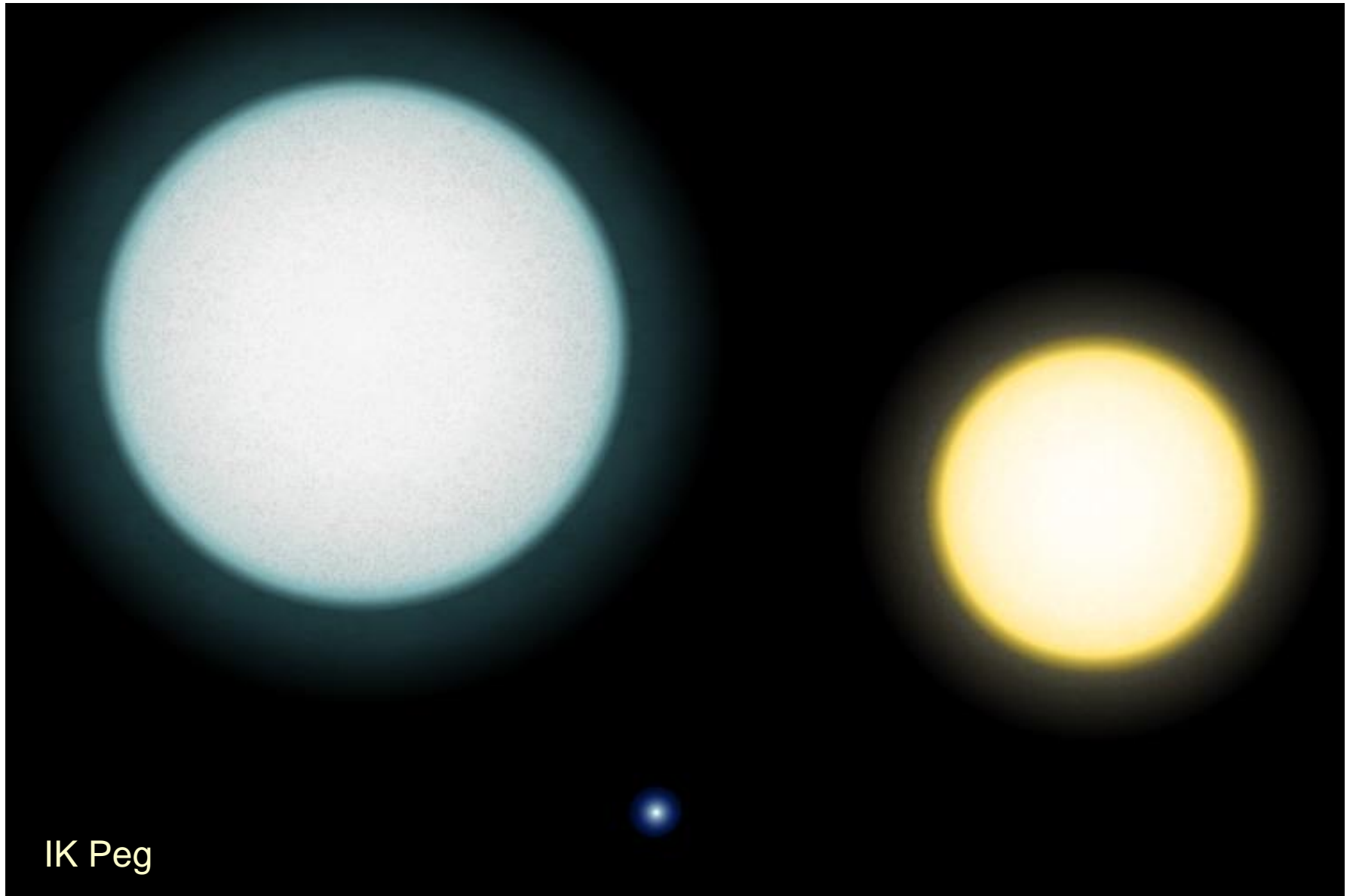
$$P_e \propto \rho^{5/3}$$

Tlak degeneriranog elektronskog plina
za Sirius B: $P_e \approx 1.9 \cdot 10^{22}$ Pa



Tlak elektronske degeneracije održava hidrostatsku ravnotežu u bijelom patuljku!





IK Peg

Chandrasekharova granica

NAJVEĆA MASA BIJELOG PATULJKA u kojem degenerirani elektronski plin može održavati hidrostatsku ravnotežu

$$M_{\text{Ch}} = 1.44 M_{\text{Sun}}$$

MASA > M_{Ch} → GRAVITACIJSKI KOLAPS

Ne postoje bijeli patuljci mase veće od $1.44 M_{\text{Sun}}$!

- Nemaju izvor energije
- Dugotrajno hlađenje
- Energija od kinetičke energije jezgara

Masivne zvijezde

η Carinae

- vrlo aktivna zvijezda
- mijenja sjaj (i do -1 mag 1837) → **ERUPCIJA**
- vrlo aktivna zvijezda, veliki gubitak mase
- luminozitet **5 000 000 do 20 000 000 L_{Sun}**
- T_{eff} oko 30 000 K

P Cyg, S Doradus (LMC)

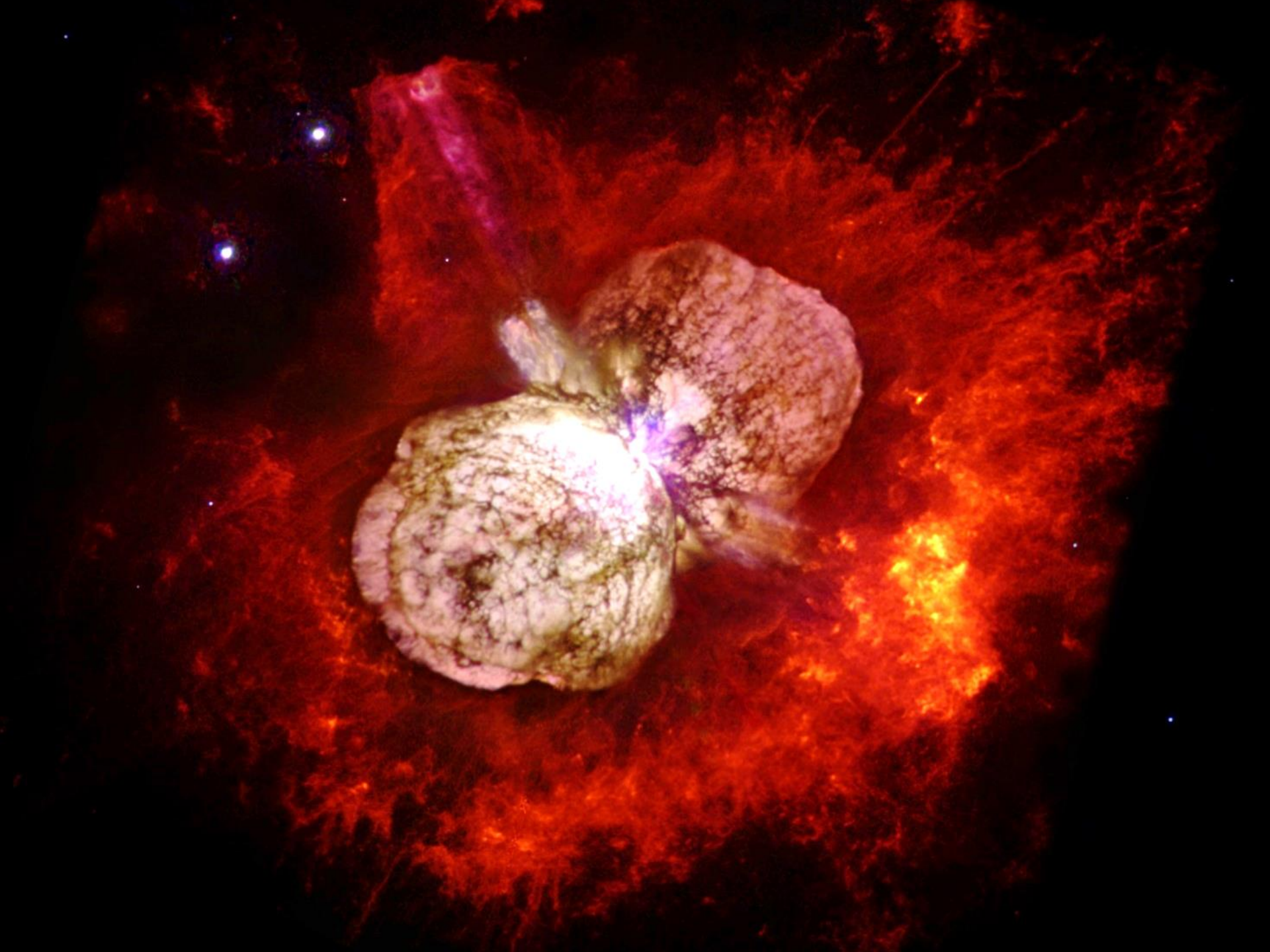
LUMINOZNE PLAVE PROMJENJIVE (LBV) zvijezde

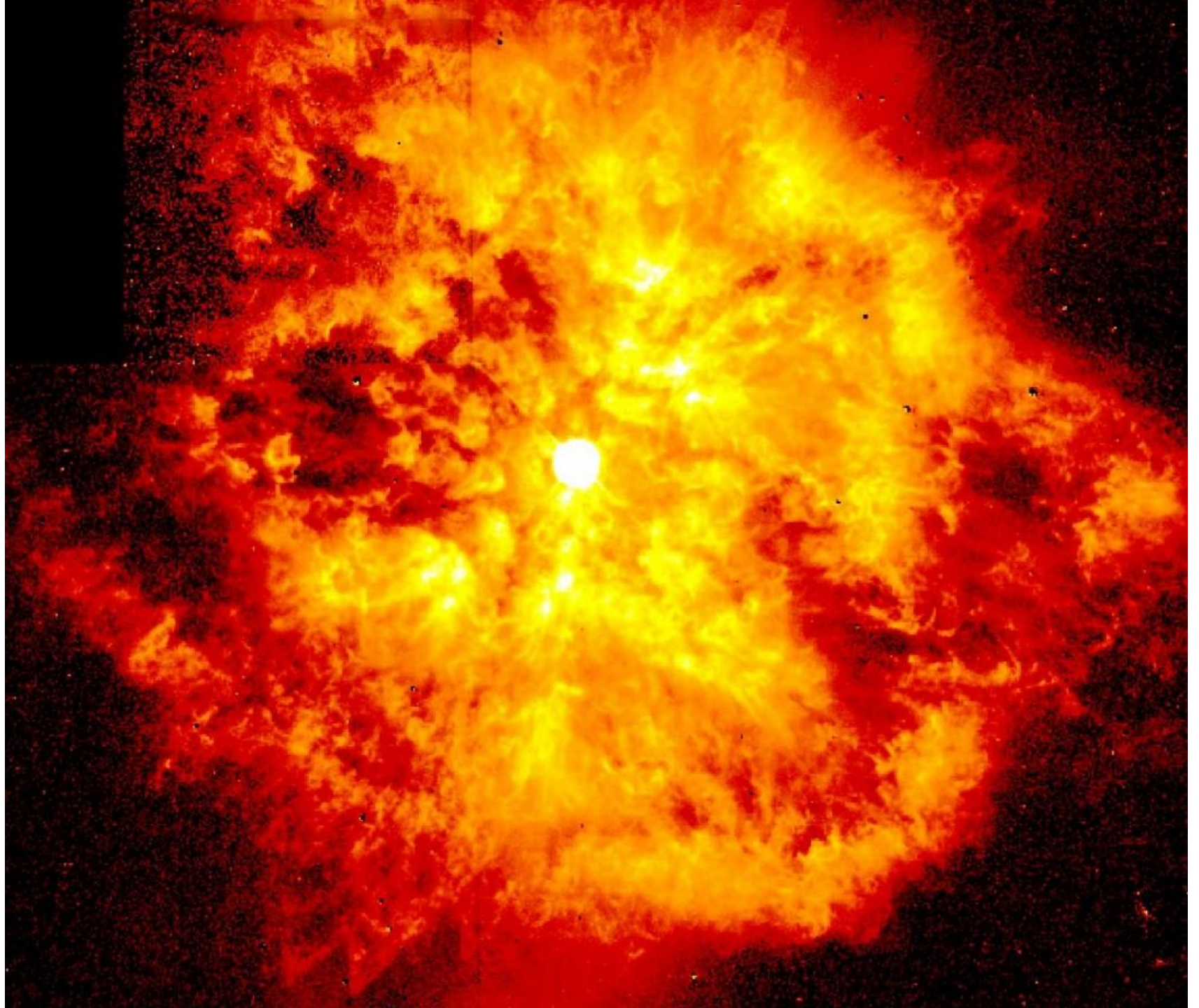
RAZVIJENE, VRLO MASIVNE ZVIJEZDE (oko 85 M_{Sun} i više)

Na granici mogućeg luminoziteta!

WOLF-RAYET ZVIJEZDE

- Vrlo vruće zvijezde 25 000 – 100 000 K
- Manje mase (oko 20 M_{Sun}), veliki gubitak mase





EVOLUCIJSKA SHEMA MASIVNIH ZVIJEZDA

- 10 – 20 M_{Sun} : crveni superdiv → plavi superdiv → supernova
- 20 – 40 M_{Sun} : crveni superdiv → Wolf-Rayet → supernova
- 40 – 85 M_{Sun} : Wolf-Rayet → supernova
- > 85 M_{Sun} : LBV → Wolf-Rayet → supernova

SUPERNOVE

Supernova 1006. (SN1006) → $m_v = -9$

4.7.1054. → **RAKOVA MAGLICA**

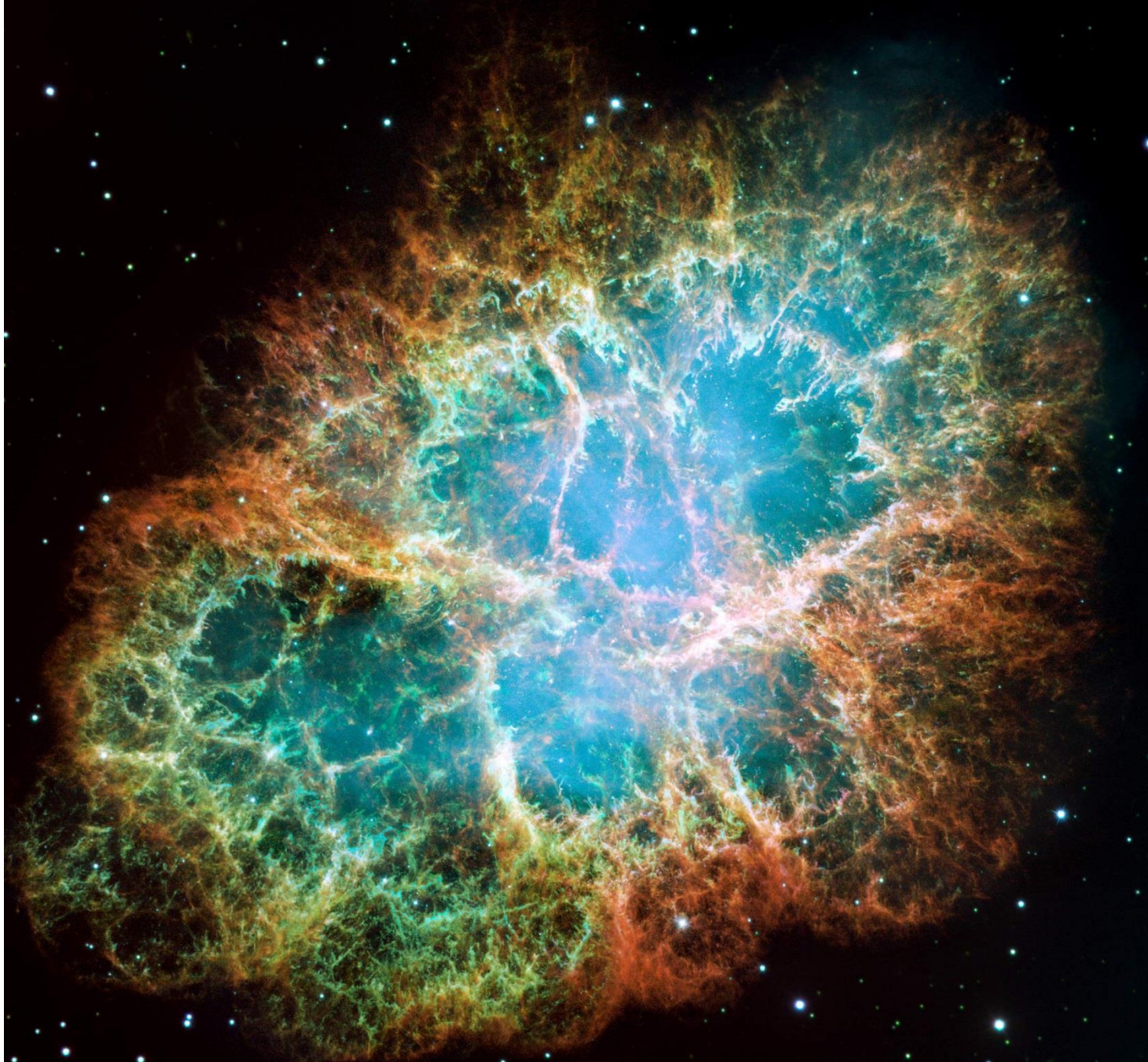
SN1572 → **TYCHOVA SUPERNOVA**

SN1604 → **KEPLEROVA SUPERNOVA**

SN1987A → supernova u Magellanovom oblaku (50 kpc)

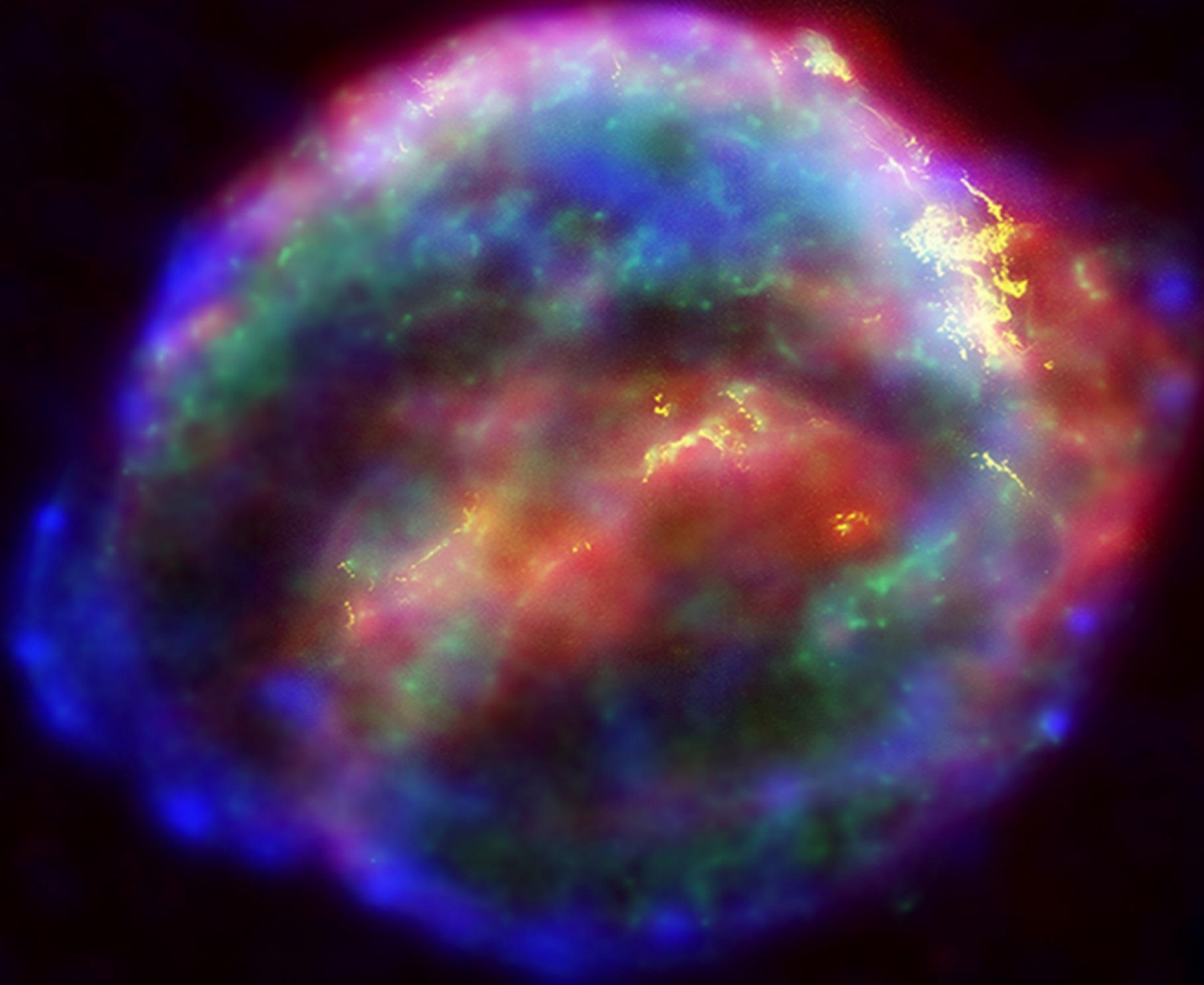
SUPERNOVA → **KOLAPS** zvijezde koji vodi do njenog uništenja

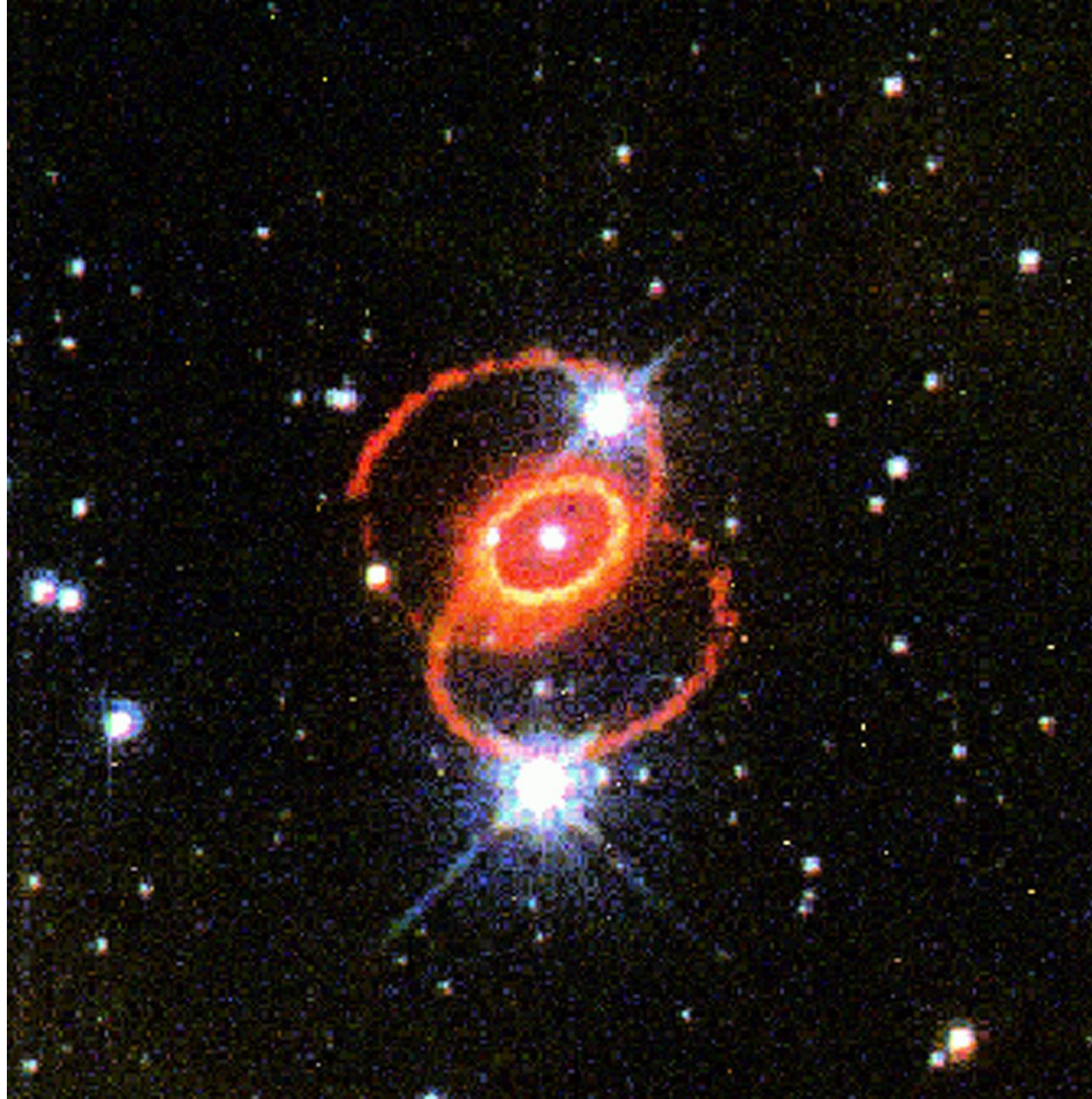
- Vrlo rijetki događaji



Rakova maglica

SN 1604









SN1994

KLASIFIKACIJA SUPERNOVA

TIP I SN (Ia, Ib, Ic) → zvijezdi nedostaju vanjski slojevi bogati vodikom
→ tipične svjetlosne krivulje i apsolutni maksimalni sjaj

TIP II SN → brza ekspanzija i porast luminoziteta
→ Rakova maglica, SN1987A

Supernova s kolapsom jezgre (tip Ib, Ic, II)

OGROMNA KOLIČINA OSLOBOĐENE ENERGIJE → 10^{46} J

$$M > 8 M_{\text{Sun}}$$

Nuklearni niz: vodik → helij → ugljik/kisik

Vrlo visoke temperature u središtu masivnih zvijezda → ugljik i kisik također mogu gorjeti (**FUZIJA U TEŽE ELEMENTE DO ŽELJEZA**)

UGLJIK → NEON/KISIK → SILICIJ → ŽELJEZO

SILICIJ na temperaturi oko $3 \cdot 10^9$ K → **FUZIJA** u teške jezgre oko **ŽELJEZA** → nastanak **ŽELJEZNE JEZGRE**

**MASIVNA RAZVIJENA JEZGRA ZVIJEZDE → STRUKTURA
LJUSAKA LUKA**

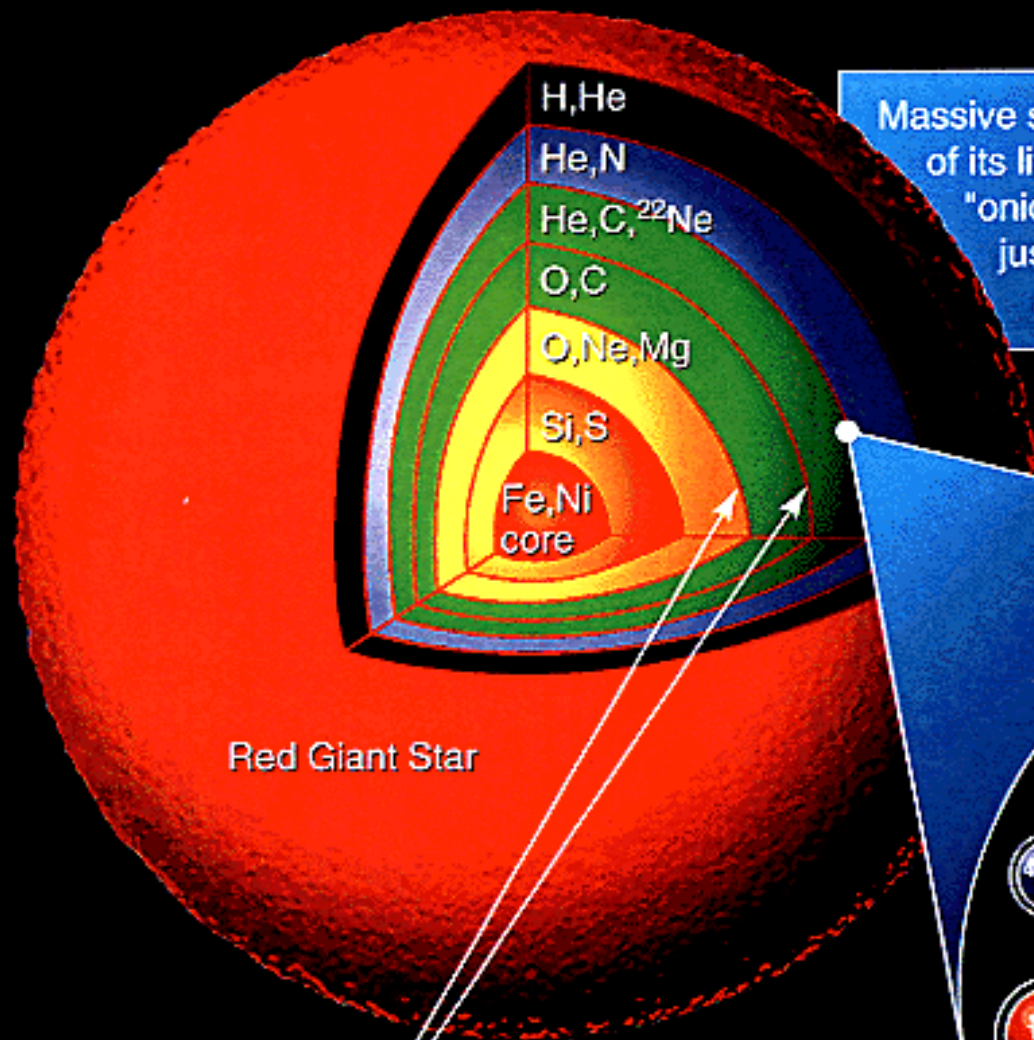
**TLAK DEGENERIRANOG ELEKTRONSKOG PLINA
NEDOVOLJAN ZA URAVNOTEŽENJE GRAVITACIJSKOG
KOLAPSA → vrlo BRZ KOLAPS JEZGRE (slobodan pad)**

Izvor energije supernove → **GRAVITACIJSKI KOLAPS**

PAULIJEV PRINCIP ISKLJUČENJA ZA NEUTRONE zaustavlja kolaps

Kolaps se odbija od jezgre → formira se udarni šok – valovi tlaka koji se šire prema van → šok uništava zvijezdu i izbacuje materijal prema van

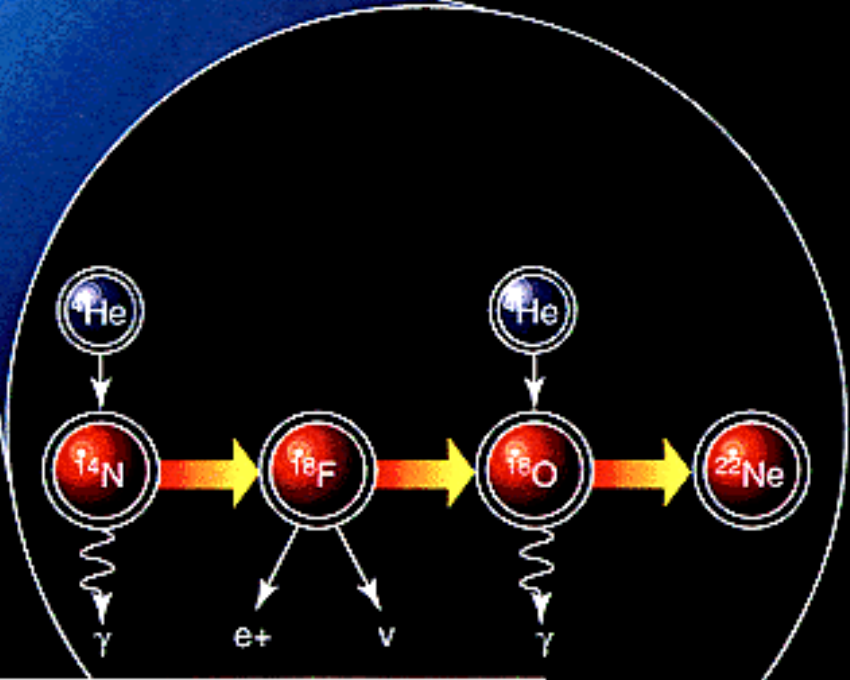
Energija zračenja → 10^{42} J → $10^9 L_{\text{Sun}}$
sjaj usporediv sa sjajem cijele galaksije



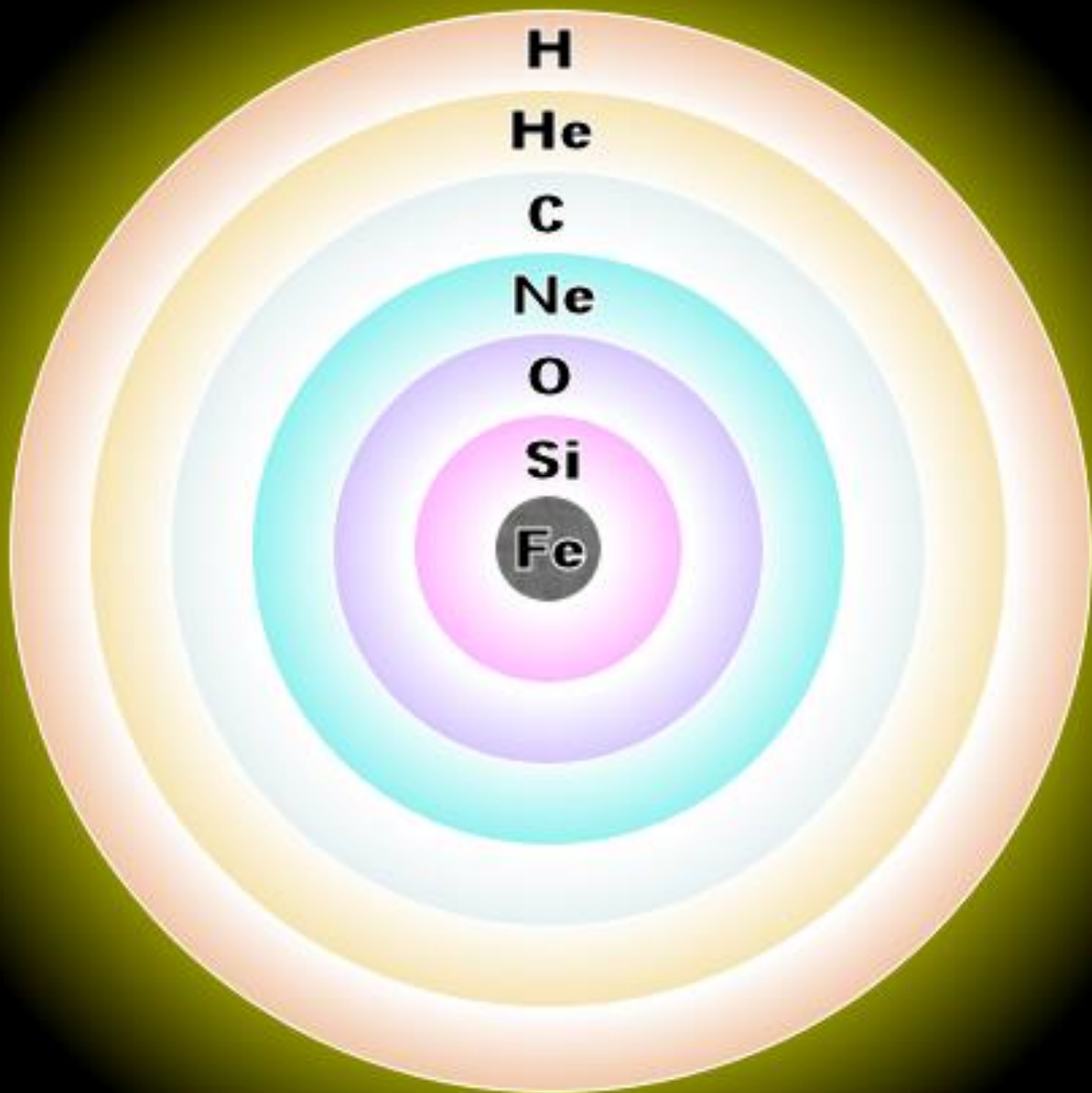
Massive star near the end of its lifetime has an "onion-like" structure just prior to exploding as a supernova

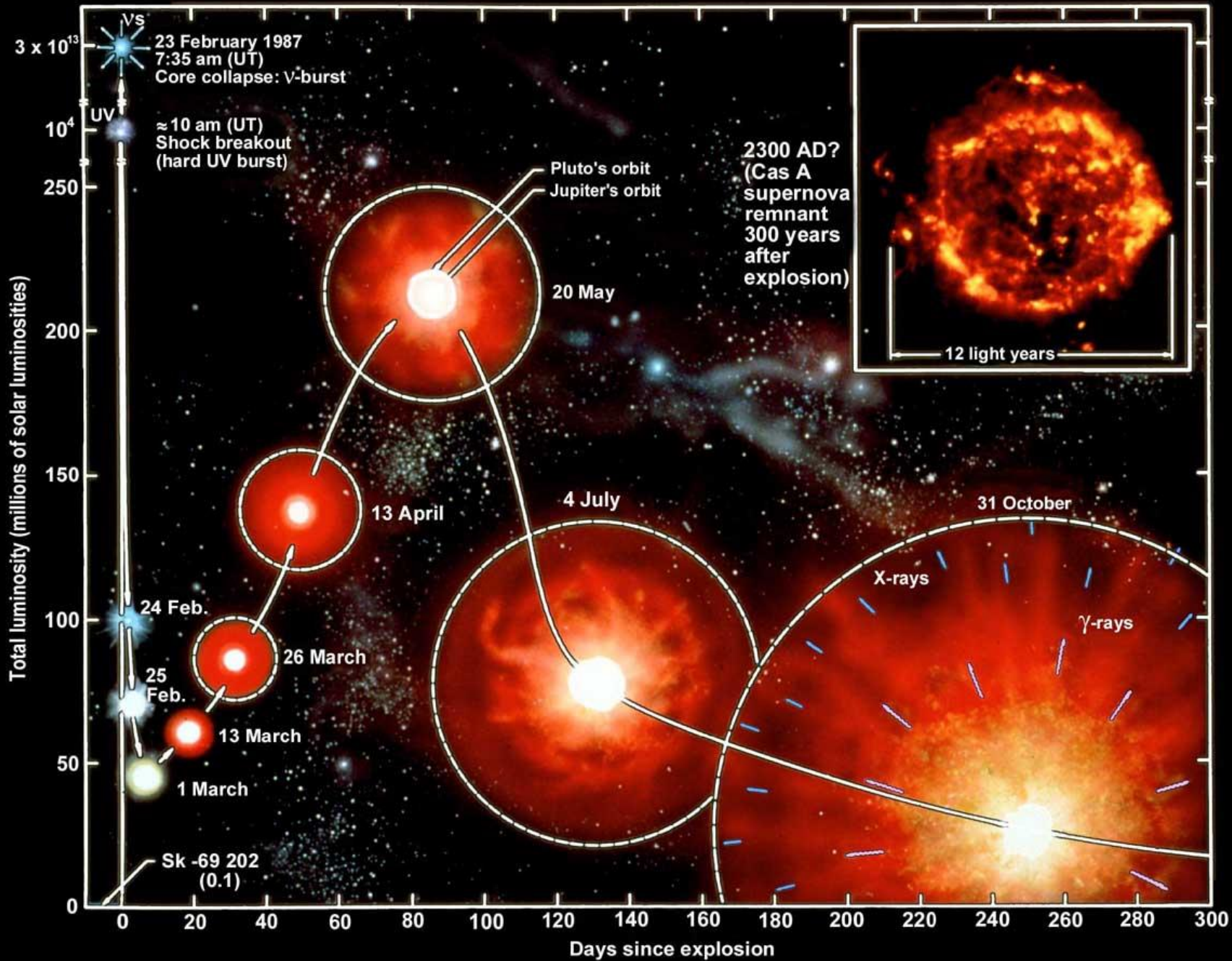
Red Giant Star

Nuclear burning occurs at the boundaries between zones

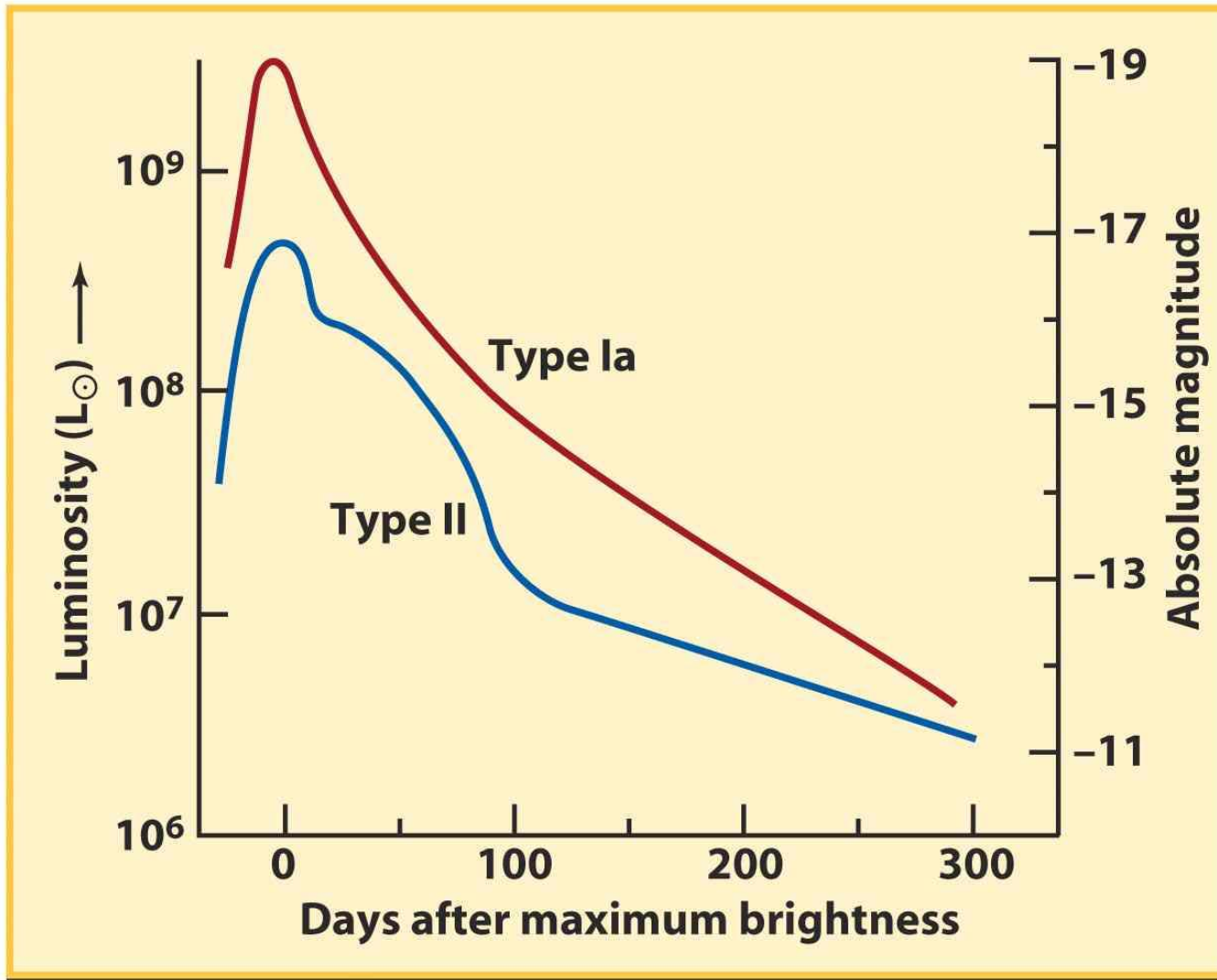


Example of nuclear reactions that build neutron-rich isotopes





SUPERNOVE TIPA Ia STANDARDNE SVIJEĆE za mjerenje kozmoloških udaljenosti



SUPERNOVE TIPA Ia – STANDARDNE SVIJEĆE za mjerenje kozmoloških udaljenosti

1. Oblik svjetlosna krivulje je tipičan za pojedinu klasu supernova
2. Supernove istog tipa postižu uvijek isti luminozitet (apsolutni sjaj) u maksimumu sjaja
3. Poznavanjem apsolutnog sjaja (iz oblika svjetlosne krivulje) i izmjerenog prividnog sjaja odredi se udaljenost:

$$m - M = 5 \log d [\text{pc}] - 5$$

Supernove se uvijek opažaju u galaksijama na različitim udaljenostima

Mjerenje udaljenosti do dalekih galaksija je ključno u određivanju:

1. **kozmoških udaljenosti,**
2. **strukture svemira i**
3. **kozmoških modela**

SUPERNOVE TIPA Ia

Što su i kako nastaju?

DVOJNI ZVJEZDANI SUSTAV:

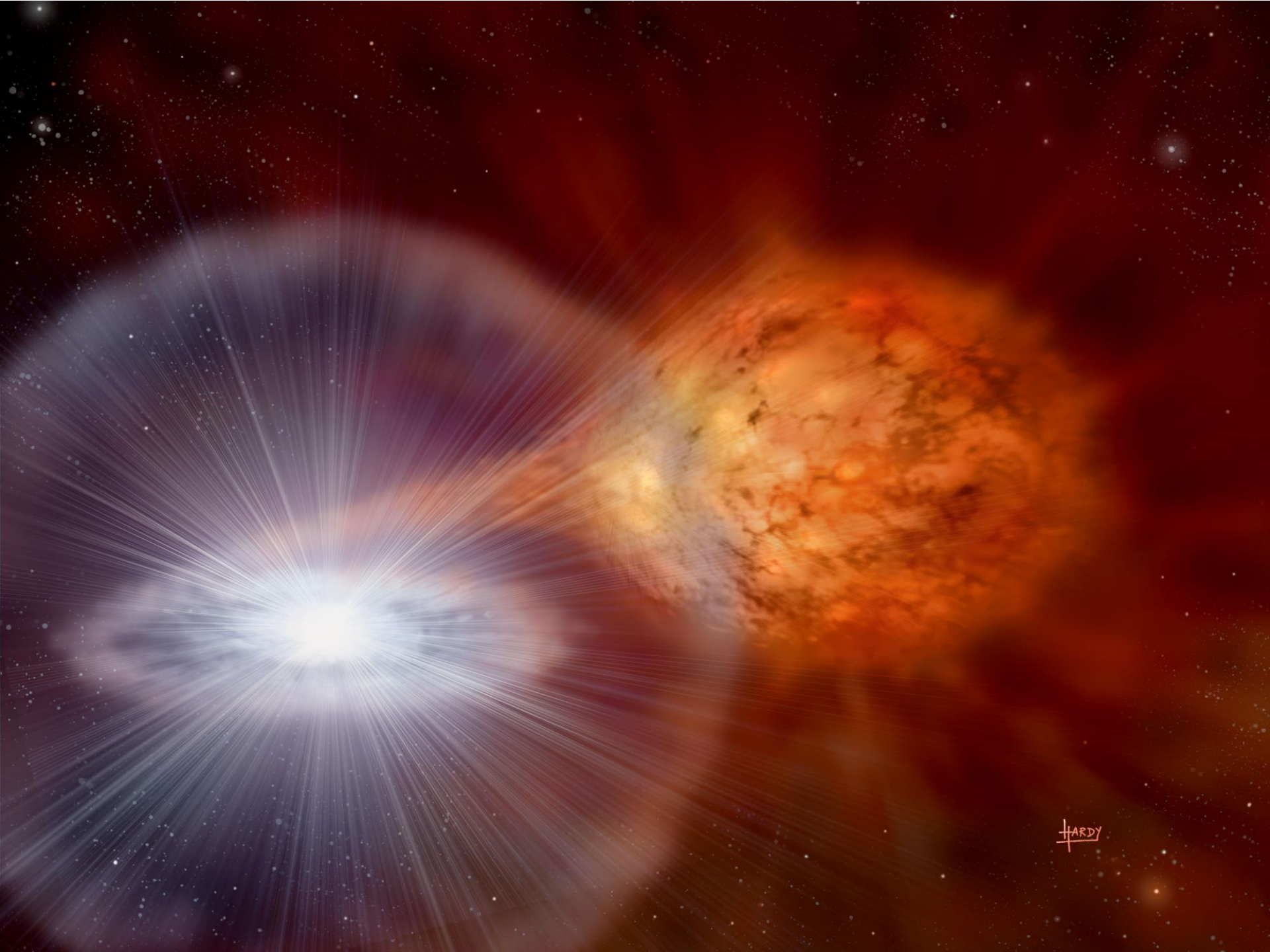
1. Dva bijela patuljka

- svaki bijeli patuljak sam za sebe ima masu manju od Chandrasekharove granice ($M < 1.44 M_{\text{Sun}}$)
- kako gube energiju, orbita im se smanjuje
- stapanje dva bijela patuljka \Rightarrow novoformirani bijeli patuljak ima masu $M > 1.44 M_{\text{Sun}} \Rightarrow$ **gravitacijski kolaps, eksplozija supernove**

1. Bijeli patuljak + div (RGB ili AGB)

- prijenos mase sa diva na bijelog patuljka
- masa bijelog patuljka raste
- kada masa bijelog patuljka dosegne Chandrasekharovu granicu ($M = M < 1.44 M_{\text{Sun}} \Rightarrow$ **gravitacijski kolaps, eksplozija supernove**

GLAVNI KANDIDAT: SIMBIOTSKI SUSTAVI \rightarrow RS Oph



HARDY

Ostaci eksplozije supernove

NEUTRONSKA ZVIJEZDA

- Ostaci unutarnje jezgre masivne zvijezde
- **DEGENERIRANI NEUTRONSKI PLIN**
- $M < 25 M_{\text{Sun}}$ ($M > 8 M_{\text{Sun}}$)

CRNA RUPA

- $M > 25 M_{\text{Sun}}$
- Tlak degeneriranog neutronskeg plina **NIJE DOVOLJAN** da spriječi **DALJNI KOLAPS**
- Masa je kolabirala u središte – **SINGULARNOST BESKONAČNE GUSTOĆE**
- Svjetlost ne može napustiti područje oko crne rupe → **HORIZONT DOGAĐAJA**

Neutronske zvijezde

Walter Baase
Fritz Zwicky

ZVIJEZDE S DEGENERIRANOM JEZGROM MASE VEĆE OD CHANDRASEKHAROVE GRANICE:

$$M_{\text{jezgra}} > 1.44 M_{\text{Sun}} (M_{\text{Ch}})$$

Tlak degeneriranog elektronskog plina: $P_e \propto \rho^{5/3}/m_e$

Degenerirani neutronske plin → tlak je 1800 puta veći!

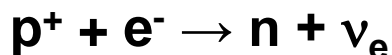
RADIJUS: oko 10-15 km

GUSTOĆA: $6.6 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$ (3 puta gušće od atomske jezgre)

Nastanak neutronske zvijezde:

Željezna jezgra masivne zvijezde → kolaps jezgre → eksplozija supernove, kompresija željezne jezgre:

UHVAT ELEKTRONA U JEZGRI



Gustoća za uhvat elektrona: 10^{12} kg/m^3

Chandrasekharova granica za neutronsku zvijezdu:

$$M_{\text{Ch}} = 2.2 M_{\text{Sun}} \text{ (statičko)}$$

$$M_{\text{Ch}} = 2.9 M_{\text{Sun}} \text{ (rotacija)}$$

Maksimalna masa neutronske zvijezde pri kojoj tlak degeneriranog neutronskeg plina može uravnotežiti gravitacijski kolaps!

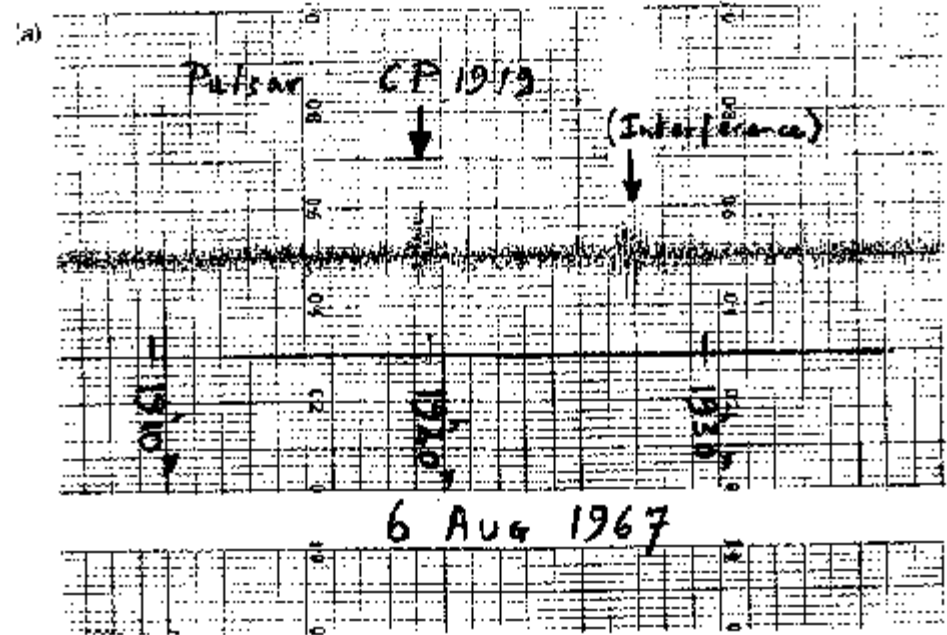
Ne postoje neutronske zvijezde mase veće od **$2.9 M_{\text{Sun}}$**

Pulsari

Jocelyn Bell (1967)
Anthony Hewish

⇒ radio opažanja scintilacija 81.5 MHz

⇒ Otkriće **RADIO PULSEVA S PERIODOM 1.337 S**



Pulsari

Jocelyn Bell (1967) ⇒ radio opažanja scintilacija 81.5 MHz
Anthony Hewish

⇒ Otkriće **RADIO PULSEVA S PERIODOM 1.337 S**

PULSAR – PULSating Source of Radio
**ASTRONOMSKI OBJEKT KOJI JE IZVOR PERIODIČNIH RADIO
PULSEVA**

2007. → 1500 poznatih pulsara

Pitanja:

1. Što su pulsari?
2. Kako nastau periodični radio pulsevi?

Pulsari

Osnovna svojstva:

1. **VRLO KRATKI** periodi pulseva: 0.25 do 2 s
2. **IZRAZITO PRECIZNI** periodi pulseva → 'astronomski satovi'
3. Pulsevi **USPORAVAJU**, a periodi pulseva polako **RASTU** → vrijeme života pulseva oko 10 milijardi godina

Thomas Gold:

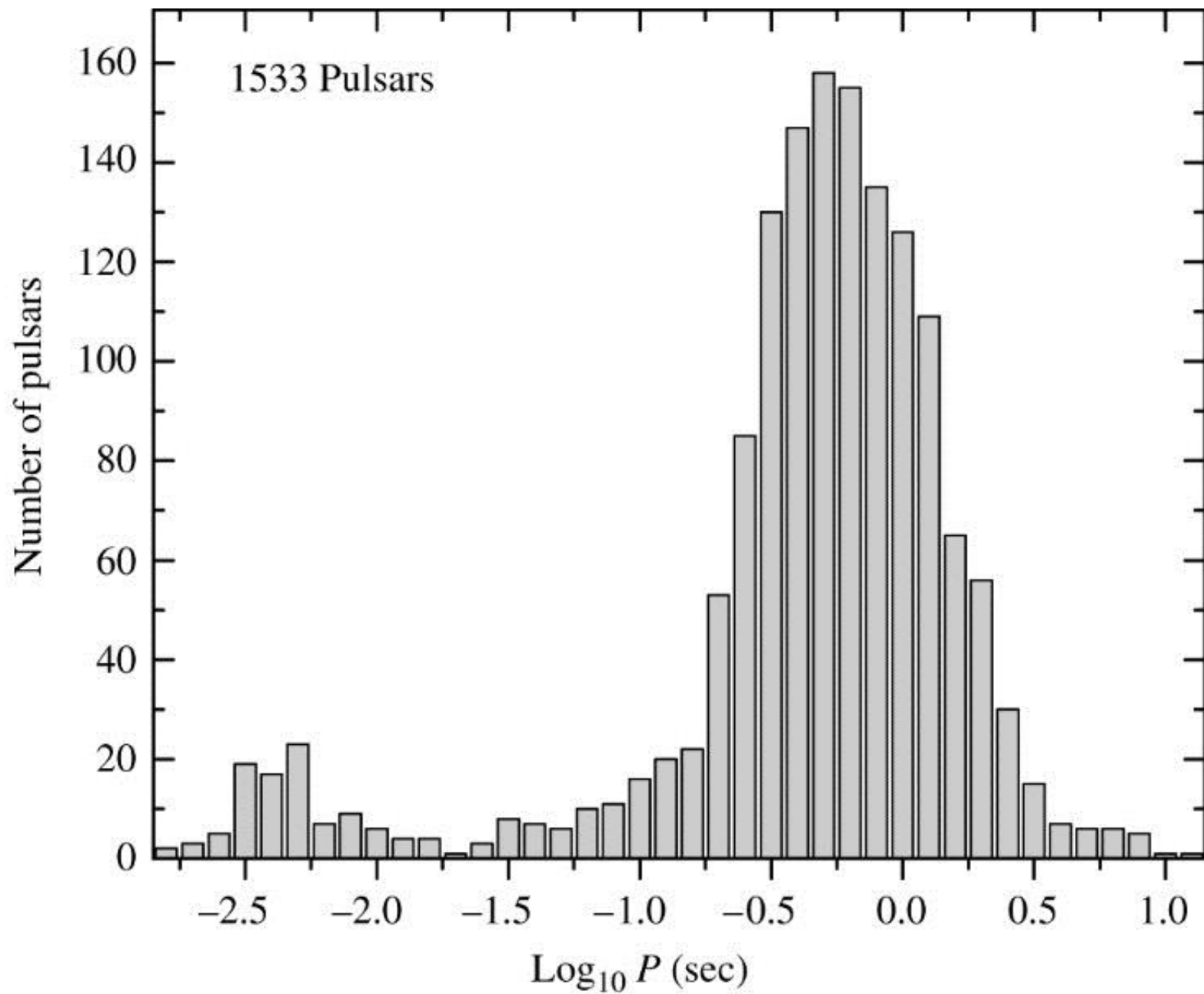
PULSARI SU NEUTRONSKE ZVIJEZDE KOJE BRZO ROTIRAJU

Brzo rotirajuća zvijezda → vrlo velika kutna količina gibanja → velika točnost pulseva

Koliko brzo zvijezda može rotirati prije nego što se raspadne?

GRAVITACIJSKA SILA = CENTRIPETALNA SILA na ekvatoru

Bijeli patuljak kao pulsar (npr. Sirius B) $\Rightarrow P_{\min} \approx 7$ s (PREDUGO!!)



Neutronska zvijezda mase $1.4 M_{\text{Sun}} \Rightarrow P_{\text{min}} \approx 5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$

ZAKLJUČAK:

Pulsari su **BRZOROTIRAJUĆE NEUTRONSKE ZVIJEZDE**

Otkriveni su u središtu ostataka eksplozije supernova:

RAKOVA MAGLICA

MAGLICA VELA

PULSARI → OSTACI EKSPLOZIJE SUPERNOVE (s kolapsom jezgre)



RAKOVA MAGLICA

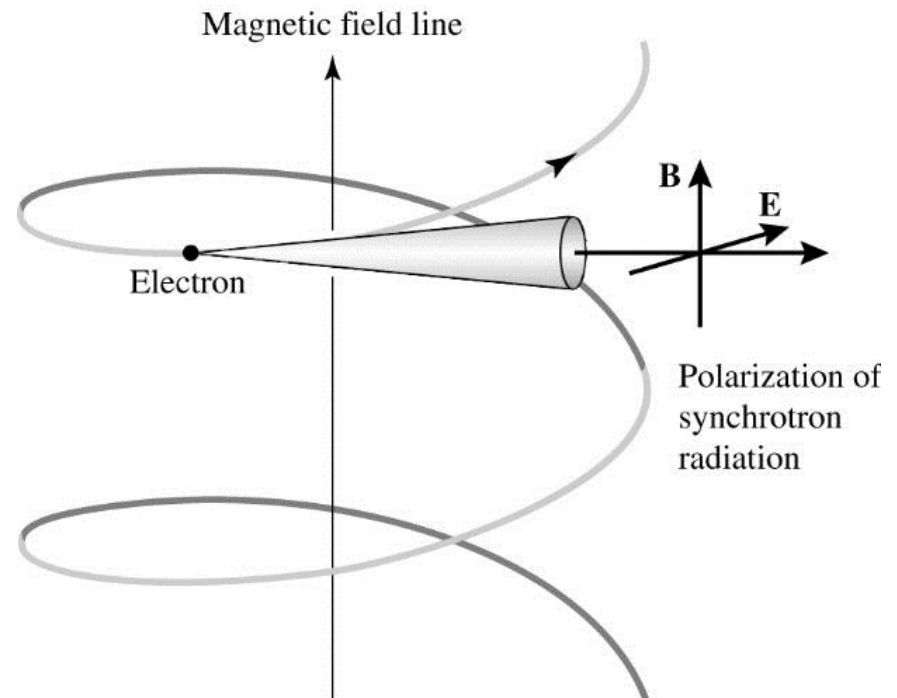
- Sjaji **SINKROTRONSKIM ZRAČENJEM** (zakočno zračenje)

SINKROTRONSKO ZRAČENJE → relativistički elektroni gibaju se po spirali uzduž silnica magnetskog polja pulsara i emitiraju **KONTINUIRANI SPEKTAR RADIO ZRAČENJA**

Izvor energije sinkrotronskog zračenja (oko $10^5 L_{\text{Sun}}$):

Rotacijska kinetička energija pulsara

Pulsar gubi energiju kroz sinkrotronsko zračenje i **USPORAVA ROTACIJU.**





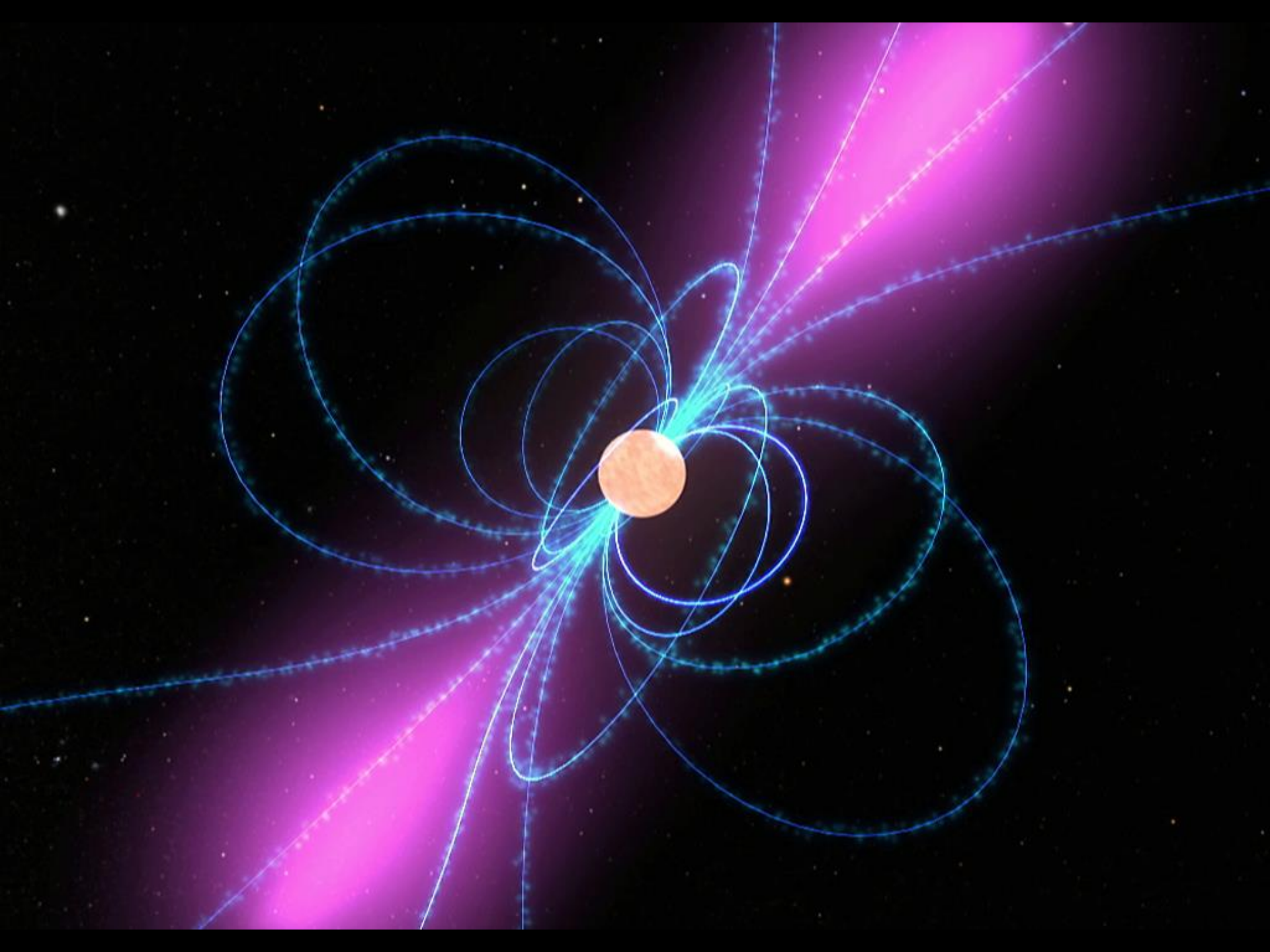
OSNOVNI MODEL PULSARA

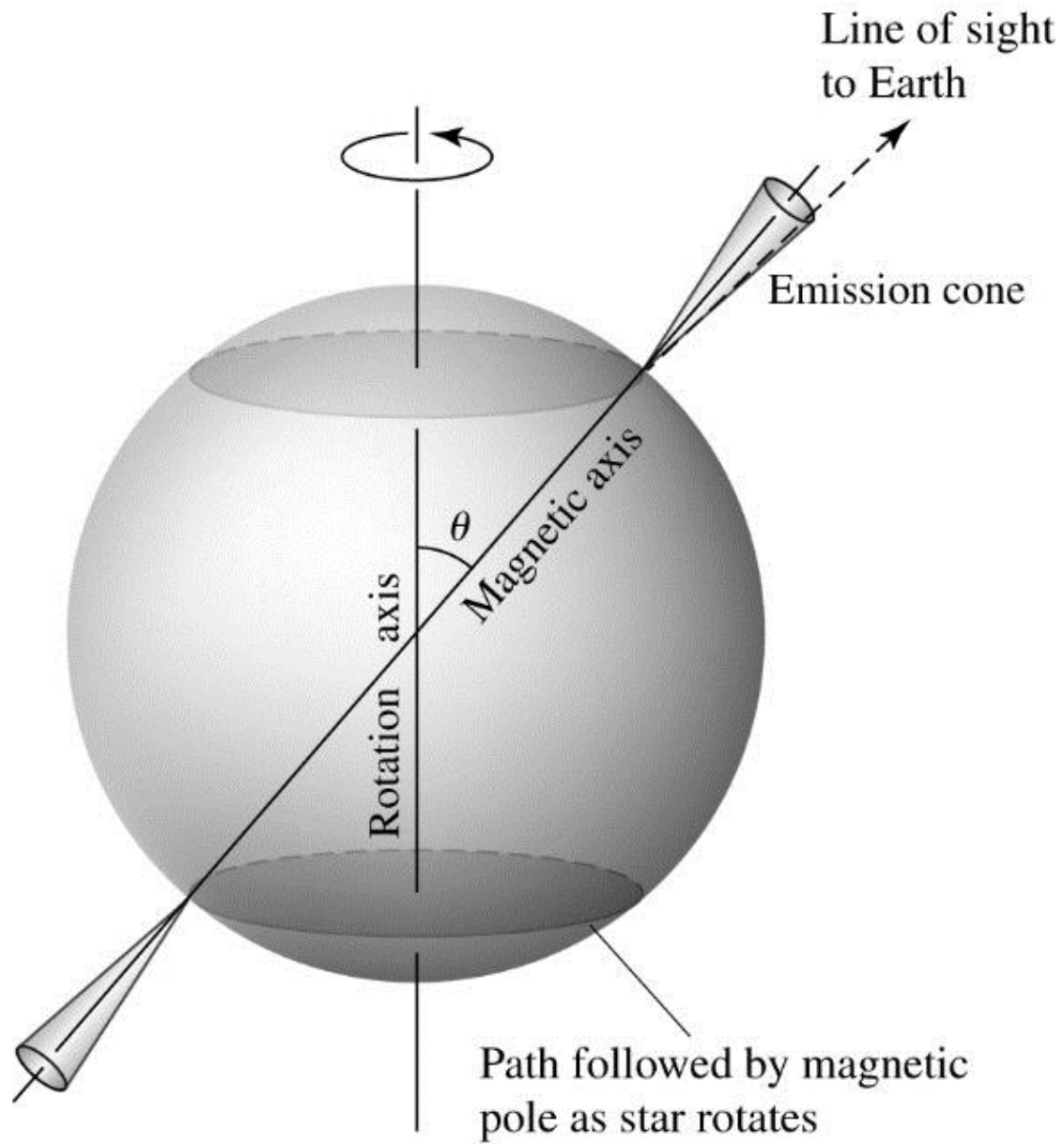
1. Neutronska zvijezda koja vrlo brzo rotira
2. Snažno dipolno magnetsko polje
3. Smjer polja na polovima je nagnut u odnosu na rotacijsku os

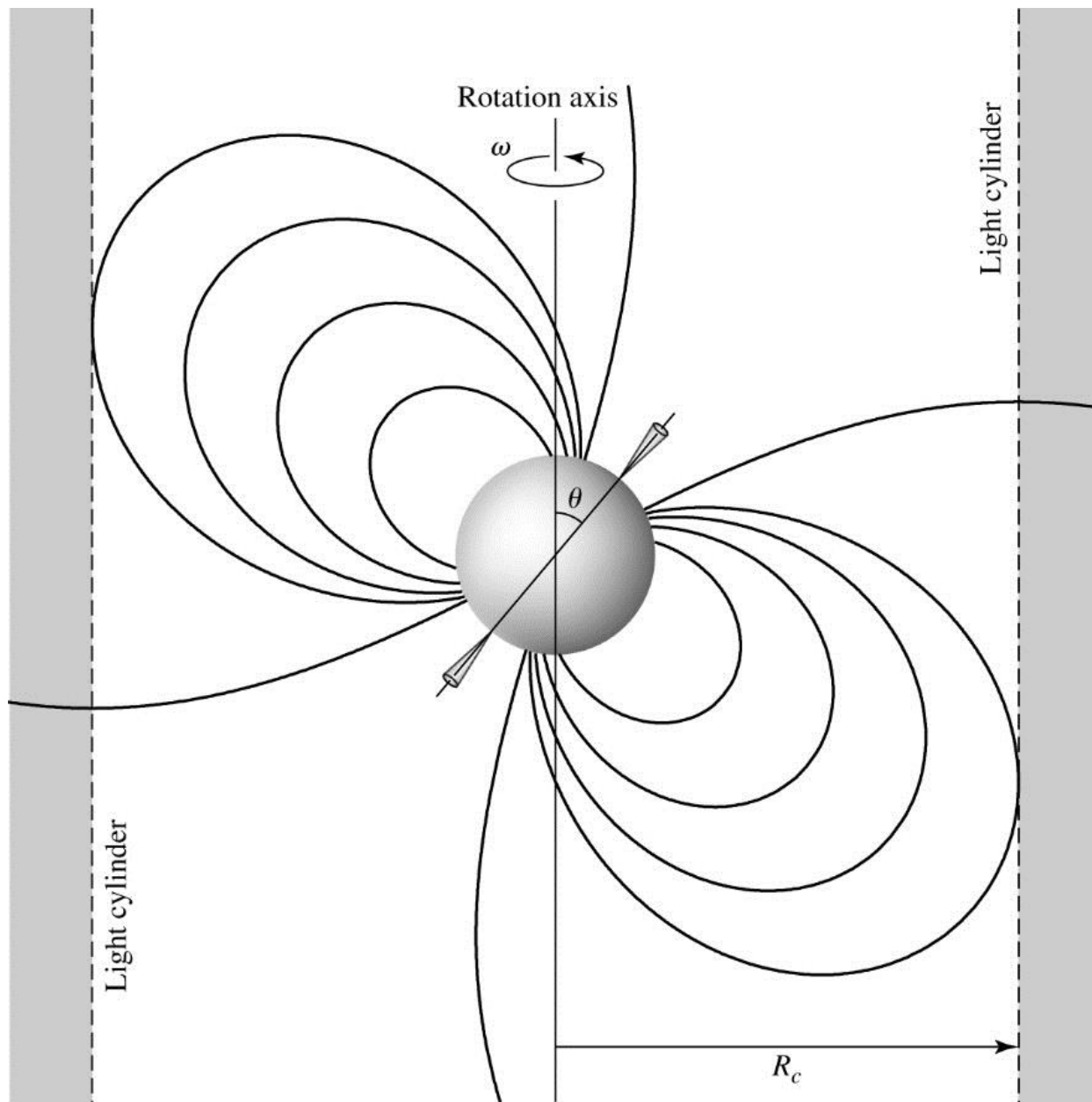
Magnetsko polje: oko 10^8 T na polovima!

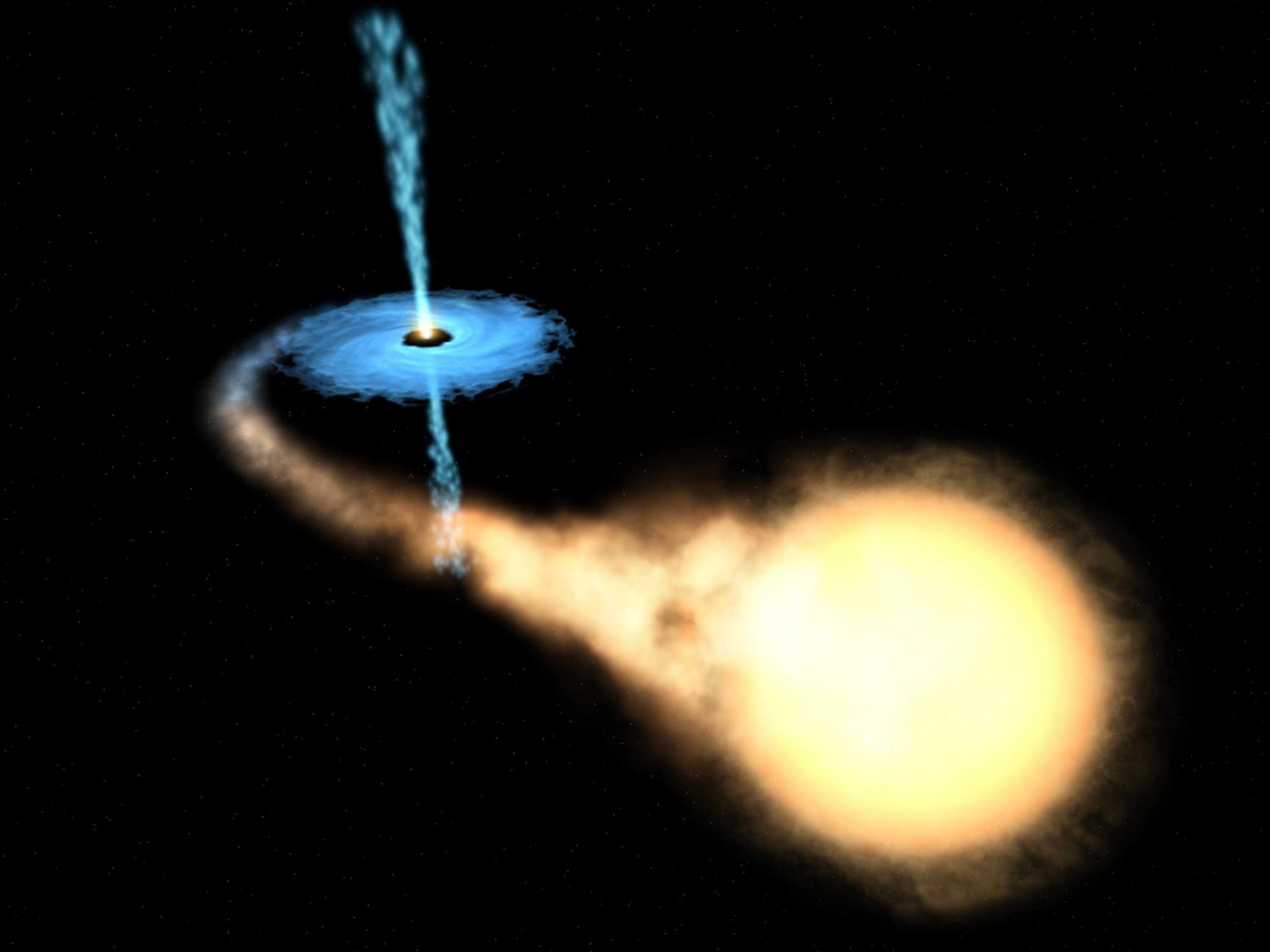
Različit smjer magnetskog polja na polovima i rotacijske osi → velike promjene toka magnetskog polja → inducira se snažno električno polje → električno polje ubrzava elektrone i ione do relativističkih brzina → magnetosfera → u blizini polova nabijene čestice slijede silnice magnetskog polja → silnice magnetskog polja su zakrivljene → **EMISIJA KONTINUIRANOG USMJERENOG RADIO ZRAČENJA**

Smjer radio zračenja je unutar uskog stošca u smjeru magnetskog dipola → magnetska i rotacijska os se ne poklapaju → **EFEKT SVJETIONIKA**









Crne rupe

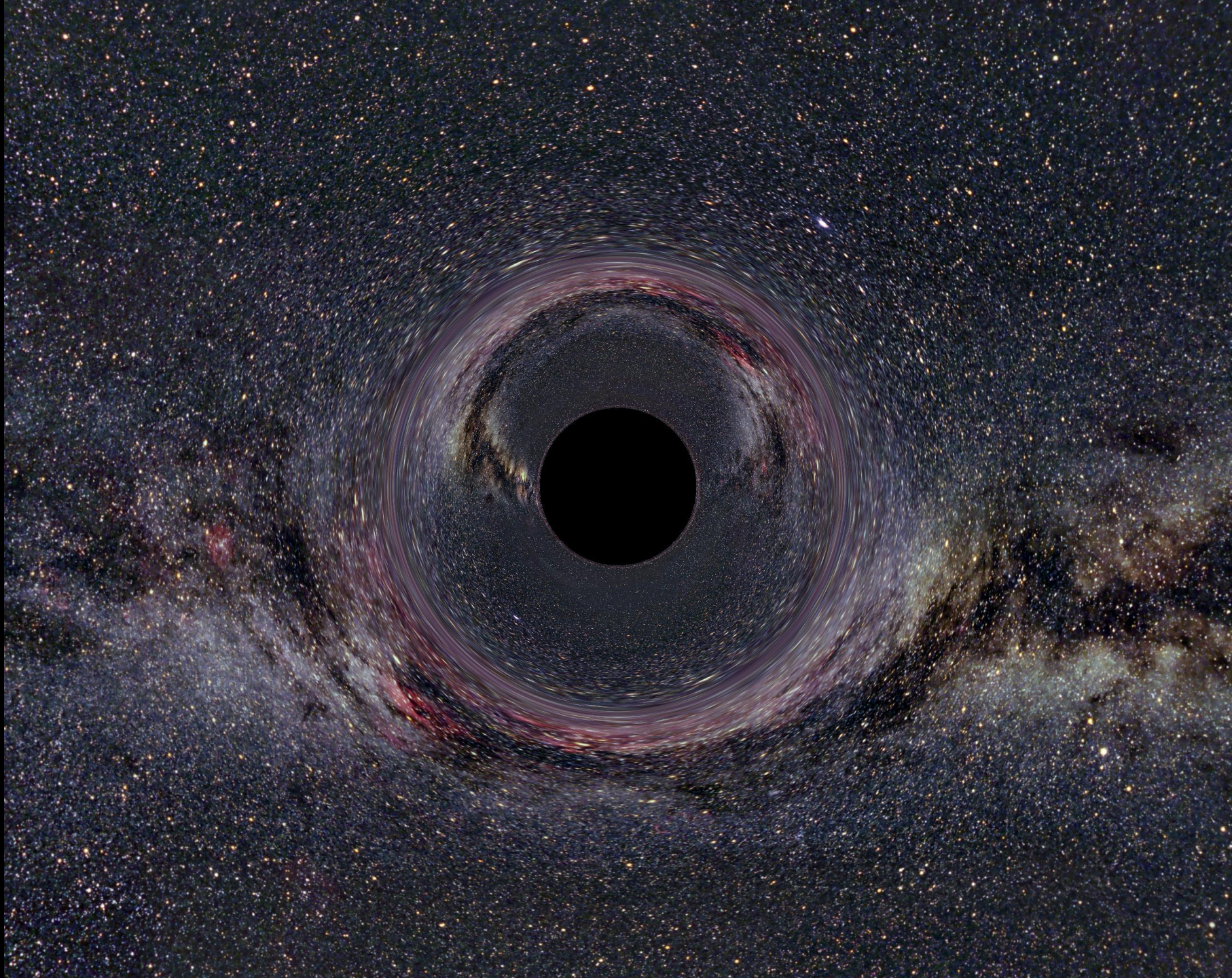
Supernova: gravitacijski kolaps masivne degenerirane jezgre:

$$M > 2.2 - 2.9 M_{\text{Sun}}$$

Gravitacijski kolaps ne može zaustaviti niti tlak degeneriranog neutronskega plina \Rightarrow **KOLAPS U TOČKU BESKONAČNE GUSTOĆE (SINGULARITET)**

CRNA RUPA \rightarrow **astronomski objekt u kojemu je BRZINA SVJETLOSTI MANJA OD BRZINE OSLOBAĐANJA**

\rightarrow 'površinu' crne rupe ne može napustiti niti svjetlost



SCHWARZSCHILD OV RADIJUS

Koliki radijus mora imati astronomski objekt mase M da bi na udaljenosti R od njegovog središta brzina oslobađanja bila jednaka brzini svjetlosti?

$$R_S = 2GM/c^2$$

Svjetlost unutar radijusa R_S ne može se osloboditi gravitacijskog privlačenja i napustiti objekt \Rightarrow **CRNA RUPA**

ZAMRZNUTO VRIJEME na Schwarzschildovom radijusu

HORIZONT DOGAĐAJA \rightarrow površina na $r=R_S$ spriječava primanje bilo koje informacije iz unutrašnjosti

Unutrašnjost crne rupe unutar horizonta događaja je **SKRIVENA!**

VRSTE CRNIH RUPA

- 1. ZVJEZDANE CRNE RUPE** ($3 - 15 M_{\text{Sun}}$)
 - kolaps jezgre masivne zvijezde
- 2. CRNE RUPE SREDNJIH MASA** ($100 - \text{oko } 1000 M_{\text{Sun}}$)
 - središta kuglastih skupova i manjih galaksija
 - spajanje zvijezda u supermasivnu zvijezdu ili spajanje zvjezdanih crnih rupa
- 3. SUPERMASIVNE CRNE RUPE** ($10^5 - 10^9 M_{\text{Sun}}$)
 - središta gotovo svih galaksija
 - Mliječni put $3.7 \cdot 10^6 M_{\text{Sun}}$
 - **NASTANAK???**
 1. sudari galaksija
 2. rast crne rupe srednjih masa

ZVJEZDANE CRNE RUPE

- Nemoguće direktno opažanje
- Moguće je samo **INDIREKTNO OPAŽANJE UTJECAJA** crne rupe → **BLISKI DVOJNI SUSTAV** u kojem je jedna komponenta crna rupa

Crna rupa privlači plin s površine druge komponente → plin 'teče' prema crnoj rupi → formira se plinoviti disk oko crne rupe → plin se ubrzava na velike brzine → plin se tlači, sudara i grije na milijune K →

EMISIJA X ZRAKA

Izvori X-zraka → samo u prisustvu neutronske zvijezde ili crne rupe:

CYGNUS X-1

LMC X-3

V616 Mon

HAWKINGOVO ZRAČENJE → EVAPORACIJA CRNIH RUPA:

- Kvantna mehanika
- Nastanak para čestica-antičestica na horizontu događaja
- Jedna komponenta para pada u crnu rupu, drugu možemo detektirati

