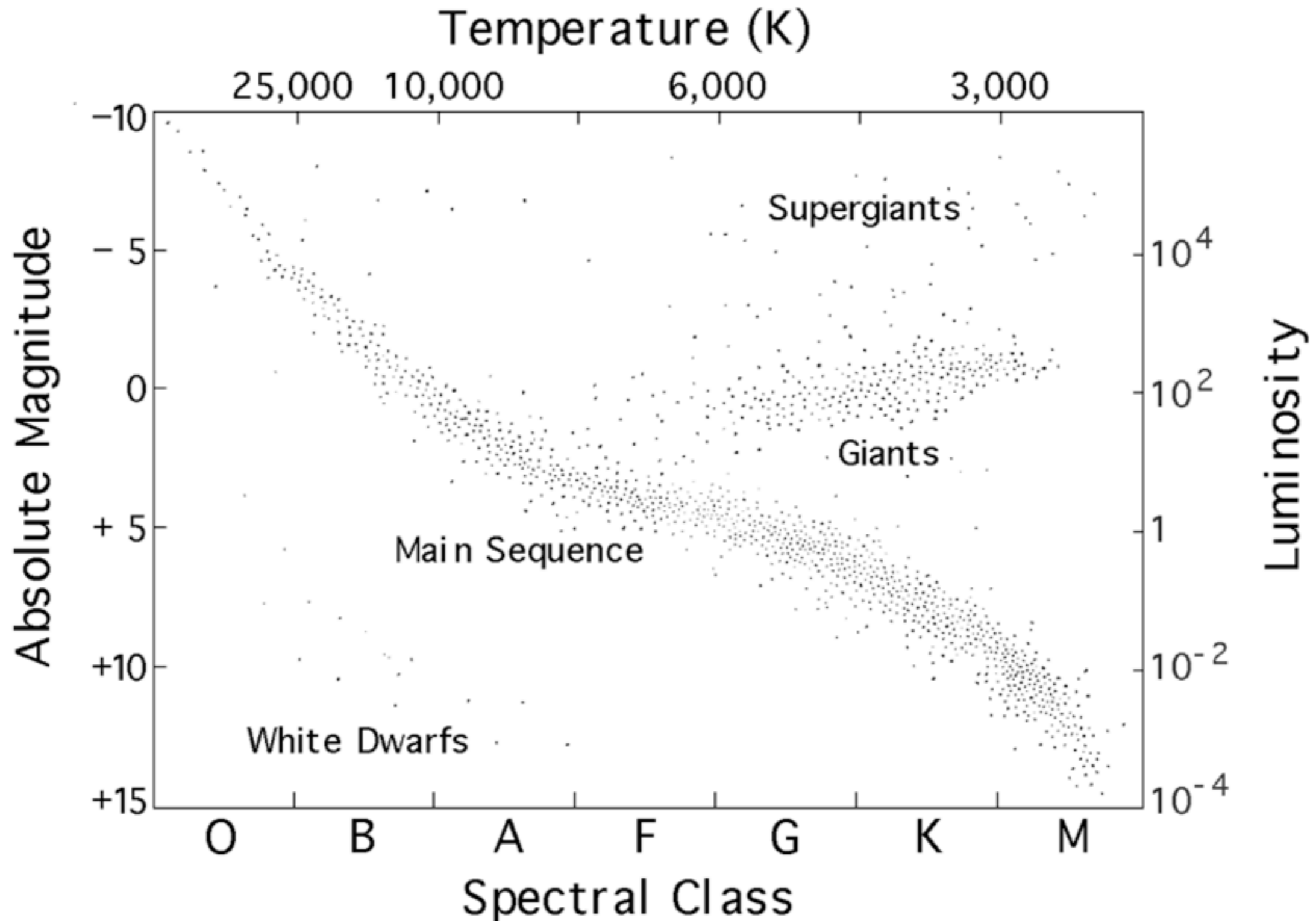


Rauðir risar og hvítir dvergar



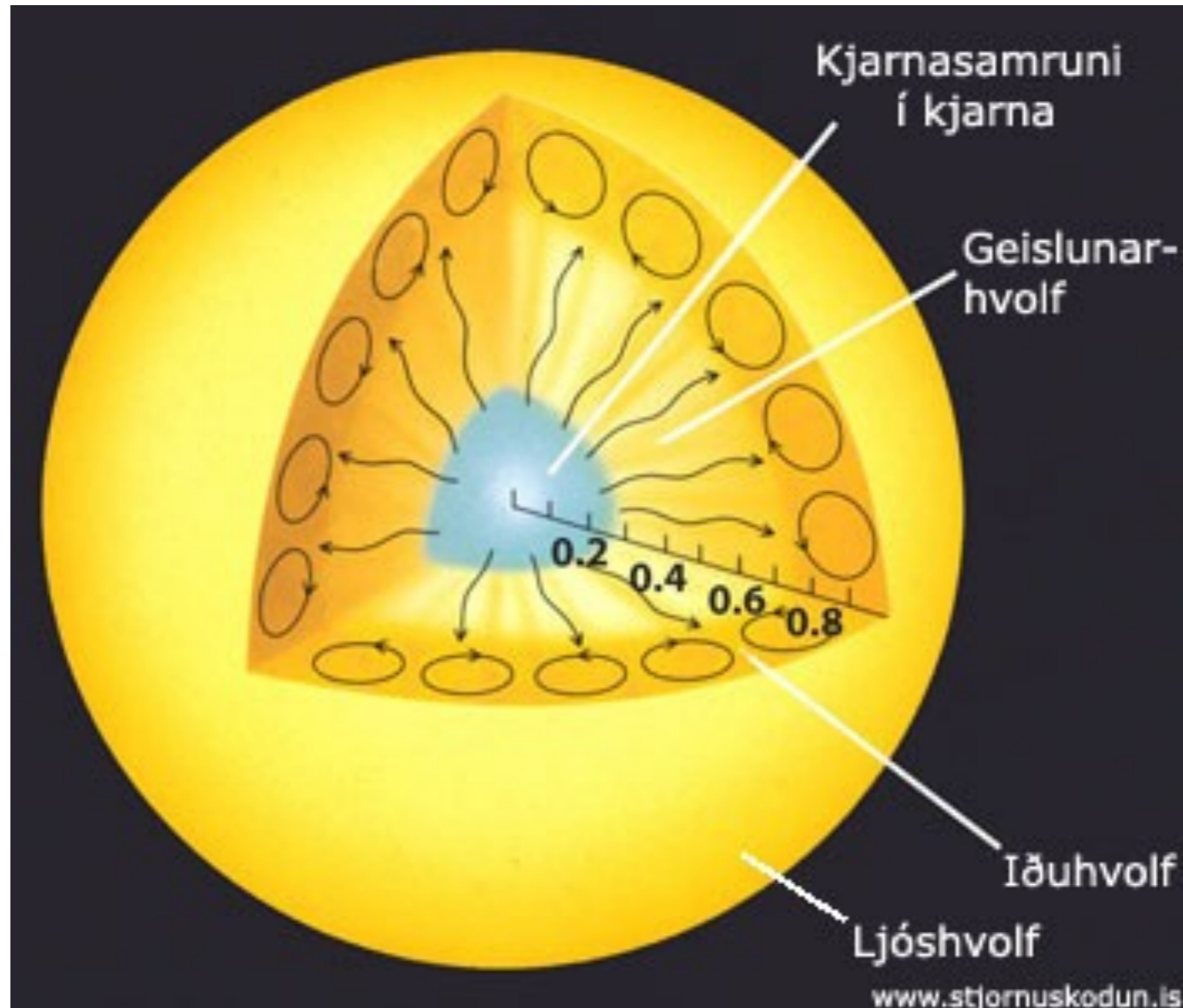
HR-línuritið



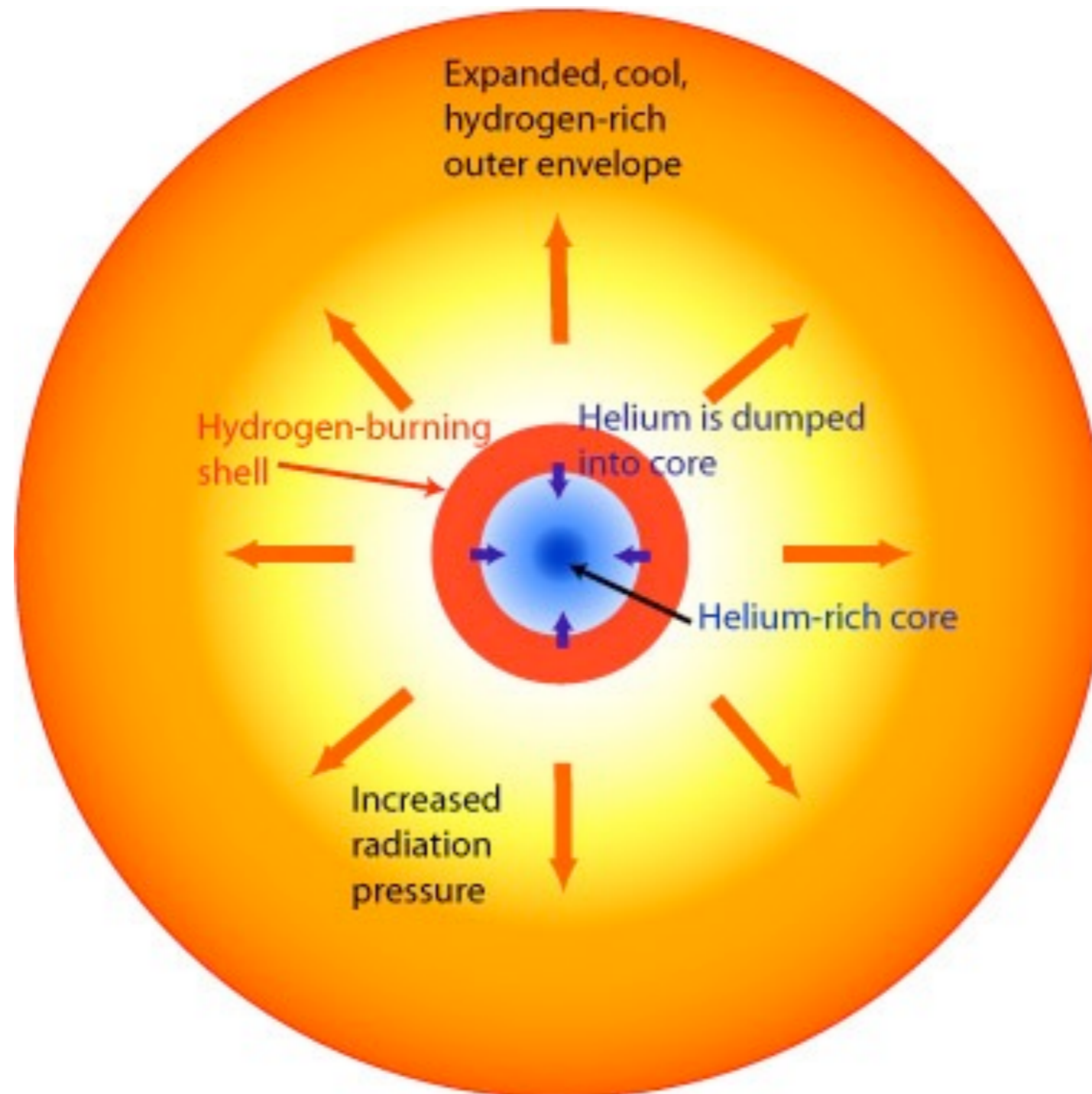
Eftir meginröðina...

- Þegar vetnið klárast í kjarna sólstjörnu er orkulosun með vetnissamruna ekki lengur möguleg
- Þyngdarkrafturinn tekur þá að þjappa saman kjarna stjörnunnar og miðjan skreppur saman
- Nú hækkar hiti í miðju stjörnunnar og útgeislunin verður meiri þannig að ytri lögin þenjast út og kólna
 - Heildarútgeislunin eykst en dreifist á stærra svæði en áður og því kólnar yfirborð stjörnunnar
- Svokallaður *skeljabruni* vetnis hefst í kúlulaga skel umhverfis miðjuna þar sem áður var geislahvolf stjörnunnar þegar hitinn er orðinn nógu mikill þar

Stjarna á meginröð



Skeljabruni vetnis



Hydrogen Shell Burning on the Red Giant Branch

Eftir meginröðina...

- Helínið sem myndast í skeljabrunanum fellur til miðju sólstjörnunnar
- *Ljósafli* (heildarútgeislun) stjörnunnar eykst vegna hækkandi hita í miðju og skeljabrunans utan kjarnans
- Vegna aukins þrýstings ljóseindanna bólgna ytri lög stjörnunnar út og yfirborð stjörnunnar kólnar
- Þegar ytri lögin kólna eykst ógegnsæi gassins og þar með einnig þrýstingur ljóseindanna
- Þrátt fyrir að yfirborð stjörnunnar bólgni út er miðjan sífellt að dragast saman

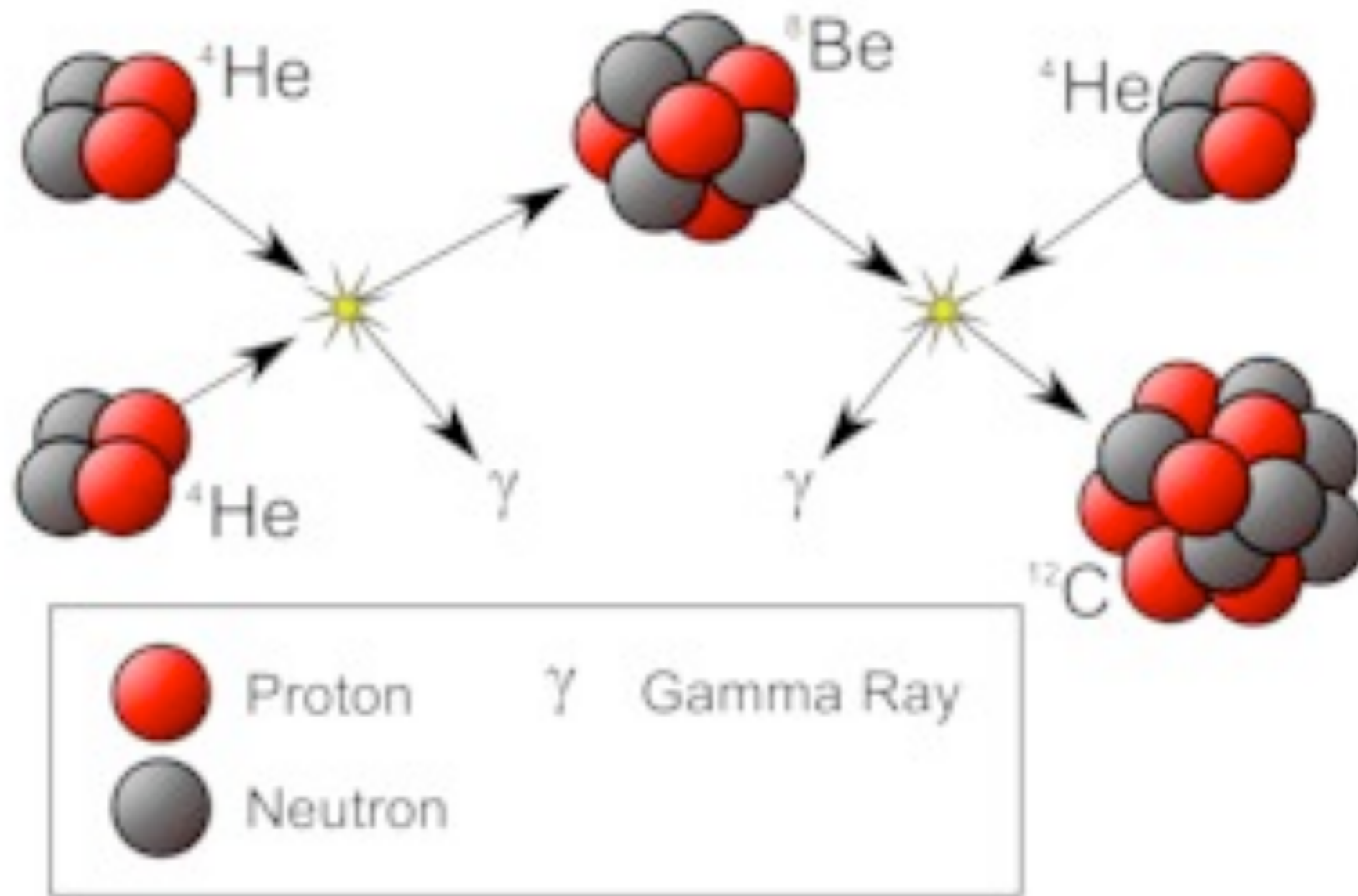
Helínsamruni

- Meðan á þessu stendur kólnar yfirborðið en ljósafli stjörnunnar eykst - stjarnan *klifrar upp risagreininna* á HR-línuritinu og breytist í *rauðan risa*
- Samþjöppun kjarnans heldur áfram þar til hitinn nær 100 milljón gráðum en þá hefst *helínsamruni* í kjarna stjörnunnar
- Fyrsta skrefið í samruna helíns er hvarfið
 - $\text{He-4} + \text{He-4} \rightarrow \text{Be-8}$
- Be-8 kjarninn er óstöðugur og hrekkur nánast strax aftur í tvo helín-4 kjarna

Helínsamruni

- Hiti í kjarna stjörnunnar er hins vegar nægilega mikill til að eftirfarandi hvarf nær að eiga sér stað:
 - $\text{Be-8} + \text{He-4} \rightarrow \text{C-12}$
- Þetta ferli, þar sem þrjár helínkjarnar renna saman og mynda kolefni nefnist *3 α -ferlið*
- Þegar kolefni byrjar að safnast upp hefst einnig myndun súrefnis við samruna kolefnis og helíns:
 - $\text{C-12} + \text{He-4} \rightarrow \text{O-16}$

3 α -ferlið



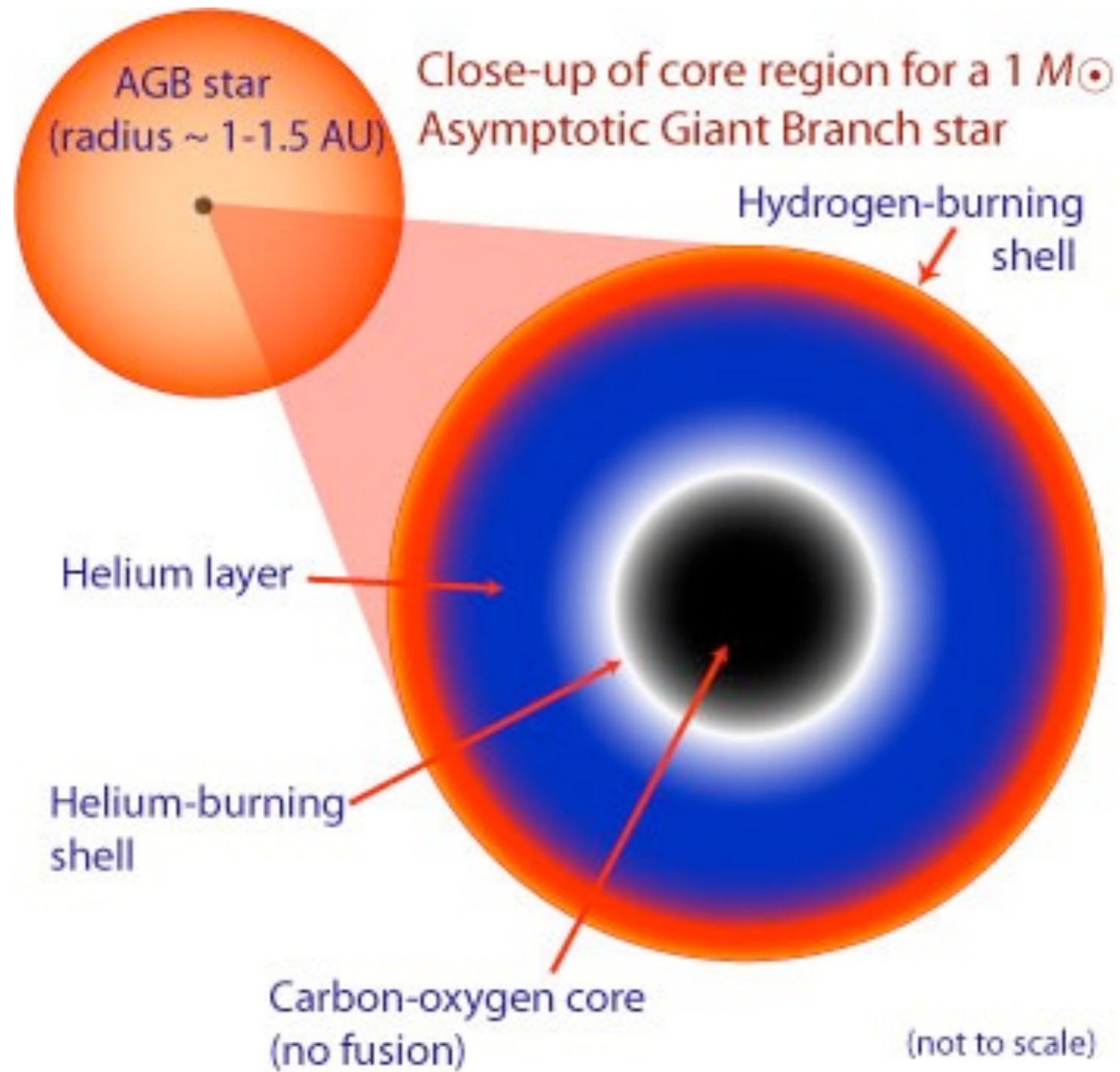
Seinna stöðugleikaskeiðið

- Eftir því sem þyngri frumefni myndast við kjarnasamruna losnar minni orka pr. massa
- Vetrissamruni losar mesta orku og því samsvarar tíminn sem stjarna er á meginröð um 90% ævi hennar
- Helínsamruni losar megnið af orkunni sem er eftir og stjarnan nær nokkrum stöðugleika á meðan - sagt er að sólstjarnan sé á *láréttu grein* HR-línuritsins
- Hún byrjar efst en færast til vinstri á HR-línuritinu þar sem að *ytri lögin dragast saman og hitna en ljósafli stjörnunnar helst nokkuð stöðugt*

Seinna stöðugleikaskeiðið

- Helínsamruni hefst í miðju en færir utar eftir því sem kolefni og súrefni falla til miðju stjörnunnar
- Stjarnan verður því lagskipt:
 - Innst er úrgangur helínsamrunans (kolefni og súrefni)
 - Þar fyrir utan skel þar sem helínsamruni á sér stað ($\text{He} \rightarrow \text{C}$)
 - Utan við hana er skel helíns þar sem hiti er ekki nægur fyrir samruna
 - Þar fyrir utan er lag þar sem vetnissamruni á sér stað ($\text{H} \rightarrow \text{He}$)
- Fyrir utan lagskipta miðju stjörnunnar tekur svo við geisla- og iðuhvolf hennar, gríðarlega útþanin

Helínsamruni



Ævilok lágmassa stjarna

- Ævilok sólstjörnnunnar ráðast af massa hennar
- Meira en 8 sólmassa stjörnur halda kjarnasamruna áfram allt upp í myndun járns og enda ævi sína sem *sprengristjörnur*
- Stöðugleiki meginraðarinnar er blómaskeið sólstjarna og þá má jafnframt búast við að líf geti þróast á braut um þær
- Aftur á móti myndast þyngri frumefnin, sem eru forsendur lífs, á seinni æviskeiðum stjarna - kynslóðir stjarna vinna saman

Sólin gleypir reikistjörnur

- Á seinna risaskeiðinu mun sólin gleypa Venus og Merkúr
 - Jörðin mun tapa massa og sígur hægt í áttina að sólinni
 - Jörðin „gufar upp“ í lofthjúpi sólar
- Heimild: Grein um örlög sólar í *Astronomy* í janúar/febrúar 2014

Ævilok lágmassa stjarna

- Í stjörnum með massa á milli 0,5 og 8 sólmassa fjarar samruni vetnis og helíns smám saman út
- Ytri lögin eru mjög útþanin og gasið fýkur greiðlega út í geiminn vegna þrýstingsins innan frá
- Ytri lögin þyrlast á endanum algjörlega í burtu og eftir situr afhjúpuð miðja stjörnunnar - *hvítur dvergur* sem er gríðarlega heitur í fyrstu
- Í nokkur þúsund ár gefur að líta fallega hringþoku sem hverfur að lokum alveg

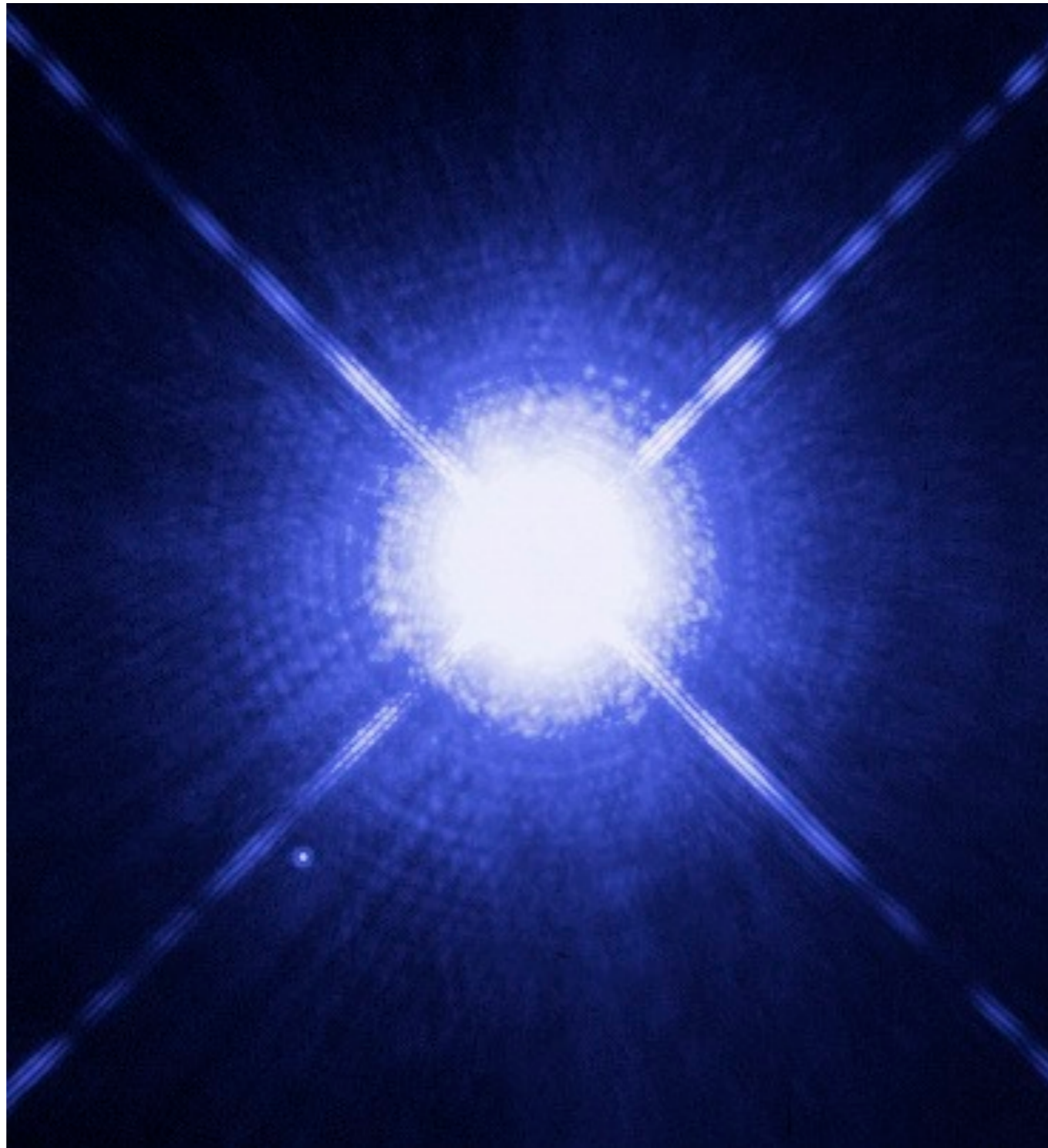
Maurapokan



Hvítir dvergar

- *Hvítur dvergur* er afhjúpuð miðja sólstjörnu eftir að ytri lögin eru horfin frá henni
 - Í fyrstu er dvergurinn mjög heitur en kólnar fljótt
- Einn fyrsti slíkur sem fannst var *Síríus B*
 - Fylgistjarna sólstjörnnunnar *Síríusar*, björtustu fastastjörnu næturhiminsins
 - Þéttleiki stjörnnunnar var gríðarlegur og var eðlisfræðingum í fyrstu mikil ráðgáta
 - Árið 1925 kom skammtafræðin til bjargar - *rafeindaþrýstingur* hindrar að hnötturinn falli saman
- Hvítur dvergur með massa á við Sólina er á stærð við Jörðina!

Sírius og Sírius B



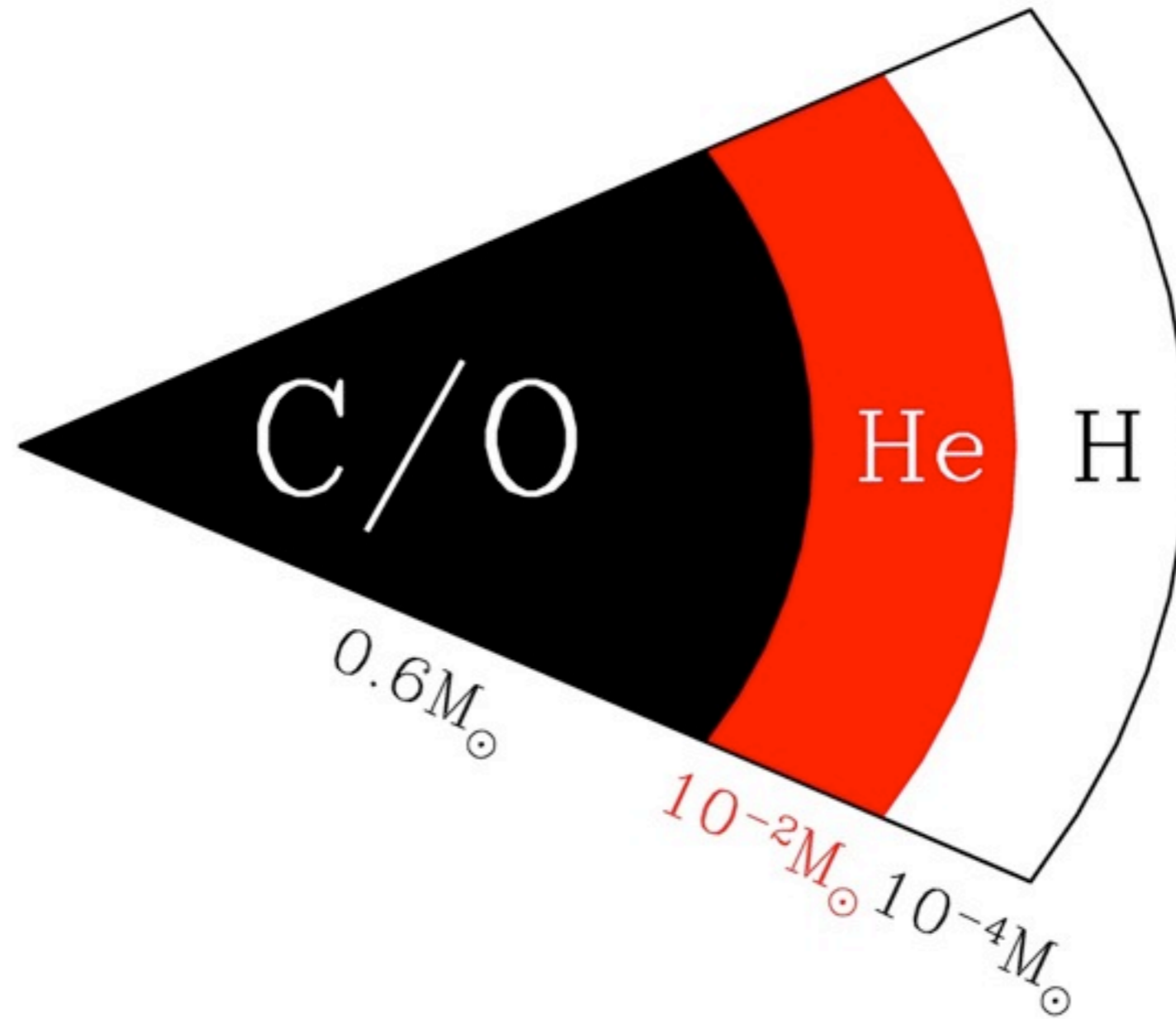
Hvítir dvergar

- Þó eru takmörk fyrir því hve miklum þunga rafeindaþrýstingurinn getur haldið uppi
 - Ef massi hvíts dvergs verður meiri en um 1,4 sólmassar (*markmassi Chandrasekhars*) fellur hann saman undan eigin þunga
 - Stjörnur sem eru upphaflega meira en um 8 sólmassar eru of þungar til að enda sem hvítir dvergar
- Flestir af þeim tæplega 3000 hvítu dvergum sem þekkjast eru á bilinu 8-16 þúsund gráðu heitir
 - Nýskriðnir úr egginu geta þeir verið allt að 100 sinnum bjartari en Sólin okkar en dofna fljótt og eru því vandfundnir
 - Flestir eru álíka massamiklir, um 0,6 sólmassar og fáir eru yfir einum sólmassa

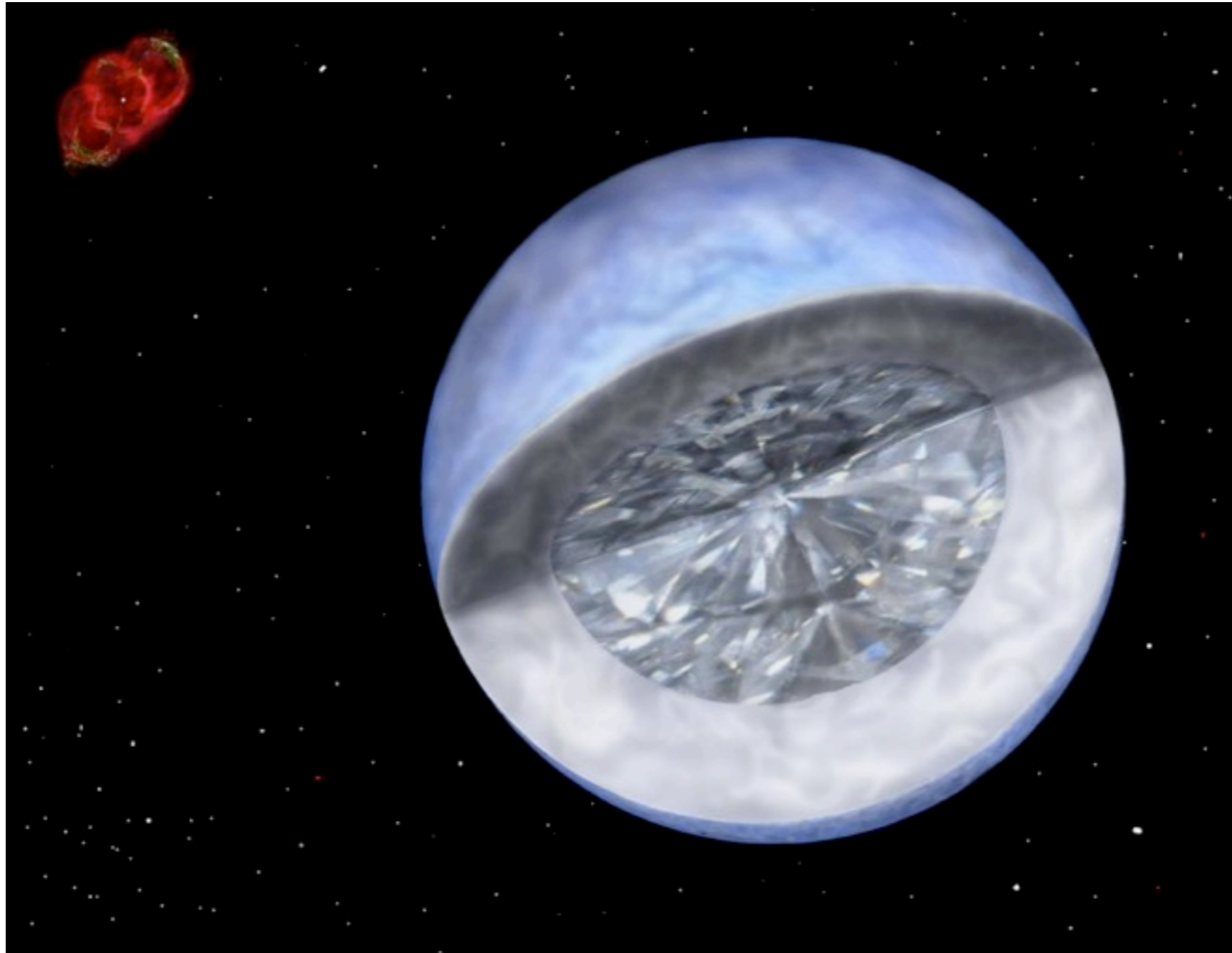
Aldur hvítra dverga

- Reikna má út hve langan tíma það tekur fyrir hvíta dverga að kólna
 - Það tekur þá um 9,3 milljarða ára að kólna niður í 3000°C
 - Köldustu hvítu dvergarnir í okkar vetrarbraut eru um 3000°C og vetrarbrautin okkar því a.m.k. 10 milljarða ára
- Hvítir dvergar verða að *svörtum dvergum* þegar þeir kólna enn frekar

Innri gerð hvíttra dverga



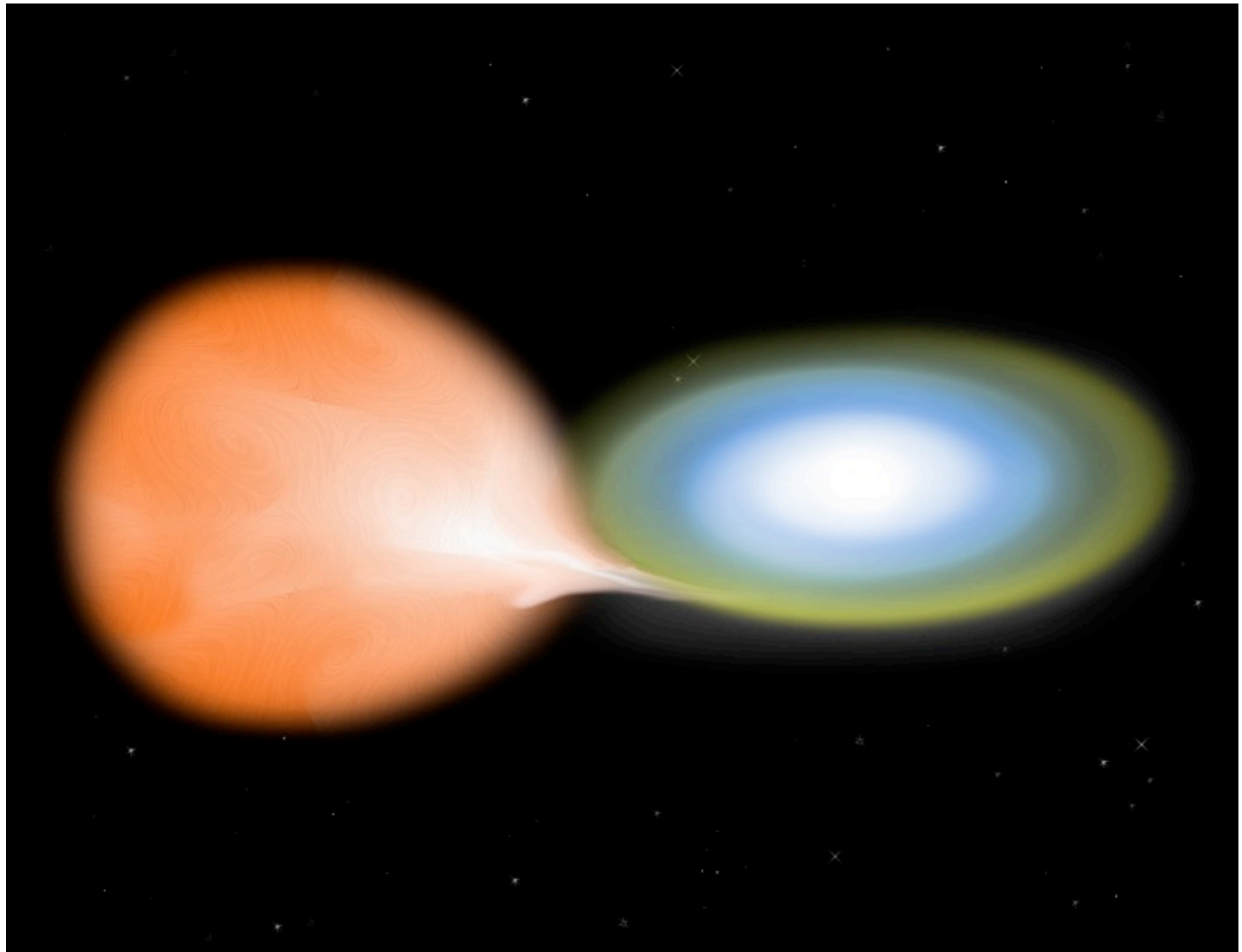
BPM 37093 - „Lucy“ - demantstjarna?



Framhaldslíf hvíttra dverga

- Í tvístirnum getur það gerst að önnur stjarnan er upphaflega massameiri og þróast hraðar
 - Hún endar þá sem hvítur dvergur á meðan hin stjarnan er enn á meginröð
- Þegar hin stjarnan breytist í rauðan rísa og þenst út getur hún misst hluta af ytri lögum sínum til hvíta dvergsins
- Vetnið safnast saman utan á hvíta dverginn og hitnar þar til vetnissamruni hefst en stendur þó stutt
- Við þetta snarhækkar birta dvergsins og til verður *nýstirni* (e. nova)

Nýstirni



Sprengistjörnur Ia

- Smám saman eykst massi hvíta dvergsins þar til hann nálgast *markmassa Chandrasekhars*, um 1,4 sólmassa
- Þá verður samþjöppun kolefnis í miðju dvergsins svo mikil að kjarnasamruni hefst skyndilega yfir í þyngri efni
- Við þennan kjarnasamruna losnar svo gríðarleg orka á skömmum tíma að hvíti dvergurinn tættist í sundur og verður þá *sprengistjarna af gerð Ia*
- Hér er eingöngu um kjarnorkusprengju að ræða og hvíti dvergurinn skilur ekki eftir sig nifteindastjörnu eða svarthol

Leifar sprengistjörnnunnar 1604

