

Zvaigžņu evolūcija: zvaigžņu dzimšana, dzīve un nāve

Džons R. Persijs

Starptautiskā Astronomijas savienība

Toronto Universitāte, Kanāda



Zvaigžņu evolūcija

- Kad mēs runājam par zvaigžņu evolūciju, mēs domājam par izmaiņām, kas notiek zvaigznēs, kad tās patērē "degvielu" no to dzimšanas līdz ilgā mūža galam.
- Zvaigžņu evolūcijas izpratne palīdz astronomiem saprast:
 - Mūsu Saules būtību un turpmāko likteni.
 - Mūsu Saules sistēmas izcelsmi.
 - Kā mēs salīdzinām savu Saules sistēmu ar citām planētu sistēmām.
 - Vai citur Visumā varētu būt dzīvība.

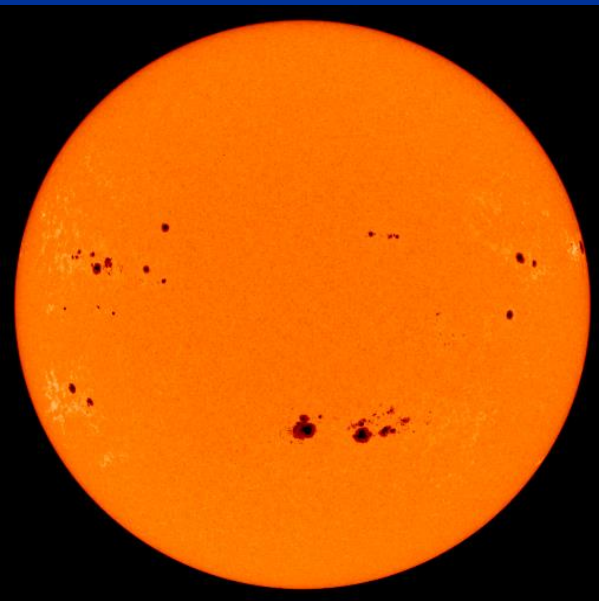


Gredzena miglājs, «mirstošā» zvaigzne.
Avots: NASA



Saules īpašības: tuvākā zvaigzne un kā astronomi tās mēra – svarīgi!

- **Attālums:** $1,5 \times 10^{11}$ m, nosaka, atstarojot radara viļņus no Merkura un Veneras.
- **Masa:** 2×10^{30} kg, mēra to planētu kustību, kuras riņķo ap Sauli.
- **Diametrs:** $1,4 \times 10^9$ m, nosaka no Saules redzamā leņķiskā diametra un no attāluma līdz tai.
- **Jauda:** 4×10^{26} W, nosaka no attāluma un izmērītās jaudas no Zemes.
- **Ķīmiskais sastāvs:** 98% ūdeņradis un hēlijs, nosaka, pētot spektru.



Saule.

Avots: NASA SOHO satelīts



Zvaigžņu jeb tālo «sauļu» īpašības, un kā astronomi tās nosaka – svarīgi!

- **Attālums:** no paralakses vai no redzamā spožuma, ja jauda ir zināma.
- **Jauda:** no attāluma un redzamā spožuma.
- **Virsmas temperatūra:** no krāsas vai spektra.
- **Rādiuss:** no jaudas un virsmas temperatūras.
- **Masa:** izmantojot dubultzvaigžņu novērojumus.
- **Ķīmiskais sastāvs:** no zvaigžņu spektriem.

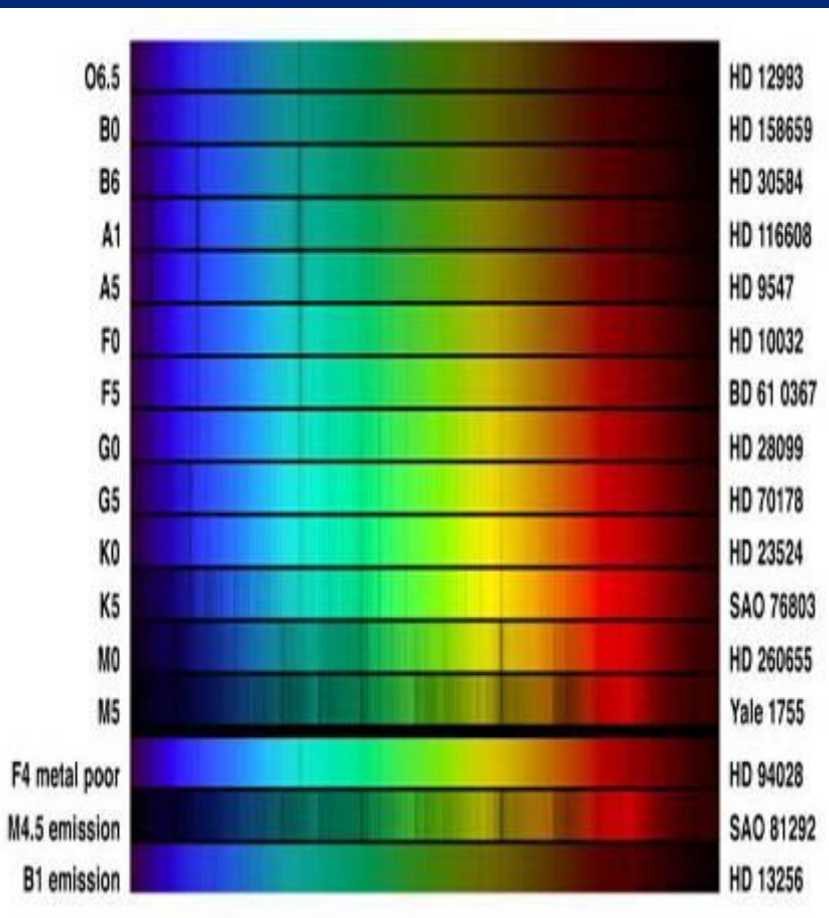


Oriona zvaigznājs.

Avots: Habls, ESA, Akira Fujii

Zvaigžņu spektri: zvaigžņu gaisma sadalās krāsās

- Astronomi analizē astronomiskos objektus, pētot gaismu, ko tie izstaro.
- Spektrs sniedz informāciju par zvaigžņu sastāvu, temperatūru un citiem raksturlielumiem.



Pa kreisi: pirmie 13 zvaigžņu spektri ar atšķirīgu virsmas temperatūru (karstākā augšpusē); pēdējie trīs spektri ņemti no zvaigžnēm ar savdabīgām īpašībām.

Zvaigžņu spektri

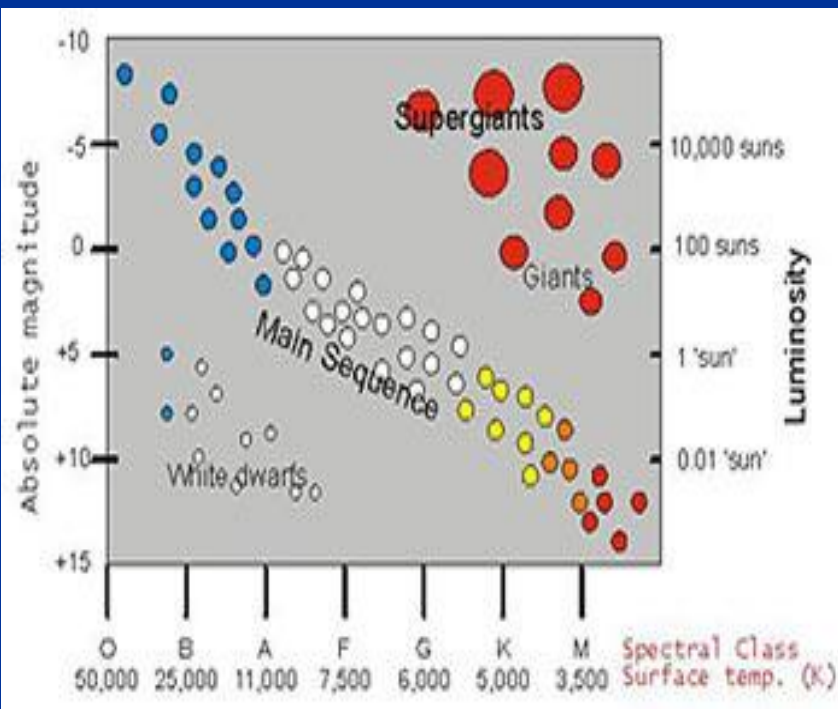
Avots: ASV Nacionālā optiskās astronomijas observatorija



Hercšprunga - Rasela diagramma

Zvaigžņu īpašībās ir sistēma!

- Hercšprunga-Rasela (HR) diagramma parāda jaudu (spožumu) kā temperatūras funkciju (spektra klase); uz ordinātas "absolūtais spožums" ir jaudas logaritmisks mērs.

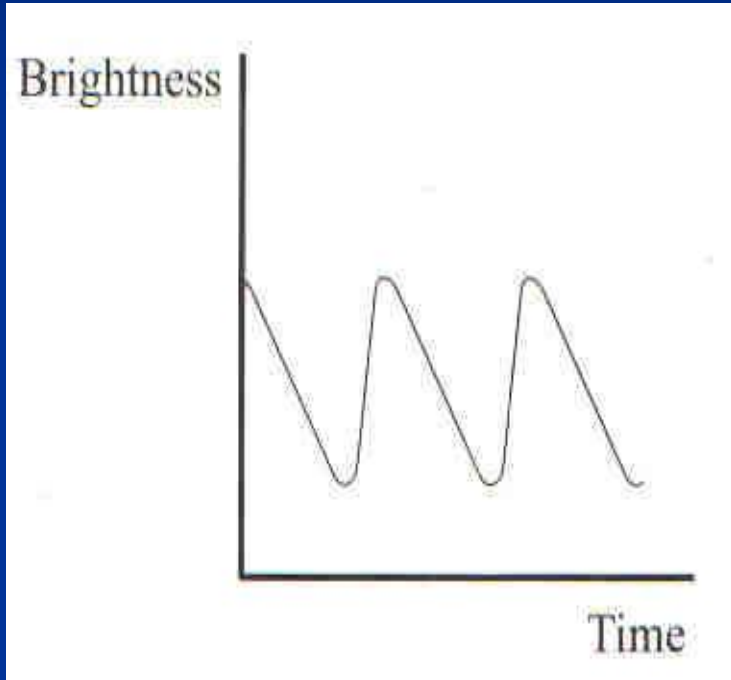


HR diagramma. Avots: NASA

- Lielākā daļa zvaigžņu atrodas uz "galvenās secības": masīvās zvaigznes ir karstas un tām ir liela jauda (augšējā kreisajā pusē), savukārt mazajām zvaigznēm ir mazāka masa, tās ir aukstas un ar mazu jaudu (apakšā pa labi).
- Milzu zvaigznes atrodas diagrammas augšējā labajā pusē, bet baltie punduri atrodas apakšējā kreisajā pusē.



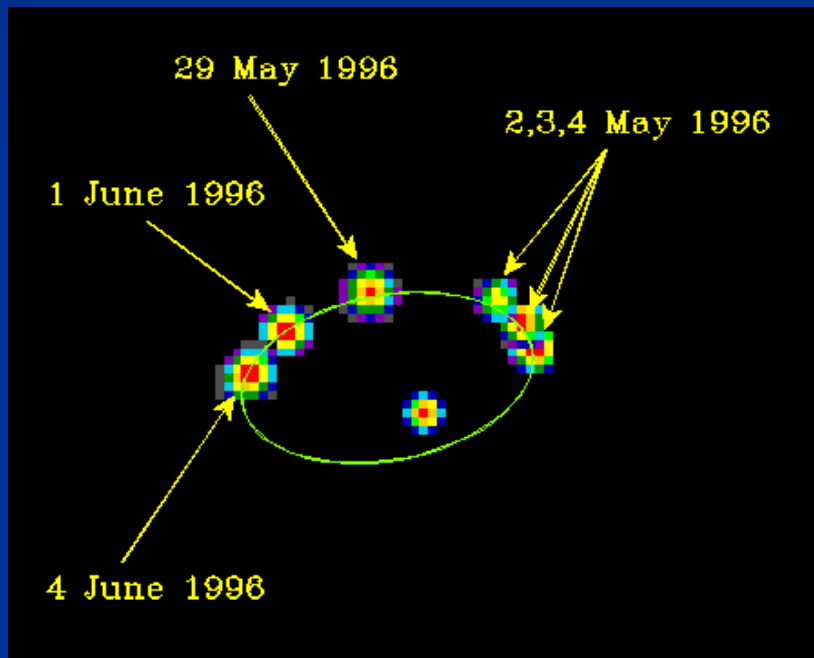
Maiņzvaigznes



Gaismas līkne: spožuma un laika grafiks.

- Maiņzvaigznes ir zvaigznes, kas laika gaitā maina savu spožumu.
- Lielākā daļa zvaigžņu ir maiņzvaigznes; mehānismi var atšķirties, jo zvaigznes svārstās, uzliesmo vai eksplodē, vai tās aizēno pavadošā zvaigzne vai planēta.
- Maiņzvaigznes sniedz svarīgu informāciju par zvaigžņu dabu un evolūci

Dubultzvaigznes un vairākkārtīgas zvaigznes



Micara orbitālā kustība Lielajā Lācī.
Avots: NPOI Group, USNO, NRL

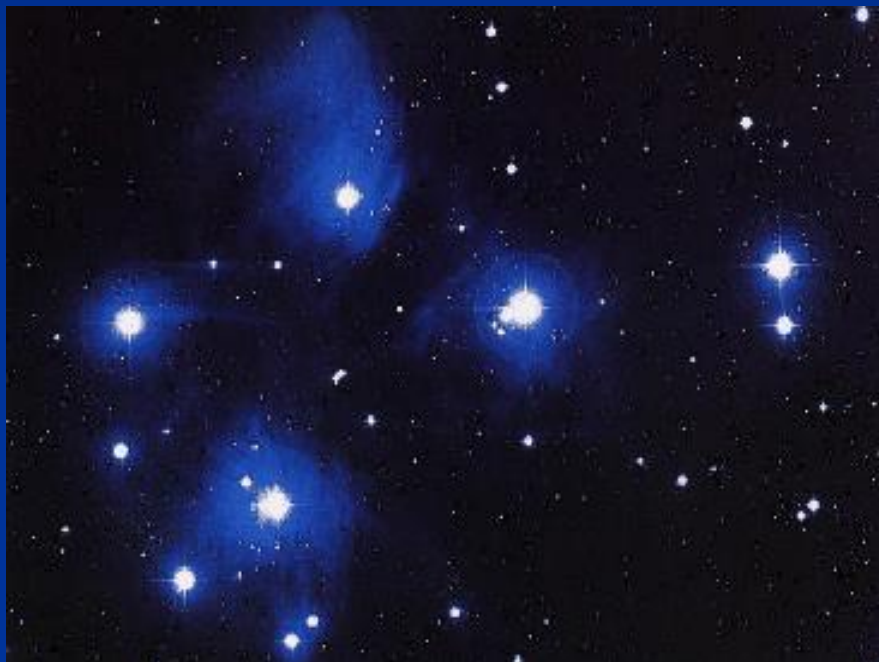
- Dubultzvaigznes ir zvaigžņu pāri, kas gravitācijas dēļ atrodas tuvu viens otram un riņķo viens ap otru. Tās var būt redzamas tieši (kā attēlā pa kreisi), vai tās var noteikt pēc spektriem vai savstarpējā aptumsuma.
- Tās ir vissvarīgākais līdzeklis zvaigžņu masas mērīšanai.
- Vairākkārtīgas zvaigznes ir trīs vai vairākas zvaigznes, kuras saista kopā gravitācija.



Zvaigžņu kopas

"Dabas eksperimenti"

- Zvaigžņu kopas ir zvaigžņu grupas, kas gravitācijas dēļ atrodas tuvu viena otrai un visas kopā pārvietojas telpā.
- Tās radušās vienā laikā un vietā, no viena materiāla un atrodas vienādā attālumā, atšķiras tikai pēc masas.
- Kopas ir kā zvaigžņu paraugi ar dažādu masu, bet ar vienādu vecumu.



Vaļējā zvaigžņu kopa Plejādes.
Avots: Vilsona kalna observatorija

No kā sastāv Saule un zvaigznes?



Ķīmisko elementu daudzums kosmosā: putnu sēklas H (90%), rīsi He (8%), pupiņas C, N un O un daži citi elementi (2%).

- Izmantojot spektroskopiju un citas metodes, astronomi var identificēt "galvenos materiālus", no kuriem sastāv zvaigznes.
- Ūdeņradis (H) un hēlijs (He) ir visizplatītākie elementi, un tie radās, veidojoties Visumam.
- Smagāki elementi ir miljoniem vai miljardu reižu mazāk izplatīti. Tie radās zvaigžņu iekšienē kodoltermiskajās reakcijās.

1 H																	2 He				
3 Li	4 Be															5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg															13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn			
87 Fr	88 Ra			104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 UUp	116 Lv	117 Uus	118 Uuo			
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu					
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr					

Lielajā Sprādzienā radītie elementi

Nukleosintēzes radītie elementi,
zvaigžņu kodolā

Pārnovu radītie elementi

Zvaigžņu uzbūves likumi

- Zvaigznes iekšienē spiediens palielinās līdz ar dziļumu augšējo slāņu svara dēļ.
- Saskaņā ar gāzu likumiem, temperatūra un blīvums palielinās, palielinoties spiedienam.
- Enerģija plūst no iekšējās karstākās daļas uz ārējo aukstāko daļu starojuma un konvekcijas ceļā.
- Ja enerģija izplūst no zvaigznes, zvaigzne atdziest, ja vien iekšā netik radīta papildu enerģija.
- *Zvaigžņu uzbūvi nosaka šie vienkāršie un universālie fizikas likumi.*



Piemērs: Kāpēc Saule nesabrūk un nesaraujas?



- Piepūstiet balonu, kā parādīts attēlā kreisajā pusē.
- Atmosfēras spiediens "spiež" balonu uz iekšu. Tas nesaraujas, jo gāzes spiediens "spiež" balonu uz āru.
- Saules iekšienē gravitāciju, kas virza materiālu uz iekšu, līdzsvaro gāzes spiediens.

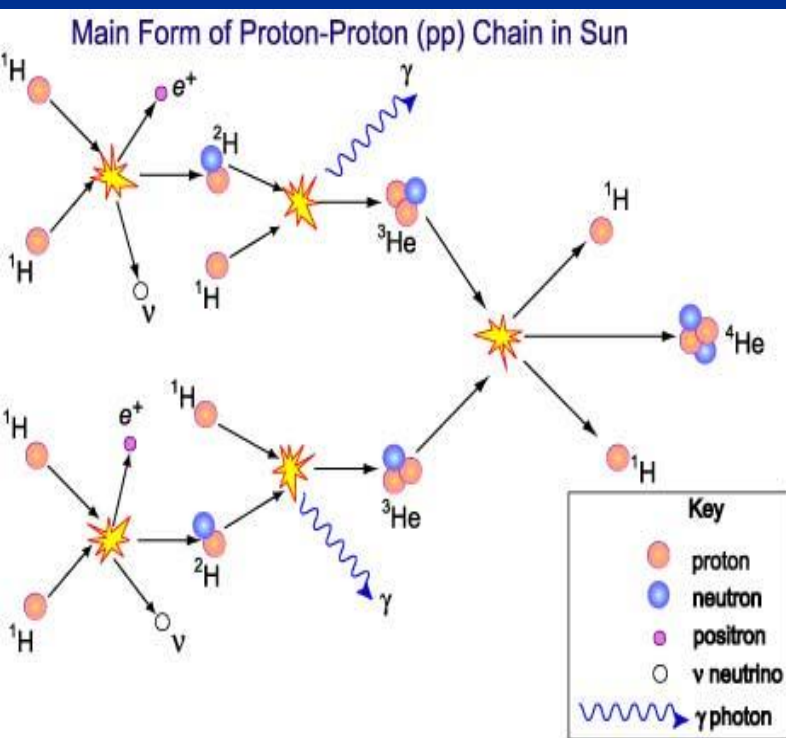
Saules un zvaigžņu enerģijas avots

- Gāzes, naftas vai oglekļa ķīmiskā sadedzināšana? Šis process ir tik neefektīvs, ka Saulei enerģiju dotu tikai dažus tūkstošus gadu.
- Lēna saspiešanās gravitācijas dēļ? Tā Saulei varētu dot enerģiju miljoniem gadu, taču Saule ir miljardus gadu veca.
- Radioaktivitāte/kodolu dalīšanās? Radioaktīvie izotopi Saulē un zvaigznēs gandrīz nemaz nepastāv.
- Vieglo elementu kodolsintēze, radot smagākus elementus? **Jā! Tas ir ļoti efektīvs process, un vieglie elementi, piemēram, ūdeņradis un hēlijs, veido 98% no Saules un zvaigznēm.**



Protonu-protonu cikls

ir galvenais Saules kodolsintēzes process



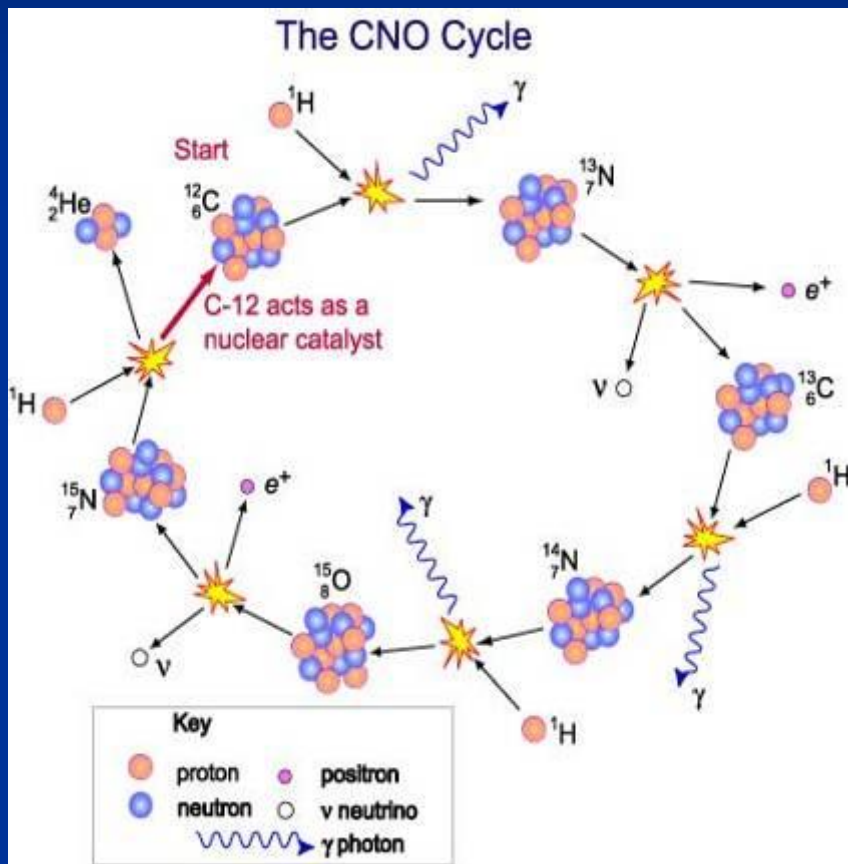
Protonu-protonu cikls

Avots: Australia National Telescope Facility

- Augstā temperatūrā un blīvumā tādās zvaigznēs kā Saule protoni (sarkanā krāsā) pārvar elektrostātisko atgrūšanos starp tiem un veido ^2H (deitēriju) un neitrīno (ν).
- Vēlāk cits protons savienojas ar deitēriju, veidojot ^3He .
- Vēlāk ^3He kodoli savienojas viens ar otru, veidojot ^4He kodolu un atbrīvojot divus protonus.
- Rezultāts: 4 protoni veido hēliju un rada enerģiju (gamma starojumu un kinētisko enerģiju).



Oglekļa – slāpekļa – skābekļa cikls



CNO cikls

Avots: Australia National Telescope Facility

- Masīvās zvaigznēs ar ļoti karstu kodolu protoni (sarkanie) var sadurties ar ^{12}C (oglekļa) kodolu (augšējā kreisajā pusē).
- Tas uzsāk ciklisku reakciju secību, kurā saplūst četri protoni, veidojot hēlija kodolu (augšējā kreisajā pusē).
- Cikla beigās atkal tiek iegūts ^{12}C kodols, tāpēc tas netiek radīts un netiek iznīcināts; tas darbojas kā kodolkatalizators.



Zvaigžņu "modeļu" veidošana

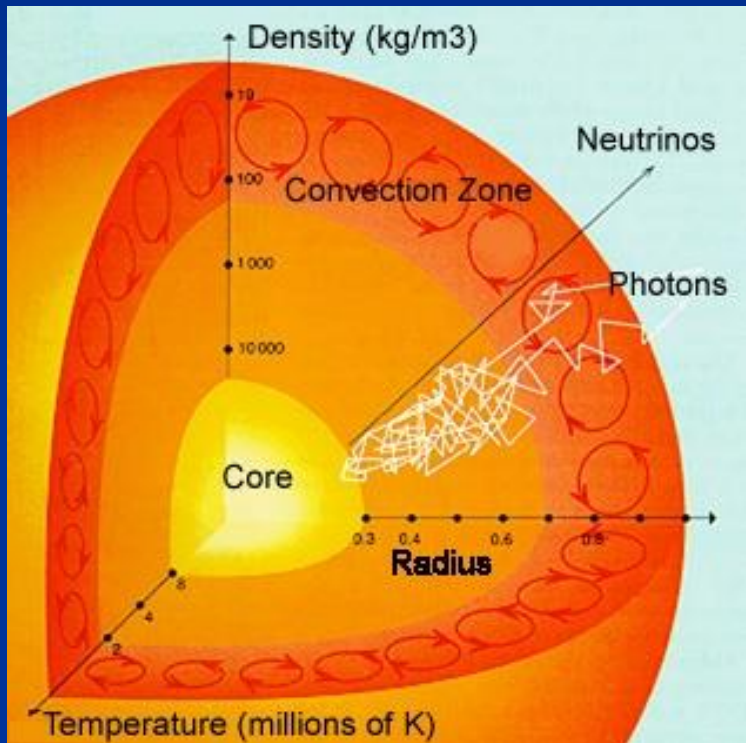
- Likumi, kas apraksta zvaigžņu struktūru, tiek izteikti vienādojumos un atrisināti ar datora palīdzību.
- Dators aprēķina temperatūru, blīvumu, spiedienu un jaudu katrā Saules vai zvaigznes punktā. To sauc par zvaigznes modeli.
- Saules centrā blīvums ir 150 reizes lielāks par ūdens blīvumu, un temperatūra ir $\sim 15\,000\,000\text{ K}$!



Saules iekšienē

Balstās uz Saules "modeli", kas aprēķināts ar datoru

- Karstā kodola iekšpusē kodolreakcijas ražo enerģiju, pārvērojot ūdeņradi hēlijā.
- Starojuma zonā virs kodola enerģija starojuma veidā plūst uz āru.
- Konvektīvajā zonā, starp starojuma zonu un virsmu, enerģija plūst uz āru konvekcijas ceļā.
- Fotosfēra uz virsmas ir slānis, kurā zvaigzne kļūst caurspīdīga.



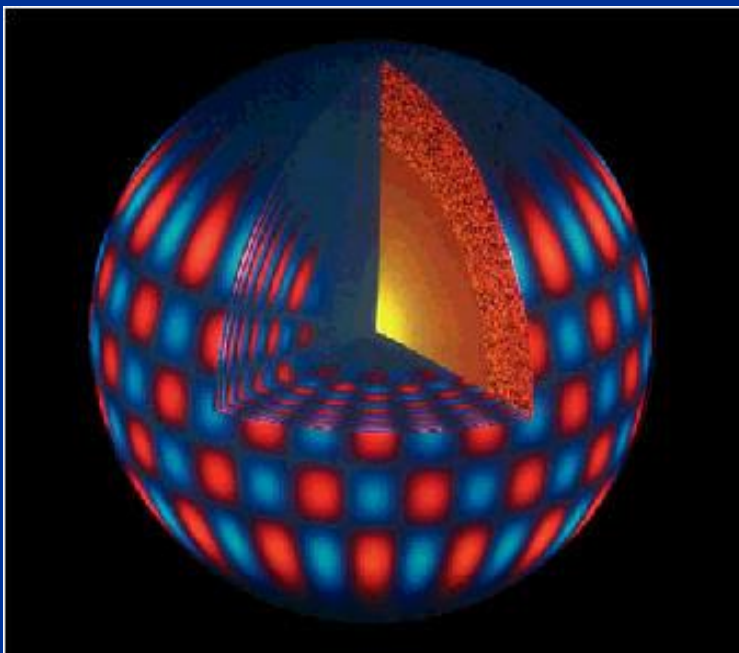
Saules modelis

Avots: Teorētiskās fizikas institūts,
Oslo Universitāte



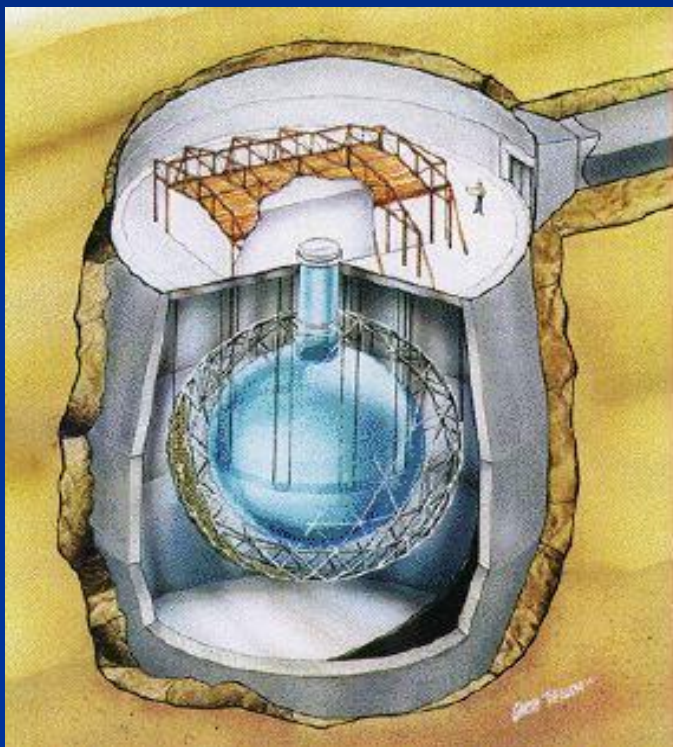
Modeļa pārbaude: helioseismoloģija

- Saule viegli vibrē tūkstošos veidu (rakstu). Viens no tiem ir parādīts attēlā pa kreisi.
- Šīs vibrācijas var novērot un izmantot, lai izdarītu secinājumus par Saules iekšējo struktūru, līdz ar to pārbaudot Saules uzbūves modeļus. Šis process ir pazīstams kā helioseismoloģija.
- Līdzīgas vibrācijas var novērot arī citās zvaigznēs: astroseismoloģija.



Saules vibrācijas mākslinieka skatījumā.
Avots: ASV Nacionālā optiskās astronomijas
observatorija

Modeļa pārbaude: Saules neitrīno



- Kodolsintēzes reakcijas rada elementārdaļiņas, ko sauc par neitrīno.
- Tām ir ļoti maza masa, un tās reti mijiedarbojas ar vielu.
- To masa tika noteikta un izmērīta, pateicoties īpašām observatorijām, piemēram, Sadberijas Neitrīno observatorijai (pa kreisi). Rezultāti atbilst modeļos iegūtajām prognozēm.

Neitrīno observatorija, Sadberija
Avots: Sudbury Neutrino Observatory



Zvaigžņu dzīves ilgums

- Zvaigznes dzīves ilgums ir atkarīgs no tā, cik daudz tajā ir kodoldegvielas (ūdeņraža), un cik ātri to patērē (jaudas).
- Visizplatītākās ir zvaigznes, kas ir mazāk masīvas nekā mūsu Saule. Tām ir mazāk degvielas, bet daudz mazāka jauda, tāpēc tām ir ilgāks mūžs.
- Zvaigznes, kas ir masīvākas par Sauli, ir retāk sastopamas. Tām ir vairāk degvielas, bet jauda daudz lielāka, tāpēc tām ir īsāks mūžs.



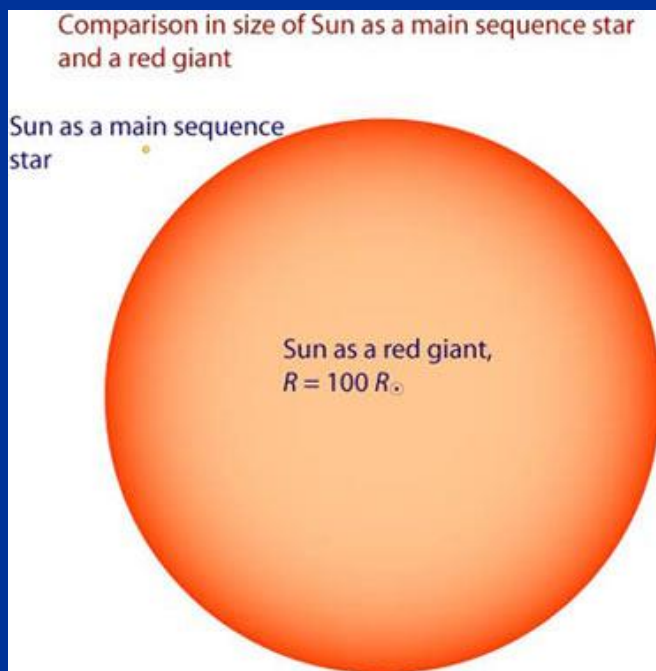
Kā astronomi uzzina par zvaigžņu evolūciju?

- Novērojot zvaigznes dažādos dzīves posmos un izvietojot tos loģiskās evolūcijas secībā.
- Modeļu veidošana, izmantojot datorus un fizikas likumus, un kodolsintēzes procesā radušos zvaigžņu sastāva izmaiņu novērojumi.
- Zvaigžņu kopu un/vai zvaigžņu grupu ar dažādu masu, bet ar vienādu vecumu izpēte.
- Ātro un netipisko fāžu izpēte zvaigžņu dzīvē (piemēram, pārnovas un novas).
- Pētīt mainīgas pulsējošas zvaigznes, mēra lēnas izmaiņas pulsācijas periodā, ko izraisa to evolūcija.



Saulei līdzīgu zvaigžņu evolūcija

- Saulei līdzīga zvaigzne pirmajos $\sim 90\%$ savas dzīves laika īpaši nemainās, kamēr tai ir pietiekami daudz degvielas (ūdeņraža), lai turpinātu kodoltermiskās reakcijas. Mēs to saucam par galvenās secības zvaigzni.



- Kad degviela (ūdeņradis) beidzas, tā izplešas par sarkanu milzu zvaigzni.
- Kodolā temperatūra var pieaugt pietiekami, lai sāktu ražot enerģiju, hēlijam pārvērošoties ogleklī.
- Kad hēlija degviela ir beigusies, zvaigzne izplešas par vēl lielāku sarkano milzi, simtiem reižu lielāku par Sauli.

Izmēru salīdzinājums: Saule - sarkanais milzis
Avots: Australia National Telescope Facility



Saulei līdzīgu zvaigžņu dzīves beigas



Gliemeža planetārais miglājs.
Avots: NASA

- Kad zvaigzne kļūst par sarkano milzi, tā sāk pulsēt. Mēs to saucam par Miras tipa zvaigzni.
- Pulsācija izraisa zvaigznes ārējo slāņu atdalīšanos, tie veido skaistu planetāro miglāju (kreisajā pusē).
- Pāri palikušais zvaigznes kodols ir punduris, blīvs, balts, mazs un bez degvielas.

Baltais punduris

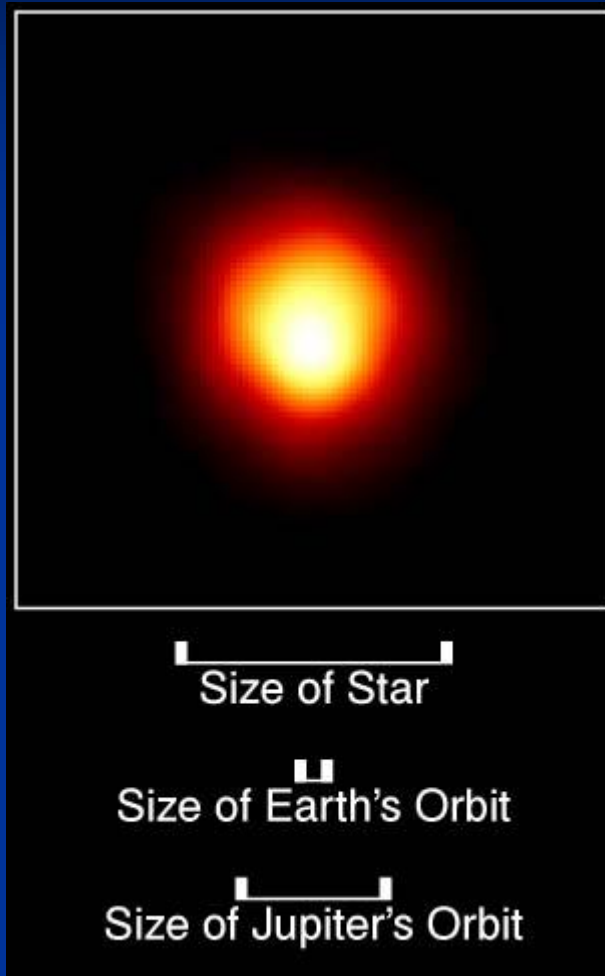


Baltais punduris – Sīriusa pavadonis (lejā).
Avots NASA

- Baltais punduris ir Saulei līdzīgu zvaigžņu mirušais kodols.
- Baltā pundura masa ir līdzīga Saulei, tilpums ir līdzīgs Zemei, un blīvums ir miljons reižu lielāks nekā ūdens blīvums.
- Baltajā pundurī gravitācijas spēku līdzsvaro elektronu kvantu spiediens tā iekšpusē.
- Daudzām tuvumā esošajām zvaigznēm, tostarp Sīriusam (pa kreisi) un Procionam, ir baltie punduri - pavadoņi.



Masīvas zvaigznes evolūcija



- Masīvas zvaigznes ir retas, ar lielu jaudu, un patērē savu degvielu ļoti ātri - dažos miljonos gadu.
- Kad zvaigznes iztērē degvielu, tās izplešas un kļūst par sarkanajiem pārmilžiem.
- To kodols ir ļoti karsts, pietiekami, lai ražotu tik smagus elementus kā dzelzs.
- Betelgeize (pa kreisi) Oriona zvaigznājā ir spilgti sarkans pārmilzis. Tā ir daudz lielāka Zemes orbītu.

Betelgeize.

Avots: NASA/ESA/HST



Masīvas zvaigznes dzīves beigas

- Kad masīvas zvaigznes kodols galvenokārt sastāv no dzelzs, tai vairs nav kodoldegvielas, lai turpinātu kodolsintēzi, un tā vairs nevar palikt karsta.
- Gravitācija saspiež kodolu, kas pārtop par neitronu zvaigzni, atbrīvojot milzīgu daudzumu gravitācijas enerģijas un novedot zvaigzni līdz pārnovas eksplozijai (pa kreisi).
- Pārnovas rada elementus, kas ir smagāki par dzelzi, un izsviež tos un citus elementus telpā. Tie kļūst par daļu no jaunām zvaigznēm, planē



Krabja miglājs, paliekas no pārnovas sprādziena 1054. gadā. Avots: NASA

Neitronu zvaigznes



- Zvaigžņu kodoli ar masu no 1,5 līdz 3 Saules masām kolapsē un dzīves beigās kļūst par neitronu zvaigznēm.
- To diametrs ir aptuveni 10 km, un to blīvums ir triljoniem reižu lielāks nekā ūdens blīvums.
- Tās sastāv no neitroniem un eksotiskākām daļiņām.
- Jaunas neitronu zvaigznes ātri griežas un izstaro regulārus radiostarojuma impulsus, un tās sauc par pulsāriem.

Pulsārs, neitronu zvaigzne Krabja miglāja centrā. Rotācijas enerģija pārveidojas un ierosina miglāja spīdēšanu.

Avots: NASA/ESA/HST

Melnie caurumi



Gulbis X-1 mākslinieka skatījumā, redzama zvaigzne (pa kreisi) ar melno caurumu (pa labi) akrēcijas diska centrā.
Avots: NASA.

- Melnais caurums ir astronomisks objekts, kura gravitācija ir tik spēcīga, ka no tā nevar izklūt nekas, pat gaisma.
- Retāk sastopamo masīvo zvaigžņu (vairāk nekā 30 reižu lielāka par Saules masu) kodoli kļūst par melnajiem caurumiem, kad beidzas to degviela.
- Viens veids, kā noteikt melno caurumu: ja ap to riņķo redzama zvaigzne (pa kreisi).



Īpašas maiņzvaigznes



Parasta zvaigzne (pa kreisi) un baltā pundurzvaigzne ar akrēcijas disku (pa labi), kas «zog» gāzi no pirmās zvaigznes.

Avots: NASA

- Ap daudzām zvaigžņu paliekām – baltajiem punduriem, melnajiem caurumiem vai neitronu zvaigznēm – riņķo normāla redzama zvaigzne.
- Ja gāze no parastās zvaigznes plūst uz kompakto objektu, ap to var izveidoties akrēcijas disks (pa labi).
- Kad gāze nokrīt uz kompakta objekta, tas var uzliesmot, uzsprāgt vai radīt izvirdumu. To sauc par kataklizmisko maiņzvaigzni.

Zvaigžņu dzimšana

- Zvaigznes veidojas molekulāro mākoņu (miglāju) iekšienē, tie sastāv no aukstas gāzes un putekļiem.
- Starpzvaigžņu putekļi un gāze ir aptuveni 10% no mūsu Galaktikā esošās vielas.
- Jaunās zvaigznes parasti var atrast miglājā, no kura tās radušās, vai tā tuvumā.
- Tuvākais zvaigžņu veidošanās apgabala piemērs ir Oriona miglājs (pa kreisi), kas atrodas aptuveni 1500 gaismas gadu attālumā no mums.



Oriona miglājs
Avots: NASA



Starpzvaigžņu gāze



Oriona miglājs. Gāzes starojumu rada ultravioletā gaismā no miglāja zvaigznēm.
Avots: NASA

- Starpzvaigžņu gāzi (atomus vai molekulas) var ierosināt ultravioletā gaismā, kas nāk no tuvumā esošas zvaigznes, veidojot emisijas miglāju (pa kreisi).
- Aukstā gāze starp zvaigznēm rada radioviļņus, kurus var noteikt ar radioteleskopiem.
- 98% starpzvaigžņu gāzes sastāv no ūdeņraža un hēlija.



Starpzvaigžņu putekļi



Miglājs M16

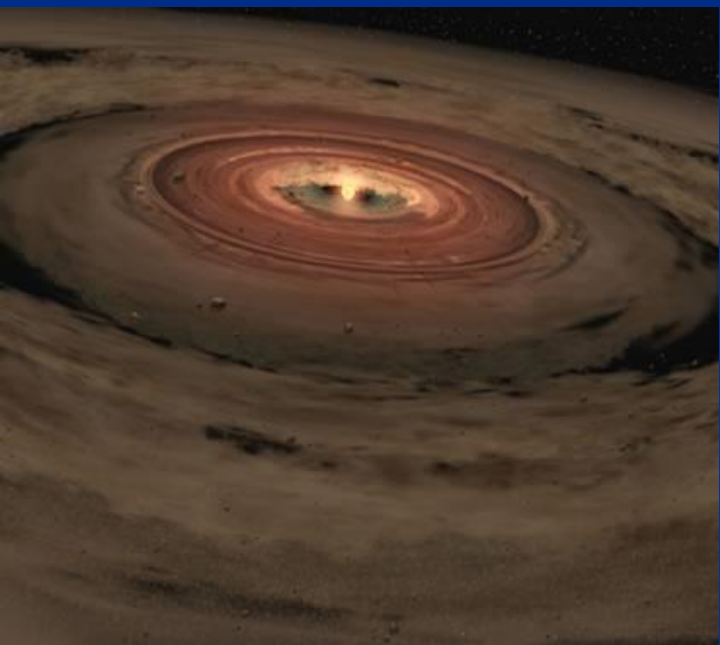
Izcelsme: NASA/ESA/HST

- Spektra redzamajā daļā spožo zvaigžņu tuvumā var konstatēt starpzvaigžņu putekļu klātbūtni.
- Putekļi var bloķēt gaismu no zvaigznēm un gāzes (pa kreisi). Šajos mākoņos veidojas zvaigznes.
- Tikai 1% no starpzvaigžņu materiāla ir putekļi. Putekļu daļiņas ir dažus simtus nm lielas, un tās galvenokārt veido silikāti vai grafīts.



Zvaigžņu veidošanās

- Zvaigznes veidojas blīvās miglāja daļās, ko sauc par kodoliem.
- Gravitācija nodrošina kodolu saspiešanos.
- Impulsa momenta saglabāšanās paātrina kodolu rotāciju, tie kļūst saplacināti un beidzot pārvēršas diskos.
- Diska centrā veidojas zvaigzne. Planētas veidojas diska aukstākajā ārējā daļā.



Planētu sistēma veidošanās procesā mākslinieka skatījumā. Avots: NASA



Protoplanētu diski: proplīdi

Planētu sistēmas veidošanās procesā



- Oriona miglājā (pa kreisi) ir novēroti protoplanētu diski.
- Diska centrā zvaigzne gandrīz nav redzama.
- Putekļu disks bloķē gaismu, kas atrodas aiz tā.
- Šie un citi novērojumi sniedz tiešus pierādījumus par planētu sistēmu veidošanos.

Proplīdi

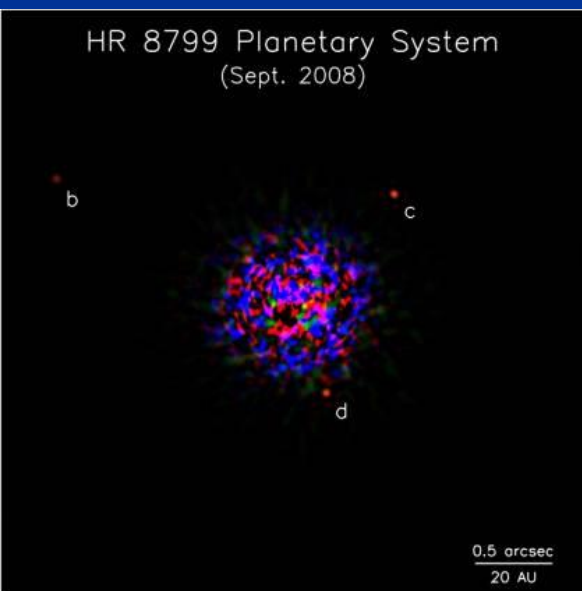
Avots: NASA/ESA/HST



Eksoplanētas = citplanētas

Planētas pie citām zvaigznēm

- Eksoplanētas parasti tiek atklātas un pētītas, izmantojot gravitācijas ietekmi uz zvaigzni, vai zvaigznes gaismas aptumšošanos, ja notiek tranzīts.
- Nedaudzas eksoplanētas ir ieraudzītas tieši (pa kreisi).
- Atšķirībā no mūsu Saules sistēmas planētām, daudzas eksoplanētas ir milzīgas un ļoti tuvu tās zvaigznei. Tas ļauj astronomiem modificēt/labot teorijas par to, kā veidojas planētu sistēmas.



Zvaigznes HR 8799 eksoplanēta.
Avots: C. Marois et al., NRC Canada



Nobeiguma apsvērumi

- "Gravitācija virza zvaigžņu veidošanos, dzīvi un nāvi" [profesors R. L. Bišops]
- Zvaigžņu dzimšanas pētījumi palīdz izskaidrot Saules sistēmas un citu planētu sistēmu izcelsmi.
- Zvaigžņu evolūcija norāda uz enerģijas avotu, kas padara iespējamu dzīvību uz Zemes.
- Zvaigžņu dzīve un bojāeja rada ķīmiskos elementus, kas ir smagāki par ūdeņradi, no tiem sastāv zvaigznes, planētas un dzīvās būtnes.
- Zvaigznes bojāejas laikā gravitācija rada dīvainākos objektus Visumā: baltos pundurus, neitronu zvaigznes un melnos caurumus.



Liels paldies
par jūsu uzmanību!

