

HVIEZDY I. a II. – ZÁKLADNÉ POZNATKY O VÝVOJI A CHEMICKOM ZLOŽENÍ HVIEZD, HLAVNÁ HVIEZDNA POSTUPNOSŤ

1. Vznik hviezd: Podľa Wikipédie, hviezdy vznikajú z pôvodne chladných, riedkych a studených mračien medzihviezdnej hmoty. Hustota týchto mračien je vyššia ako hustota medzihviezdneho média, ale stále nižšia ako hustota vnútri vákovej komory. Tieto oblasti sa nazývajú **molekulárne mračná** a sú zväčša tvorené vodíkom s ~23-28 % hélia a malým percentom ťažších prvkov. Príkladom takejto oblasti, v ktorej vznikajú nové hviezdy, je **hmlovina v Orióne**. Z molekulárnych mračien tu vznikajú obrovské hviezdy, ktoré osvetľujú tieto mračná a tiež ionizujú vodík a tak vznikajú svietiace hmloviny nazývané oblasti H II. Tieto mračná sa nachádzajú hlavne v ramenách špirálových galaxií, v šošovkových a nepravidelných galaxiách. Práve v týchto miestach je preto hviezdotvorba najintenzívnejšia. Počas kolapsu mraku vytvárajú jednotlivé zhluky hustejšieho prachu a plynu, tzv. **Bokove globuly**. Počas kolapsu globúl a rastu hustoty sa gravitačná energia premieňa na teplo a teplota stúpa. S nárastom teploty stúpa tiež rýchlosť rotácie mraku. V mračne sa začínajú tvoriť hustejšie oblasti, zárodky samotných hviezd. Tieto zárodky s hmotnosťou **až desaťtisíc slnečných hmotností** ďalej kolabujú. Postupne začína voľnému gravitačnému rúteniu brániť vnútorný tlak. Keď mrak dosiahne zhruba stabilný stav, vzniká jadro tzv. protohviezdy. Protohviezdy sú búrlivé, svietiace, nestabilné objekty, ktoré sa naďalej scvrkávajú.



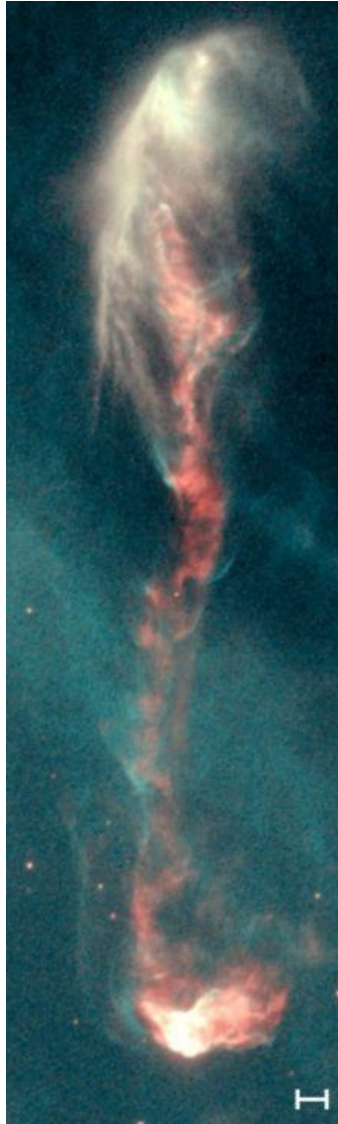
Tieto hviezdy **pred hlavnou postupnosťou** často obklopuje disk prachu a plynu, **tzv. protoplanetárny disk** a sú poháňané hlavne uvoľňovaním gravitačnej energie. Obdobie gravitačného kolapsu trvá zhruba 10-15 miliónov rokov. Mladé hviezdy s hmotnosťou menej ako $2 M_{\odot}$ sa nazývajú **hviezdy T Tauri**. Hviezdy s väčšou hmotnosťou sa nazývajú **Herbig Ae/Be hviezdy**. Tieto mladé hviezdy vyžarujú pozdĺž svojej osi rotácie prúdy plynu, čo môže znížiť moment hybnosti vznikajúcej hviezdy, v podobe malých hmlovinovitých oblastí známych ako **Herbigove-Harove objekty**. Tieto prúdy v kombinácii so žiarením blízkych masívnych hviezd môžu rozohnať okolitý mrak, v ktorom hviezda vznikla. Napokon teplota a tlak v jadre protohviezdy vzrastú natoľko, že sa zapália termojadrové reakcie. **Gravitačná sila sa vyrovná s tlakom žiarenia prichádzajúceho z jadra, hviezda sa prestane ďalej zmenšovať a usadí sa na hlavnej postupnosti, kde strávi až 90 % svojho života.**



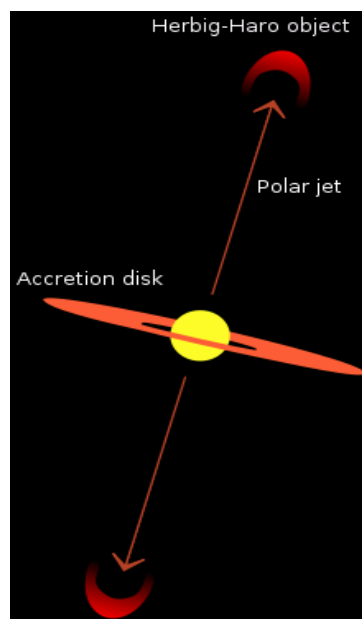
Umelecká vzia protoplanetárneho disku



T Tauri je takmer dospelá hviezda, nachádzajúca sa v súhvezdí Býk



Herbigov-Haarov objekt HH47 odfoťený pomocou Hubblovho teleskopu. Mierka predstavuje 1000 AU, čo je 20-násobok veľkosti Slna, čo je 20-násobok veľkosti Slnačnej sústavy



2. **Ďalší vývoj hviezd:** Na začiatku života **hviezdy T Tauri** nasledujú **Hayashiho čiaru** - zmenšujú sa a klesá ich svietivosť, teplota zostáva zhruba rovnaká. Ľahšie T Tauri hviezdy prechádzajú do hlavnej postupnosti, zatiaľ čo ťažké hviezdy pokračujú **Henryeho stopou**. To, ako dlho hviezda zotrvá v pomerne stabilnej fáze hlavnej postupnosti, **závisí od jej počiatkovej hmotnosti**. Hmotnejšie hviezdy paradoxne žijú kratšie, pretože termojadrové reakcie v ich jadrách prebiehajú **omnoho búrlivejšie a rýchlejšie ako v málo hmotných hviezdach**. Život hviezdy s hmotnosťou Slnka trvá celé miliardy rokov, život oveľa hmotnejších obrov a nadobrov **len milióny alebo dokonca len státisíce rokov**. Od začiatku hlavnej postupnosti sa s postupným spaľovaním vodíka zvyšuje podiel hélia v jadre hviezdy, rýchlosť jadrovej fúzie pomaly narastá spolu s teplotou a svietivosťou hviezdy. Odkedy Slnko dosiahlo hlavnú postupnosť pred 4,6 miliardami rokov, jeho svietivosť sa podľa výpočtov dodnes zvýšila o 40 %.



Slnko – najlepšie preskúmaná hviezda

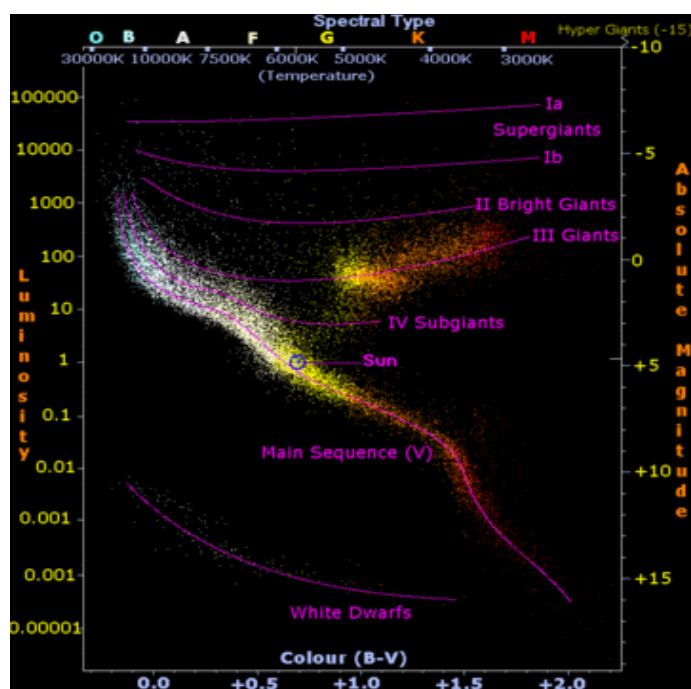
Dĺžka obdobia, ktoré hviezda strávi na hlavnej postupnosti, závisí najmä od množstva paliva, ktoré ma hviezda k dispozícii a rýchlosti fúzie, spaľovania tohto paliva, tzn. pôvodnej hmotnosti a svietivosti hviezdy. Odhadovaná dĺžka života Slnka je zhruba 10 miliárd rokov. Ťažké hviezdy spotrebúvajú palivo veľmi rýchlo a ich život je krátky. Ľahké hviezdy naopak mňajú palivo veľmi pomaly. Hviezdy ľahšie ako $0,25 M_{\odot}$, tzv. červené trpaslíky, dokážu na fúziu využiť **takmer všetku** ich hmotnosť, zatiaľ čo hviezdy s hmotnosťou $\sim 1 M_{\odot}$ využijú ako palivo **len 10 %** svojej hmotnosti. Kombinácia nízkej spotreby a relatívne veľkých použiteľných zásob paliva, umožňuje podľa výpočtov hviezdám s hmotnosťou $\sim 0,25 M_{\odot}$ existovať

zhruba trilión rokov, a najľahším hviezdám spaľujúcim vodík ($0,08 M_{\odot}$) dokonca 12 triliónov rokov. A keďže životnosť takýchto hviezd je dlhšia ako súčasný odhadovaný vek vesmíru (13,8 miliardy rokov), pravdepodobne ešte žiadne hviezdy ľahšie ako $0,85 M_{\odot}$ neopustili hlavnú postupnosť.



Červený trpaslík, najbežnejší typ hviezdy v našej galaxii

Prvky ťažšie ako hélium zohrávajú popri hmotnosti veľmi dôležitú úlohu vo vývoji hviezdy. V astronómii sa všetky prvky ťažšie ako hélium **považujú za kovy** (ang. metal), **koncentrácia týchto prvkov sa volá metalicita**. Metalicita môže ovplyvniť dĺžku spaľovania paliva hviezdy, vznik magnetických polí a vplýva aj na intenzitu hviezdneho vetra. **Staršie hviezdy II populácie** majú kvôli zloženiu molekulárneho mračna, z ktorého vznikli, **podstatne nižšiu metalicitu ako mladšie hviezdy I populácie**. Postupom času sa obsah ťažších prvkov v týchto mračnách zvyšuje, pretože zomierajúce hviezdy rozptýlia tieto prvky do okolia.



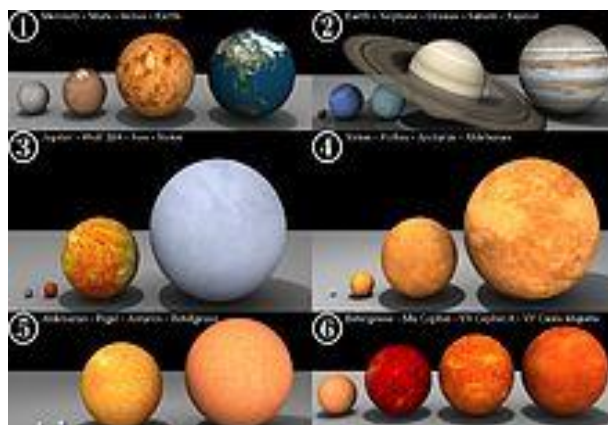
- 3. Čo je to vlastne hviezda:** Hviezda alebo zastarane **stálica** je plazmové (plynné), približne guľovité teleso vo vesmíre, ktoré má vlastný zdroj viditeľného žiarenia, drží ho pokope jeho vlastná gravitácia a má hmotnosť 0,08 až 300 hmotností Slnka. Vo hviezdach je sústredená väčšina **viditeľnej** hmoty vesmíru. Najbližšou hviezdou k Zemi je Slnko, ktoré je zdrojom väčšiny energie na našej planéte. Pri vhodných atmosférických podmienkach sú v noci zo Zeme viditeľné aj iné hviezdy. Kvôli skutočne obrovským vzdialenostiam vyzerajú ako množstvo nehybných, viac či menej blikajúcich svetelných bodov.
- 4. Chemické zloženie hviezd:** Do objavu spektroskopie v 19. storočí sa nevedelo, z čoho sa hviezdy skladajú. Gustavovi Robertovi Kirchhoffovi sa v druhej polovici 19. storočia podarilo dokázať, že istá tmavá čiara v slnečnom spektre je spôsobená rozžeraveným sodíkom. Bola to prvá indícia objavu, že hviezdy sa skladajú **z rovnakých chemických prvkov ako telesá na Zemi**. Nakoľko však zároveň všetko napovedalo tomu, že hviezdy sú veľmi horúce, tieto prvky sa vyskytujú väčšinou voľne a teda nie sú viazané v početných chemických zlúčeninách ako na Zemi. Len najchladnejšie hviezdy majú na svojom povrchu niektoré jednoduché chemické zlúčeniny, napríklad TiO, CH a CN (na Slnku napr. OH, MgH, SiH). V dôsledku vysokej teploty je veľa atómov tiež ionizovaných. **Zmes voľných elektricky nabitých častíc (iónov) a neutrálnych častíc sa nazýva plazma**. V jadrách hviezd, kde je teplota najvyššia a dosahuje minimálne 7 miliónov stupňov, je existencia akejkoľvek chemickej zlúčeniny **nemožná**. Hmota hviezd v týchto častiach je v stave atómových jadier a voľných leptónov. Niektoré záverečné štádiá hviezd nie sú zložené z plazmy, **ale z tzv. degenerovaného plynu**. Jednotlivé prvky sa v spektre hviezd prejavujú ako čiary. Podľa ich meraní je najzastúpenejší chemický prvok vo všetkých plazmových hviezdach vznikajúcich v našej Galaxii vodík (71 %). Po ňom nasleduje hélium (27 %). Ostatné prvky tvoria oproti vodíku a hélíu **len nepatrnú prímes**, ktorej množstvo nie je pri všetkých hviezdach rovnaké. Podiel ťažkých prvkov sa zisťuje prostredníctvom obsahu železa v hviezdnej atmosfére, pretože železo je bežný prvok a jeho absorpčné (tmavé) čiary sa merajú relatívne ľahko. Keďže molekulárne mračná, z ktorých vznikajú hviezdy, sa postupne obohacujú o ťažšie prvky z výbuchov supernov, môžeme chemické zloženie použiť **aj na odvodenie veku hviezd** a toho, **koľkú generáciu hviezd** od vzniku vesmíru hviezda predstavuje. Staršie hviezdy majú menšie zastúpenie ťažších chemických prvkov ako mladšie.

Podiel ťažkých prvkov môže taktiež naznačovať, že hviezda má planetárny systém. Chemické zloženie hviezd sa časom mení v dôsledku termojadrových reakcií, ktoré menia prvky na iné prvky. HE 1327-2326 je hviezdou s najnižším odmeraným obsahom železa. Obsahuje len 1/200 000 železa, ktoré sa nachádza v Slnku. Naopak, μ Leonis obsahuje takmer dvojnásobok železa v porovnaní so Slnkom a hviezda 14 Herculis s planetárnym systémom ho obsahuje až trojnásobok. Existujú aj hviezdy so zvláštnym chemickým zložením, ktoré vykazujú vyššie množstvá niektorých prvkov, hlavne chrómu a prechodných kovov.



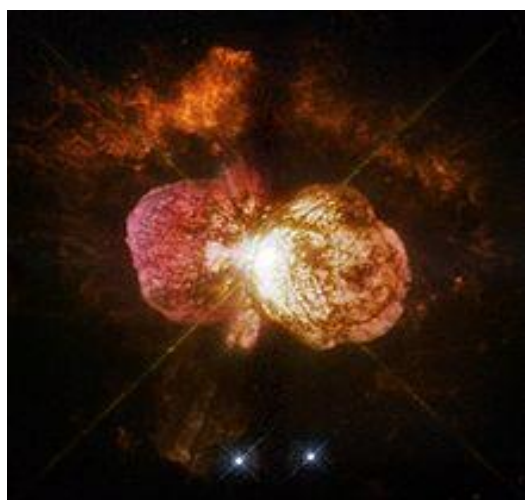
Degenerovaný plyn sa nachádza aj v neutrónových hviezdach

5. Veľkosť hviezd: Rozsah veľkostí hviezd je obrovský. Kolíše v rozhraní od veľkosti **20-45 km** u neutrónových hviezd (najmenšia hviezda by sa zmestila **do Liptovskej Mary**) až do veľkosti stonásobkov priemeru Slnka (nadobry – napríklad Betelgeuze v súhvezdí Orión, s priemerom **650-krát väčším ako priemer Slnka** ~ 900 000 000 km. Polomery hviezd môžu byť **až 3000-krát väčšie než je polomer Slnka**. Vo všeobecnosti platí, že so vzrastajúcim priemerom hviezdy klesá jej hustota.



Obrázok, na ktorom sa Zem nachádza na 1. obrázku celkom vpravo, umožňuje urobiť si aspoň základnú predstavu o obrovských rozdieloch v celkovej veľkosti planét a hviezd. Z tzv. Salpeterovho zákona však vyplýva, že najviac je malých objektov a najmenej tých najväčších.

- 6. Triedenie hviezd podľa teploty a svietivosti:** Hlavným zdrojom informácií o hviezdach je ich svetlo rozložené do spektra. Charakter spektra hviezd určuje predovšetkým teplota hviezdnej atmosféry. Súčasný systém klasifikácie hviezd má pôvod na začiatku 20. storočia. Vtedy sa hviezdy klasifikovali od A po Q na základe sily čiar vodíka. V tom čase nebolo známe, že hlavným faktorom ovplyvňujúcim silu tejto čiary je teplota. Čiara dosahuje maximum pri 9 000 K a slabne pri vyšších aj nižších teplotách. Po zoradení klasifikácie podľa teploty už pripomínala súčasnú schému. Podľa spektra čiže teploty delíme hviezdy do ôsmich hlavných tried (W, O, B, A, F, G, K a M) a 5 zriedkavých tried (Q, R, N, S, C). V rámci tejto klasifikácie rozoznávame hviezdy **raného spektrálneho typu** (O, B, A) a hviezdy **neskorého spektrálneho typu** (G, K, M, C, S). O sú veľmi horúce hviezdy. Teplota postupne klesá až po M, čo sú také chladné hviezdy, že v ich atmosférach môžu vznikáť molekuly. Niekoľko netradičných spektrálnych typov má špeciálnu klasifikáciu, medzi najbežnejšie patria L a T, označujúce po poradí najchladnejšie hviezdy a hnedé trpaslíky. Každé písmeno má 10 podkategórií, očíslovaných od 0 po 9 s postupne klesajúcou teplotou. Tento systém zlyháva pri extrémnych teplotách: hviezdy triedy O0 a O1 nemusia existovať. Biele trpaslíky majú vlastnú triedu označenú písmenom D. Tá sa ďalej delí na DA, DB, DC, DO, DZ, a DQ, podľa prevažujúcich čiar v spektre. Za tým nasleduje číselná hodnota označujúca teplotu.



Éta Carinae – jedna z najhmotnejších a najžiarivejších známych hviezd

7. Zánik hviezd: Najpočetnejšie hviezdy vo vesmíre, červené trpaslíky, zanikajú nenápadne – po vyhorení všetkého paliva pozvoľna chladnú až napokon **úplne zhasnú**. Hviezdy s hmotnosťou aspoň $0,4 M_{\odot}$ sa po vyčerpaní zásob vodíka v jadre **nafúknu a ochladia**. Vznikne červený obor. Zhruba o 5 miliárd rokov, keď Slnko vstúpi do tejto fázy, sa jeho polomer zväčší na zhruba 1 AU (150 mil. km). To predstavuje 250-násobný nárast. Slnko vo fáze obra stratí približne 30 % svojej hmotnosti. V červených obroch do $2,25 M_{\odot}$ pokračuje spaľovanie vodíka vo vrstve obklopujúcej jadro. Nakoniec v jadre vzrastie tlak natoľko, že začne fúzia hélia. Priemer hviezdy sa odvtedy postupne znižuje a povrchová teplota stúpa. Pri väčších hviezdach jadro prejde priamo zo spaľovania vodíka na spaľovanie hélia. Po spotrebovaní hélia v jadre pokračuje fúzia vo vrstve okolo horúceho jadra z uhlíka a kyslíka. Hviezda potom vo vývoji pokračuje cestou paralelnou s pôvodnou fázou červeného obra, ale s vyššou povrchovou teplotou. S postupným zmenšovaním hviezdneho jadra narastá intenzita žiarenia z jeho povrchu, čo vytvorí taký tlak žiarenia na vonkajšie vrstvy plynov, že ich doslova odhodí a vytvorí **planetárnu hmlovinu**. Ak má jadro po odvrhnutí vonkajšej atmosféry hmotnosť **menšiu ako $1,4 M_{\odot}$** , tak sa zmrští na pomerne malý objekt veľký približne ako Zem - biely trpaslík. Ten už nie je dostatočne ťažký na ďalšie stláčanie materiálu. **Biely trpaslík** však ešte dlho svieti z nažiarovaných zásob a postupne, veľmi pomaly, vybledne na **čierneho trpaslíka**. Veľmi ťažké hviezdy s hmotnosťou **viac ako $9 M_{\odot}$** počas fázy horenia hélia expandujú a vytvárajú **červeného nadobra**. Potom, ako vyčerpajú palivo v jadre, pokračujú v spaľovaní ťažších prvkov. Jadro sa zmenšuje, až kým teplota a tlak nie sú dostatočné na fúziu uhlíka. Tento proces pokračuje ďalšími fázami, v ktorých je palivo najskôr neón, potom kyslík a kremík. Tesne pred koncom života fúzia pokračuje v sérii vrstiev podobných cibuli. Každá vrstva spaľuje iný prvok. **Posledná fáza nastáva, keď hviezda začne produkovať železo**. Keďže jadro železa je pevnejšie viazané ako hociktoré iné ťažšie jadro, fúzia železa **nevytvára žiadnu energiu** - či fúzny proces, **naopak, spotrebúva energiu**. Z rovnakého dôvodu sa energia nedá získať ani štiepením železa. V relatívne starých a veľmi ťažkých hviezdach sa v jadre naakumuluje **veľké množstvo nereaktívneho železa**. Ťažké prvky v týchto hviezdach sa môžu dostať na povrch, a tak vznikne objekt známy ako Wolfova-Rayetova hviezda s hustým hviezdny vetrom. **Keď železné jadro dosiahne hmotnosť $>1,4 M_{\odot}$** , už viac nedokáže vzdorovať vlastnej gravitácii. Jadro náhle kolabuje,

elektróny sa kombinujú s protónmi a vytvárajú neutróny, neutrína a gama žiarenie. Nárazová vlna vyvolaná kolapsom spôsobí výbuch hviezdy, ktorý označujeme ako explózia supernovy. Supernovy sú také jasné, že na krátky okamih presvietia celú vlastnú galaxiu. Ak sa vyskytli v našej Galaxii, dali sa pozorovať voľným okom. **Ešte mohutnejšie sú explózie hypernov.**



Legendárna krabia hmlovina, resp. M1, je pozostatkom po výbuchu supernovy. V jej strede sa nachádza rotujúca neutrónová hviezda, otáčajúca sa 30-krát za sekundu. Ešte zaujímavejšie objekty sú však hypernovy, pri výbuchu ktorých vytrysknú z ich pólů dva prúdy plazmy, dosahujúce až rýchlosť svetla. Práve hypernovy by mali spôsobovať známe GRB (gamma ray bursts) – záblesky gama žiarenia.

Väčšina hmoty hviezdy je rozmetaná výbuchom supernovy (tak vznikajú hmloviny ako napr. Krabia hmlovina), a to, čo zostane, je neutrónová hviezda (ktorá sa niekedy prejavuje ako pulzar) alebo v prípade najväčších hviezd (dostatočne veľkých, aby zanechali hviezdny zostatok ťažší ako $\sim 4 M_{\odot}$) vznikne čierna diera. Pri neutrónovej hviezde je hmota v stave známom ako **degenerovaná neutrónová hmota**, prípadne môže v jadre obsahovať ešte exotickejšiu formu hmoty, **tzv. QCD hmotu**. V prípade čiernej diery je hmota v stave, ktorému v súčasnosti **nerozumieme**. Hmota, ktorá je hviezdou vyvrhnutá v podobe planetárnej hmloviny alebo zvyškov po výbuchu supernovy, sa neustále rozpína, mieša sa s medzihviezdnu hmotou a vracia sa tým do obehu, takže o nejaký čas z nej môžu vzniknúť nové hviezdy. Odvrhnuté vonkajšie vrstvy umierajúcich hviezd obsahujú ťažké prvky, ktoré po zrecyklovaní ďalšou generáciou hviezd umožňujú vznik kamenných planét, napríklad tej, na ktorej práve čítate tento článok.

Kontrolné otázky:

1. V ktorých typoch galaxií sa formujú molekulárne mračná?
2. Čo sú to Bokove globuly?
3. Kam sa dostane hviezda po prekročení Hayashiho čiary?
4. Ako dlho trvá obdobie gravitačného kolapsu pred vznikom hviezdy?
5. Ako sa nazývajú mladé hviezdy s hmotnosťou do 2 hmotností Slnka?
6. O koľko percent sa zvýšila svietivosť Slnka od jeho vstupu na hlavnú hviezdnu postupnosť?
7. Akú maximálnu hmotnosť musí mať hviezda, ak má využiť na jadrovú fúziu takmer celú svoju hmotnosť?
8. Ako dlho môžu existovať najľahšie hviezdy s hmotnosťou 0,08 hmotnosti Slnka?
9. Ktorý typ hviezd je najbežnejší v našej galaxii?
10. V dôsledku čoho sa časom mení chemické zloženie hviezd?
11. Čo je to plazma?
12. V akom rozpätí kolíše veľkosť najmenších známych hviezd?
13. A aké veľké môžu byť najväčšie známe hviezdy?
14. Čo hovorí Salpeterov zákon?
15. Ktoré triedy hviezd zaradíme medzi hviezdy neskorého spektrálneho typu?
16. V atmosfére ktorých hviezd už môžu vznikáť molekuly?
17. Akým veľkým písmenom sa označuje trieda bielych trpaslíkov?
18. Vytvára sa pri fúzii železa nejaká energia?
19. Akú hmotnosť musí dosiahnuť železné jadro kolabujúcej hviezdy, aby táto explodovala ako supernova?
20. Ktorý objekt má v Messierovom katalógu číslo 1?