

Téma: Popis vzdáleného vesmíru

Zpracoval Doc. RNDr. Zdeněk Hlaváč, CSc

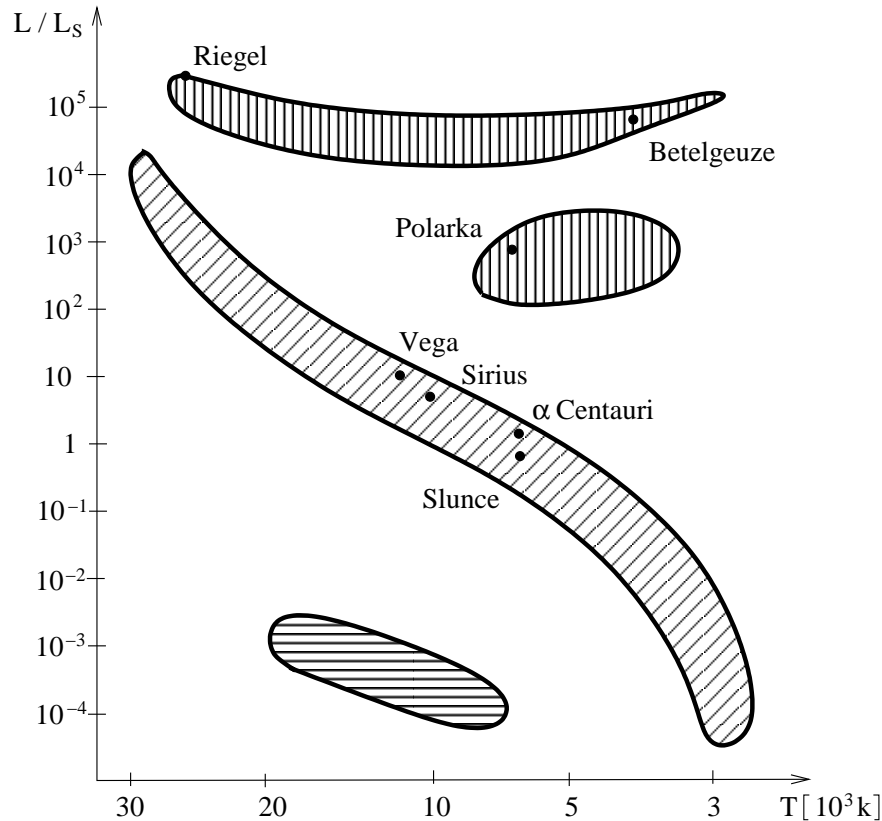
Vzdálenější vesmír, t.j. vesmír mimo naši sluneční soustavu, obsahuje jakožto hlavní vesmírná tělesa **hvězdy**. Jsou to zdroje elektromagnetického záření v širokém spektru vlnových délek, (většinou) včetně viditelné části spektra. Jejich hmotnost může být 0.08 až 120 hmotností Slunce. Normální hvězdy září rovněž viditelným světlem (takže je můžeme pozorovat), zatímco **degenerované hvězdy** většinou vidět nemůžeme. Jedná se o poslední stadia života "normálních" hvězd (viz níže). Jedná se o tzv. **bílé trpaslíky** popřípadě o tzv. **neutronové hvězdy**, jejichž zdrojem energie je pouze kinetická a tepelná energie, kterou si uchovávají z předchozího stadia své existence. Normální hvězdy jsou plazmová tělesa, v jejichž střezech probíhají **termonukleární reakce** slučování lehkých jader prvků v jádra těžší. Hvězdy tvoří základní jednotky vesmírné hierarchie. Je v nich soustředěna většina pozorovatelné hmoty vesmíru. Hvězdy se sdružují do větších strukturálních celků (např. **hvězdokup** nebo **galaxií** - viz níže). Hvězdy pozorujeme i v největších dalekohledech jako svítící body. Výjimkou je samozřejmě Slunce, jakožto naše mateřská hvězda, a v poslední době (v době existence Hubbleova dalekohledu na oběžné dráze Země) ještě dvě hvězdy obrovských rozměrů a relativně malých vzdáleností od Slunce. Jedná se o Hvězdu Betelgeuze v souhvězdí Oriona a hvězdu Mira v souhvězdí Velryb. Tyto hvězdy lze pozorovat jako kotoučky.

Pro snadnější orientaci na obloze rozdělujeme nebeskou sféru plošně na 88 oblastí, tzv. **souhvězdí**. Toto rozdělení, jakož i jména souhvězdí, vznikalo historicky. Asi 800 nejjasnějších hvězd má svoje vlastní jména. Nejjasnější hvězdy daných souhvězdí obvykle označujeme písmeny řecké abecedy a latinským názvem souhvězdí. Tak např. hvězda Vega je, jakožto nejjasnější hvězda souhvězdí Lyry, označována jako α Lyrae. V naší Galaxii je celkem asi $1.5 \cdot 10^{11}$ hvězd. Katalogizováno jich je pouze cca $1.8 \cdot 10^7$.

Jednou ze základních fyzikálních veličin pro popis hvězd je jejich povrchová teplota. Většina hvězd se vejde do intervalu 3000 až 30000 Kelvinů. Nově vzniklé neutronové hvězdy však mohou mít povrchovou teplotu až milion Kelvinů. Dlouhoperiodické proměnné hvězdy zase mají povrchovou teplotu jen 1700 K. Hvězdy stejné povrchové teploty se mohou od sebe lišit svým průměrem. Interval průměrů hvězd je velice široký, od cca 20 km pro neutronové hvězdy až po 10^9 km pro největší veleobry.

Velikost hvězdy však není rozhodujícím parametrem její fyzikální struktury. Takovými parametry jsou 3 veličiny. Kromě zmíněné **povrchové teploty** T je to ještě **hmotnost** M a **zářivý výkon (zářivost)** L . Libovolné trojici kladných čísel v prostoru (T, M, L) však nemusí být přiřazena reálné hvězda. Hvězdy se sdružují svými fyzikálními podmínkami v tomto prostoru jen do určitých oblastí. Místo trojrozměrného prostoru (T, M, L) se obvykle zavádějí dva dvourozměrné prostory, a sice prostor $(x, y) = (T, L)$ a prostor $(x, y) = (M, L)$. Diagramu znázornění hvězd body v prvním prostoru říkáme **Hertzsprungův-Russelův diagram** (zkráceně H-R diagram) a druhému říkáme **závislost hmotnost-zářivost**.

Hertzsprungův-Russelův diagram je znázorněn na následujícím obrázku. Na vodorovnou osu se nanáší absolutní teplota povrchu hvězdy v sestupném smyslu (vzniklo historicky). Na svislou osu se nanáší zářivý výkon, např. v poměru k zářivému výkonu Slunce L_S . Hvězdy se v tomto grafu sdružují do určitých oblastí. Hlavní oblastí, v níž



se nachází až 90% hvězd z okolí Slunce, je šikmo šrafovaná oblast táhnoucí se z levého horního do pravého spodního rohu grafu. Říkáme jí **hlavní posloupnost** a skládá se z **pásu podobrů** v horní části množiny, **pásu trpaslíků** v její střední části a **pásu podtrpaslíků** v její spodní části. Do tohoto pásu se po svém zrodu dostanou všechny hvězdy a stráví v něm většinu svého aktivního života, kdy ve svém nitru spalují vodík na helium (viz níže). Polohu některých známých hvězd v grafu vidíte na obrázku. Nad hlavní posloupností se nachází **pás obrů** a ještě nad ním **skupina veleobrů**. Jsou to buď hvězdy velkých hmotností o různých povrchových teplotách, nebo hvězdy, které jsou u konce svého aktivního života a spalují ve svém nitru těžší prvky než vodík (viz níže). Veleobři jsou nejhmotnější hvězdy žijící nejkratší dobu (viz níže), protože jsou vzácní. Typickými představiteli jsou hvězdy Rigel nebo Betelgeuze v souhvězdí Orionu. Dolní část diagramu vyplňuje množina tzv. **bílých trpaslíků**. Jedná se o degenerované hvězdy, které už nezáří v důsledku termonukleárních reakcí, ale pouze tepelným zářením. Zásoby tepla se u nich snižují a stávají se z nich postupně **infračervení trpaslíci** a nakonec **černí trpaslíci**.

Na svislou osu H-R diagramu lze místo zářivosti nanášet absolutní bolometrickou magnitudu m . Určíme, jakým způsobem svislou osu grafu přeměřítkujeme. Umístíme postupně hvězdu o zářivosti L a Slunce o zářivosti L_S do středu koule poloměru R . Jestliže I (resp. I_S) je intenzita zářivého výkonu dopadající na jednotku plochy takto umístěné koule, pak zřejmě platí

$$L = 4\pi R^2 I; L_S = 4\pi R^2 I_S . \quad (1)$$

Jestliže $R = 10$ Pc (viz definice absolutní magnitudy), dostáváme z Pogsonovy rovnice

$$m_S - m = 2.5 \cdot \log \frac{I}{I_S}, \quad (2)$$

kde m je absolutní bolometrická magnituda hvězdy a m_S je absolutní bolometrická magnituda Slunce. Podle (1) ale

$$\frac{I}{I_S} = \frac{L}{L_S},$$

takže z (2) máme

$$10^{\frac{m_S - m}{2.5}} = \frac{L}{L_S}. \quad (3)$$

Je-li tedy v H-R diagramu $\frac{L}{L_S} = 10^j$ (j celé), pak vzhledem k tomu, že funkce 10^x je všude rostoucí, dostáváme

$$j = \frac{m_S - m}{2.5},$$

odkud

$$m = m_S - 2.5j.$$

Protože pro Slunce $m_S \approx 5$, dostáváme zobrazení měřítkování svislých os H-R diagramu patrné z následující tabulky.

j	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
m	15	12.5	10	7.5	5	2.5	0	-2.5	-5	-7.5

Na vodorovnou osu H-R diagramu se může místo povrchové teploty hvězdy nanášet převažující barva hvězdy, kterou okem vidíme. Souvislost těchto veličin vychází z **Planckova zákona**. Tento zákon říká, že absolutně černé těleso, zahřáté na teplotu T [K], vyzařuje záření různých vlnových délek λ , přičemž pro energii E tohoto záření v závislosti na jeho vlnové délce platí

$$E(T, \lambda) = \frac{K_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{K_2}{\lambda T}} - 1 \right)}, \quad (4)$$

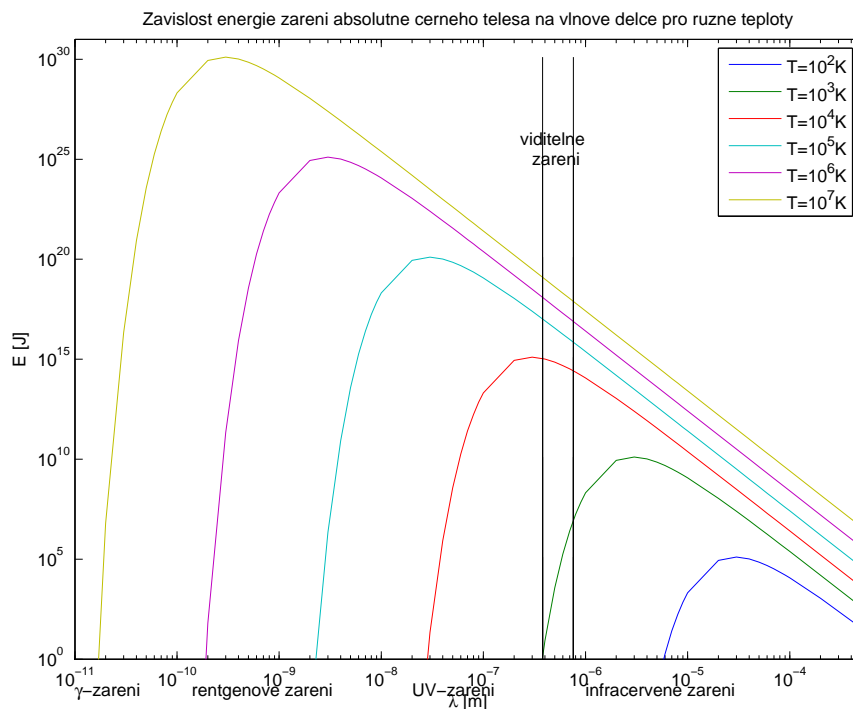
kde pro konstanty K_1 a K_2 máme

$$K_1 = 2\pi hc^2; \quad K_2 = \frac{hc}{k},$$

přičemž $c = 2.998 \cdot 10^8$ [m/s] je rychlost světla ve vakuu, $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ [Js] je Planckova konstanta (tedy konstanta úměrnosti mezi energií fotonu a jeho frekvencí) a $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ [J/K] je Boltzmannova konstanta (tedy konstanta úměrnosti mezi kinetickou energií molekuly ideálního plynu a jeho teplotou). Vykreslíme-li pro různé (konstantní) teploty T funkce (4), dostáváme křivky podle uvedeného obrázku.

Pro každou teplotu má popsaná křivka jediné maximum, jehož vlnovou délku nabytí získáme aplikací nutné podmínky extrému funkce, a to $\frac{dE}{d\lambda} = 0$. Provedením derivace získáme

$$\frac{dE}{d\lambda} = \frac{K_1}{\lambda^6 \left(e^{\frac{K_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \left[\frac{K_2}{\lambda T} \cdot \frac{e^{\frac{K_2}{\lambda T}}}{e^{\frac{K_2}{\lambda T}} - 1} - 5 \right].$$



Podmínka $\frac{dE}{d\lambda} = 0$ je potom ekvivalentní podmínce

$$\frac{ue^u}{e^u - 1} = 5 ; \quad u = \frac{K_2}{\lambda T}. \quad (5)$$

Protože funkce $\frac{ue^u}{e^u - 1}$ je na intervalu $(-\infty; \infty)$ rostoucí a zobrazuje tento interval na interval $(1; \infty)$, má rovnice (5) právě jedno řešení. Označme toto řešení u_0 . Určíme jej jako $u_0 = \lim_{k \rightarrow \infty} u_k$, přičemž jednotlivé iterace u_k určíme rekurentní formulí

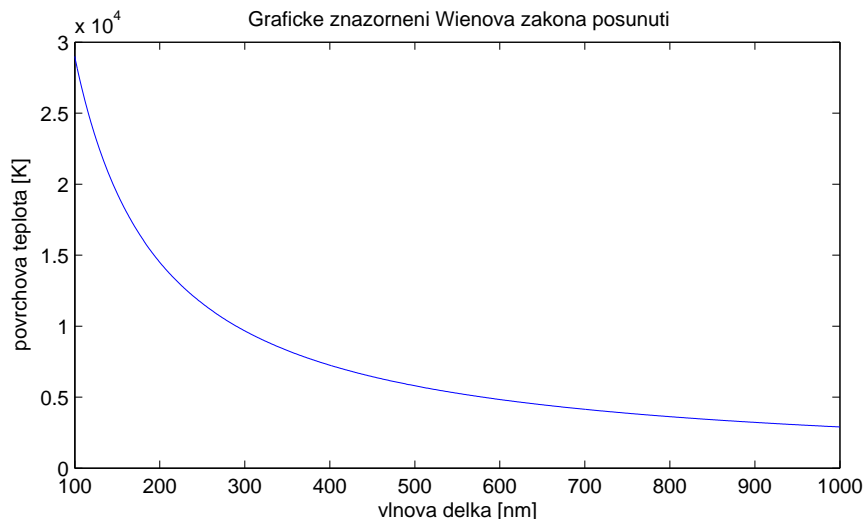
$$u_{k+1} = 5 \left(1 - e^{-u_k} \right),$$

jež vyplývá z (5). Startovací iteraci bereme $u_0 = 1$. Vychází $u_0 = 4.9651$. Podle (5) pak

$$u_0 = \frac{K_2}{\lambda T} \Leftrightarrow \lambda = \frac{K_2}{u_0} \cdot \frac{1}{T}.$$

Označme $b = \frac{K_2}{u_0}$ (tzv. **Wienova konstanta**). Získali jsme poznatek, že absolutně černé těleso vyzařuje maximum energie prostřednictvím záření, jehož vlnová délka je nepřímo úměrná teplotě zahřátí tohoto tělesa. Konstanta úměrnosti má hodnotu $b = 2.9 \cdot 10^{-3}$ [Km]. Ve fyzice se tomuto výsledku říká **Wienův posunovací zákon**. Grafické znázornění Wienova posunovacího zákona ukazuje následující obrázek. Převažující vlnová délka ve spektru energie (pokud spadá do rozsahu viditelného záření) určuje barevnost absolutně černého tělesa.

Hvězdy ovšem nejsou absolutně černá tělesa a navíc záření nevzniká u nich pouze v povrchové vrstvě, ale i ve vrstvách vnitřních, jež mají (mnohdy výrazně) jinou teplotu. Barevnost světla hvězd je z těchto důvodů oproti Wienovu zákonu poněkud posunuta směrem k vyšším vlnovým délkám. Zároveň bylo světlo hvězd rozděleno (podle energie fotosférou vyzařovaného záření) do sedmi tzv. **spektrálních tříd**. Tyto třídy jsou označovány písmeny velké abecedy v pořadí (od nejenergetičtějšího záření povrchu k nejméně energetickému) O, B, A, F, G, K, M. Dobrá mnemotechnická pomůcka pro zapamatování



tohoto pořadí zní: Oskar bude asi fírat, Gustav krájí mrkev. Pro podrobnější dělení se písmeno doplňuje ještě číslicí od nuly do devítky. Tedy po A0, směrem k méně energetickému záření, následuje A1 a A5 je uprostřed mezi A0 a F0. Např. Slunce je hvězda spektrální třídy G2. Tato situace byla precizována prostřednictvím tzv. **Harwardské klasifikace spekter**, upřesněné počátkem 20. století E. C. Pickeringem. Klasifikace přiřazuje jednotlivým spektrálním třídám hvězd barvu záření a povrchovou teplotu podle následující tabulky:

třída spektra	barva záření	povrchová teplota [K]
O	nejteplejší modrá	35000
B	horká modrá	20000
A	modrobílá	10000
F	bílá	7500
G	žlutá	6000
K	oranžová	4500
M	chladná červená	3000

Podle této tabulky lze místo absolutní povrchové teploty hvězdy upravovat vodorovnou osu H-R diagramu tak, že na ni nanášíme odpovídající barvu záření nebo spektrální třídu hvězdy.

Celkový výkon P vyzářený jednotkou plochy absolutně černého tělesa prostřednictvím záření všech vlnových délek je dán integrací Planckova vztahu (4) přes vlnové délky. Je tedy

$$P(T) = \int_0^{\infty} E(\lambda, T) d\lambda.$$

Naznačenou integrací lze dokázat, že platí

$$P(T) = \sigma T^4, \tag{6}$$

kde $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}]$ je tzv. **Stefanova konstanta**. Odvozenému výrazu (6) říkáme **Stefanův-Boltzmannův zákon**. Pro celkový výkon hvězdy (tedy pro zářivost L) potom máme

$$L = 4\pi R^2 P = 4\pi\sigma R^2 T^4, \quad (7)$$

kde R je poloměr hvězdy.

Máme-li nyní dvě hvězdy o poloměrech R_1 a R_2 , povrchových teplotách T_1 a T_2 a zářivostech L_1 a L_2 , pak podle (7) platí

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^4. \quad (8)$$

Umístíme-li tyto hvězdy do vzdálenosti $r = 10$ Pc od pozorovatele, platí pro intenzitu výkonu záření I dopadnuvší na jednotku plochy v místě pozorovatele (při kolmém dopadu) vztah $I_i = \frac{L_i}{4\pi r^2}$, ($i = 1, 2$), takže vzhledem k (8) pak máme

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^4. \quad (9)$$

Jestliže m_i jsou absolutní (bolometrická) magnituda obou hvězd, pak Pogsonova rovnice dává

$$m_2 - m_1 = 2.5 \cdot \log \frac{I_1}{I_2}.$$

Dosažením z (9) dostaneme

$$m_2 - m_1 = 5 \cdot \log \frac{R_1}{R_2} + 10 \cdot \log \frac{T_1}{T_2}.$$

Je-li hvězda s indexem dvě Slunce, kdy

$$m_2 = m_S = 4.71; \quad T_2 = T_S = 5800\text{K}; \quad R_2 = R_S = 6.96 \cdot 10^5 \text{km},$$

dostáváme odtud, že (srovnávaný objekt, jenž měl původně index jedna, už je bez indexu)

$$m = m_S - 5 \cdot \log R' - 10 \cdot \log T',$$

kde R' je poloměr srovnávané hvězdy v jednotkách slunečních poloměrů a T' je povrchová teplota této hvězdy v jednotkách slunečních povrchových teplot. Z této rovnice lze určit relativní poloměr hvězdy jako

$$\log R' = \frac{4.71 - m}{5} - 2 \log T',$$

odkud

$$R' = \frac{10^{\frac{4.71}{5}}}{10^{\frac{m}{5}} \cdot 10^{2 \log T'}} = \frac{5 \sqrt[5]{10^{4.71-m}}}{T'^2}. \quad (10)$$

Poznámka: U většiny hvězd je celková zářivost úměrná zářivosti ve viditelném spektru, takže v (10) lze za m dosazovat i vizuální magnitudu.

Při znalosti magnitudy hvězdy a povrchové teploty (barevnosti, spektrální třídy) lze tedy určit její poloměr. Většina normálních hvězd má poloměry v rozmezí 0.1 až 100 násobek poloměru Slunce. Existují však hvězdy (veleobři) o poloměru větším než 1000 násobek poloměru Slunce. Například Betelgeuze (α Orionis) má $R' = 2200$. Tato hvězda je tak velká, že roku 1995 byla v Hubbleově teleskopu z oběžné dráhy Země poprvé pozorována jako kotouček a nikoliv jako svítící bod.

Diagram hmotnost - zářivost lze, pro hvězdy, u nichž probíhá pouze přeměna vodíku na helium (t.j. převážně pro hvězdy hlavní posloupnosti H-R diagramu), popsat výrazem

$$\frac{L}{L_S} = \left(\frac{M}{M_S} \right)^n \quad (11)$$

Exponent n má pro lehké hvězdy hodnotu 2.5, pro hmotné hvězdy hodnotu 3 a pro hvězdy podobné Slunci hodnotu 4. Vztah (11) neplatí ani pro degenerované hvězdy, ani pro stárnoucí červené obry se složitou vnitřní stavbou, kde probíhá najednou několik typů různých termonukleárních reakcí. Čím je tedy hvězda hmotnější, tím více se mění její zářivost a tím kratší dobu života pobyde na hlavní posloupnosti H-R diagramu. Zatímco Slunce tam zůstane cca $1.2 \cdot 10^{10}$ let, hmotné hvězdy tam pobydou pouze řádově 10^6 let.

Proměnné hvězdy

Některé hvězdy mění s časem svoji jasnost (magnitudu). Říká se jim proto **proměnné hvězdy**. Podle příčiny proměnnosti je dělíme na **geometrické** a **fyzikální proměnné**. U geometrických proměnných je změna jasnosti způsobena hlavně průchodem jiné hmoty spojnicí mezi hvězdou a pozorovatelem. Toto může být způsobeno buď nezářivou hmotou (temná mlhovina) nebo vlivem rotace dvou složek dvojhvězdy v rovině, v níž leží i oko pozorovatele (tzv. **zákrytové proměnné**). Vzácně může jít i o hvězdu, která má na rozsáhlých částech svého povrchu jinou teplotu, než na jiných částech (má tedy obří skvrny). Vlivem její rotace je pak oku pozorovatele přivrácena různě jasná část jejího povrchu (tzv. **rotační proměnné**).

U fyzikálních proměnných je proměnnost jasnosti způsobena změnou fyzikálních podmínek vyzařování energie hvězdy. Dělíme je na **pulzující** a **expandující (eruptivní, kataklysmické) proměnné**. Pulzující proměnné mohou v čase měnit svůj průměr (říkáme, že "dýchají"). Tyto hvězdy mají spíše kratší dobu periody změny jasnosti (hodiny až jednotky dní). Nejvýznamnějšími představiteli této skupiny jsou tzv. **cepheidy**. Jejich název byl inspirován dávno známou proměnnou hvězdou tohoto typu δ Cephei. Perioda změny jasnosti těchto hvězd se může i v určitých mezích měnit. Amplituda změn jasnosti je malá, cca do 2 magnitud. Jinými představiteli proměnných hvězd tohoto typu jsou **hvězdy typu Mira**, nazvané podle nejdéle známého jejich představitele ze souhvězdí Velryby. Tyto hvězdy mají pravidelnou periodu změny jasnosti, která je delší než 100 dní a amplitudu těchto změn kolem 5 magnitud. Některé fyzikální proměnné hvězdy mění přímo povrchovou teplotu. Většinou se jedná o změny na rozhraní viditelné a infračervené barvy (odpovídající povrchové teplotě 2000 až 3000 Kelvinů). Perioda změn jasnosti takových hvězd pak může být až jednotky let.

Eruptivní proměnné hvězdy dělíme na **novy** a **supernovy**. Nova je složka dvojhvězdy, která náhle zvýší svoji jasnost až o 13 magnitud, aniž by přitom výrazněji změnila svoji fyzikální strukturu. Jedná se vždy o těsnou dvojhvězdu, z níž jedna složka je bílý trpaslík (viz níže) a druhá je normální hvězda hlavní posloupnosti H-R diagramu. Vlivem gravitace dochází k přelévání hmoty z normální hvězdy na bílého trpaslíka až do okamžiku zapálení termonukleární reakce. Tento jev se zevně projeví jako výrazné zvýšení jasnosti systému. V následujícím čase jasnosti zvolna ubývá. U stejné hvězdy může k tomuto jevu dojít i několikrát za sebou. V Galaxii pozorujeme ročně cca 25 nov.

Výbuch supernovy je jev, kdy hvězda zvýší svoji jasnost až o 20 magnitud a přitom totálně změní svoji fyzikální strukturu. Jedná se vlastně o závěrečné stadium (umírání) hvězd obrovské hmotnosti. Taková hvězda vlivem tlaku záření odvrhne prudce svoje

vrchní vrstvy, což se zevně projeví jako gigantický výbuch. V obnaženém jádře převládá gravitační síla a to se smrští do podoby neutronové hvězdy nebo černé díry (viz níže). Nastává tzv. **gravitační kolaps**. Výbuchy supernov jsou velmi vzácné, neboť v Galaxii se vyskytuje jen velmi málo superhmotných hvězd. V průměru v Galaxii vybuchnou 3 supernovy za století. Většinou se tak děje v jádru Galaxie, jež je skryto temnými mlhovinami. Pozorovaných výbuchů supernov je proto ještě daleko méně. V období nového letopočtu bylo lidmi pozorováno v Galaxii 10 výbuchů supernov. Od roku 1000 pak pouze čtyři, a to v letech 1006, 1054, 1572 a 1604. Poslední výbuch pozoroval sám Kepler. V poslední době pozorujeme výbuchy supernov v jiných galaxiích a pomocí nich určíme vzdálenosti těchto galaxií.

Dvojhvězdy

Většina hvězd v Galaxii nemá ve svém okolí žádného průvodce, svítí tedy osamocně, podobně jako Slunce. Existují ovšem hvězdy, mající v blízkém okolí (ve vzdálenosti řádu světelných hodin až dní) průvodce. Říkáme jim **dvojhvězdy**. Obíhají pak kolem společného těžiště podle Keplerových zákonů. V Galaxii je jich katalogizováno kolem 80000. Podle úhlové vzdálenosti jednotlivých složek dvojhvězdy je dělíme na **vizuální** a **spektrografické**. U vizuálních dvojhvězd obě složky v dalekohledu odlišíme, zatímco u spektrografických nikoliv. Ty se projevují jen ve formě změny jasnosti jako zákrytové proměnné nebo ve formě periodické změny spektra. Z hlediska skutečné vzdálenosti složek dvojhvězdy hovoříme o dvojhvězdách normálních, které se navzájem neovlivňují. **Dvojhvězdy těsné** se už navzájem ovlivňují transferem hmoty. Tento jev je ve zvýšené míře patrný u **dvojhvězd dotykových**. Někdy se hovoří ještě o **dvojhvězdách optických**. Pod tímto pojmem rozumíme dvě hvězdy, které jsou od sebe značně daleko, leč pro pozorovatele na Zemi se promítají (přibližně) na stejné místo nebeské sféry. Tento druh dvojhvězd není z astronomického hlediska zajímavý. Existují i vícenásobné soustavy hvězd (trojhvězdy i čtyřhvězdy). Tyto systémy jsou však podstatně méně početné.

Mlhoviny

Pod pojmem **mlhovina** se v současné astronomii rozumí shluk mezihvězdné hmoty. Dříve tento pojem znamenal jakýkoliv objekt, který se v dalekohledu jevil jako neurčitě ohraničený obláček. Mohly to být tedy i hvězdokupy nebo galaxie (viz níže). Dodnes se v populární literatuře například používá označení "mlhovina v Andromedě" pro jednu z našich Galaxií nejbližších galaxií. V současné astronomii dělíme mlhoviny na **temné** a **svítící**. Temné mlhoviny nezáří žádným zářením, pouze zakrývají hvězdné pozadí. Nejznámější jsou temné mlhoviny v souhvězdí Střelce, které zakrývají jádro Galaxie. Svítící mlhoviny září mimo jiné i ve viditelné části elektromagnetického záření. Původ tohoto záření může být buď v odraženém záření blízké hvězdy (pak se jedná o tzv. **reflexní mlhovinu**), nebo se jedná o vlastní záření mezihvězdné hmoty (pak se jedná o tzv. **emisní mlhovinu**). Vlastní záření může být vybuzeno blízkostí horké hvězdy nebo rázovou vlnou při výbuchu supernovy.

Zvláštním případem mlhovin jsou tzv. **planetární mlhoviny**. Jedná se o konečná stadia vývoje hvězd, kdy jsou jejich vrchní vrstvy odvrženy od jádra a jím následně prozařovány. Vizually se tento stav jeví jako planetární kotouček. Jinak ale s planetami nemá tento jev vůbec nic společného, takže název je zavádějící. Trefně astronomové říkají, že planetární mlhovina je "pohřební věnec položený přírodou kolem umírající hvězdy".

Pokud mezihvězdná hmota tvoří globule (viz níže), stává se zárodkem pro vznik nových hvězd. Mimo mlhoviny existuje v galaktickém mezihvězdném prostoru plyn (hlavně atomy vodíku a helia) a prach (pevné částičky uhlíku, ledu či kovů o rozměrech řádu desítek nanometrů).

Hvězdokupy

V Galaxii existují soustavy hvězd o společném původu, kterým říkáme **hvězdokupy**. Dělíme je na dvě hlavní skupiny, a sice **hvězdokupy otevřené** a **hvězdokupy kulové**. Otevřené hvězdokupy obsahují malé množství hvězd (řádu stovek), takže u nich převažuje pohybová energie nad energií gravitační. Hvězdy v nich se vyznačují stejnými pohyby, i když mohou místně zaujímat větší prostor na nebeské sféře (tzv. **pohybové hvězdokupy**). V Galaxii jich je známo cca 1200. Je předpoklad, že jich ve skutečnosti existuje až o řád více. Pouhým okem můžeme pozorovat pět hvězdokup tohoto typu. Jsou to Plejády (Kuřátka) v souhvězdí Býka, Hyády rovněž v souhvězdí Býka, Praesepe (Jesličky) v souhvězdí Raka a hvězdokupy χ a h v souhvězdí Persea. Nejstarší z těchto hvězdokup jsou Hyády, které se místně jako hvězdokupa vůbec nejeví, hvězdy v ní však mají stejnou rychlost.

Kulové hvězdokupy jsou velké soustavy řádu statisíců hvězd. Zaujímají kulový tvar o průměru 50 až 400 světelných let. U nich gravitační energie převládá nad energií pohybovou, takže hvězdy těchto hvězdokup se od sebe nikdy nedostanou. Ve středech těchto hvězdokup jsou hvězdy vzdáleny od sebe jen několik světelných týdnů. V Galaxii je jich známo 135. Nejznámější (pouhým okem viditelná) je hvězdokupa M13 v souhvězdí Herkula.

Galaxie

Základními stavebními kameny střední velikosti ve vesmíru jsou tzv. **galaxie**. Jsou to obrovské gravitačně svázané soustavy hvězd a mezihvězdné hmoty. Naše Slunce, spolu se sluneční soustavou, leží v galaxii, kterou nazýváme **Galaxie** a obsahuje $1.5 \cdot 10^{11}$ hvězd. I některé další blízké nebo něčím významné galaxie mají svá jména (např. Velké a Malé Magellanovo mračno, Spící kráska, Tykadla či Kolo od vozu). Většina dalších je označována pouze čísly v různých astronomických katalozích. Galaxie mohou obsahovat od 10^6 hvězd (tzv. **trpasličí galaxie**) do 10^{12} hvězd. Podle **Hubbleovy klasifikace** dělíme galaxie na

- **eliptické** mající tvar koule (označení E0) nebo postupně se protahujícího elipsoidu (označení E1 až E7),
- **spirální** mající kulové jádro (tzv. **galaktickou výduť**) a dvě (i více) od něho se odvíjející spirální ramena (označení od Sa pro ramena nejvíce se přimykající k jádru, až po Sc pro nejvolnější ramena),
- **spirální s příčkou**, kdy ramena vycházejí až z příčky, jež sama vychází z jádra (označení od SBa pro ramena nejvíce se přimykající k příčce, až po SBc pro nejvolnější ramena),
- **nepřavidelné**.

Existuje i přechodový typ mezi galaxiemi eliptickými a spirálními, kdy z jádra se vine jakási příčka, ovšem bez ramen. Těmto galaxiím říkáme **čočkové**. Nejmenší (tzv.

trpasličí) galaxie jsou téměř výhradně eliptické. U velkých převažují spirální. Je jich kolem 75%.

Galaxie se ve vesmíru vyskytují zřídka osamoceně. Seskupují se většinou do tzv. **galaktických kup**. Naše Galaxie patří do tzv. **místní skupiny galaxií**. Tato skupina obsahuje 35 galaxií asi do vzdálenosti $3 \cdot 10^6$ světelných let. Dominantní mezi nimi je naše Galaxie a Velká galaxie v Andromedě. Obě tyto galaxie jsou spirální. Velkou galaxii v Andromedě můžeme vidět v souhvězdí Andromedy i pouhým okem jako podlouhlý obláček o největším úhlovém rozměru 2 stupně. Je od nás vzdálena cca $2.2 \cdot 10^6$ světelných let. Ostatní galaxie této skupiny jsou menší. Nejbližšími galaktickými souputníky naší Galaxie je Velká a Malé Magellanovo mračno. Deklinace těchto galaxií je menší než minus 40 stupňů, takže v České republice nejsou nikdy viditelné. Jsou od nás vzdáleny cca půl milionu světelných let. V rozmezí vzdáleností $3 \cdot 10^6$ až $7 \cdot 10^6$ světelných let se nenachází žádná galaxie. Kupy galaxií se sdružují v **galaktické nadkupy** (někdy též **supergalaxie** nebo **metagalaxie**). Nadkupa, v níž leží místní skupina galaxií, má střed v blízkosti **Velké kupy galaxií v Panně**. Odhaduje se, že v poznaném vesmíru se nachází řádově stovky miliard galaxií.

Naše Galaxie je spirální se dvěma rameny. Obsahuje galaktické jádro (výduť) tvaru rotačního elipsoidu o velké poloose délky cca 10^4 světelných let. K tomuto jádru se přimykají dvě ramena tvaru spirály. Vnitřnímu rameni říkáme **rameno Štřelce** a vnějšímu pak **rameno Orionu**. V rameni Orionu, ve vzdálenosti cca $3.3 \cdot 10^4$ světelných let od středu, se nachází Slunce. Největší rozměr Galaxie od periferie k opačné periferii je 10^5 světelných let. Ve středu Galaxie se nachází obří černá díra. V jádru je celkem $3 \cdot 10^7$ hvězd, což při jeho rozměrech dává hustotu jedné hvězdy v krychli o hraně 1.5 světelného týdne. Vzdálenosti mezi hvězdami v nejhustější "osídlených" částech Galaxie se rovnají cca 25 průměrům Neptunovy dráhy. Jádro Galaxie nemůžeme pozorovat, neboť je skryto temnými mlhovinami v souhvězdí Štřelce. Pozorujeme pouze ramena, nejčastěji v letním období, jako tzv. **mléčnou dráhu**. Slunce s celou sluneční soustavou vykonává periodický pohyb kolem středu Galaxie rychlostí 250 km/s. Doba periody tohoto pohybu je cca $2 \cdot 10^8$ let.

Vzdálenosti galaxií se měří různými metodami. Nejčastější jsou následující dvě metody. Pro bližší galaxie se využívá maximální jasnosti tam vybuchnuvších supernov. Ukazuje se totiž, že absolutní magnituda všech supernov je přibližně stejná. Ze změřené relativní magnitudy a z Pogsonovy rovnice lze potom určit vzdálenost supernovy a tím i galaxie. Pro vzdálenější galaxie (zhruba od vzdálenosti třicet milionů světelných let) se využívá tzv. **rudého posuvu**. Vesmír se totiž v čase rozpíná, takže vzdálené objekty se od nás vzdalují rychlostí v , která je přímo úměrná jejich vzdálenosti r . Konstantou úměrnosti je tzv. **Hubbleova konstanta H** . Americký astronom Edwin Hubble popsal roku 1929 tento jev, který od té doby nazýváme **Hubbleův zákon**. Konstanta H se vlivem přitažlivých sil mezi galaxiemi s časem mírně zvětšuje. Většina autorů uvádí její současnou hodnotu jako $H = 2 \cdot 10^5 \text{ km s}^{-1} \text{ ly}^{-1}$. Platí tedy $v = Hr$. Kvantifikací Dopplerova jevu dostáváme

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c},$$

kde $\Delta\lambda$ je zjištěný rudý posuv, λ je statická vlnová délka záření a c je rychlost světla. Po dosazení z Hubbleova zákona máme

$$r = \frac{v}{H} = \frac{c}{H} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda}. \quad (12)$$

Poznámky:

1. Maximální pozorováním dostupná vzdálenost je vzdálenost r_{\max} , pro kterou rychlost rozpínání v je rovna rychlosti světla c . Jinak řečeno, kdy pohybová vlnová délka libovolného záření je rovna nule. Této vzdálenosti říkáme **Hubbleův polo-měr** a podle (12) je $r_{\max} = \frac{c}{H} = 1.5 \cdot 10^{10}$ světelných let.
2. Touto metodikou lze určovat vzdálenosti pouze natolik vzdálených objektů, že vzdalování vlivem rozpínání vesmíru řádově převáží změny polohy vlivem vlastních pohybů objektů.

Vznik a vývoj hvězd

Na celém vývoji hvězd se podílí antagonistické působení gravitačních sil a sil odpovídajících tlaku plazmatu, tlaku záření popřípadě odstředivým silám v případě rotace. Jedinou veličinou, rozhodující kterým směrem se bude vývoj hvězdy ubírat, je její hmotnost. Reálně mohou existovat pouze hvězdy o hmotnostech mezi 0.08 a 120-ti násobku hmotnosti Slunce. Hvězdy méně hmotné nemohou existovat, protože teplota v jádru nestačí na zapálení základní termonukleární reakce. Hmotnější hvězdy také nemohou existovat, protože síly tlaku záření by způsobily jejich rozpad.

Hvězdy vznikají ze shluků mezihvězdné hmoty, ve kterých je přítomen hlavně vodík. Tyto shluky mohou být buď přibližně kulového tvaru menších rozměrů (tzv. **globule**), ze kterých vznikají samostatné hvězdy, nebo to mohou být mračna obrovských rozměrů, ze kterých vznikají vícenásobné soustavy hvězd, popřípadě hvězdokupy. Vlivem gravitačních sil dochází k pohybu částic k těžišti systému, čímž stoupá v těchto oblastech teplota i hustota. Další částice už se mohou k vznikajícímu jádru dostat volným pádem. Je dokázáno, že polovina gravitační energie se mění v teplo a polovina v energii záření. Takové útvary (tzv. **protohvězdy**) září převážně dlouhovlnným zářením (radiovým, popřípadě submilimetrovým). V H-R diagramu by se takový útvar nacházel úplně vpravo dole. Jestliže se taková protohvězda rychle otáčí, může u ní vzniknout protoplanetární disk, ze kterého později vzniknou planety. Dalším přijímáním hmoty protohvězda sleduje v H-R diagramu tzv. **Hayashiovu stopu**, která je téměř rovnoběžná s osou zářivosti. Zvyšuje se totiž hmotnost, tím i zářivost, ovšem při malém růstu teploty povrchu.

Jakmile teplota jádra dosáhne $7 \cdot 10^6$ Kelvinů, zažehne se **základní termonukleární reakce** (tzv. **proton-protonový cyklus**), kdy vodíková jádra se slučují v jádra helia za uvolnění zářivé energie. Záření má i viditelné vlnové délky a protohvězda se stává hvězdou. V tomto stadiu na H-R diagramu opouští Hayashiovu stopu a stáčí se vlevo na hlavní posloupnost, kde podle hmotnosti zaujímá svoje stabilní místo. Antagonistické síly v jádru se vyrovnávají a hvězda v této stabilní poloze zůstává většinu svého aktivního života. Zářivý výkon v té době, podle zákona hmotnost-zářivost, závisí na 2.5-té až 4-té mocnině hmotnosti. Málo hmotné hvězdy proto mají život na hlavní posloupnosti H-R diagramu dlouhý (až 100 miliard let), zatímco velmi hmotné hvězdy krátký (třeba jen 100 milionů let). Při zmíněné základní termonukleární reakci vzniká helium (tzv. **termonukleární popel**). Heliové jádro hvězdy se dále smršťuje, čímž dále roste teplota. Při teplotě cca 10^8 Kelvinů se zažehne nový typ termonukleární reakce, tzv. **uhlíkový cyklus**. Tehdy se slučují tři jádra helia na jádro uhlíku. Tímto procesem vznikl ve vesmíru veškerý uhlík, z něhož jsou složeny živé organismy.

V tuto chvíli je porušena rovnováha sil a začíná probíhat celková chemická přestavba hvězdy. Vnější vrstvy se rozpínají a chladnou. Z hvězdy se stává buď obr nebo veleobr, podle hmotnosti. V H-R diagramu se hvězda posouvá vpravo nahoru. V jejím jádru se

postupně zařihají další termonukleární reakce, při kterých vznikají jádra těžších prvků. Podle hmotnosti hvězdy může vzniknout jádro kyslíku, neonu, sodíku a hořčíku. Pro hvězdy o hmotnosti přibližně rovné hmotnosti Slunce už těžší jádra nevznikají. V jádru hvězdy je v té době teplota cca $8 \cdot 10^8$ Kelvinů a zářivý výkon je úměrný čtvrté mocnině hmotnosti. V tu dobu gravitační síly převáží nad silami tlaku záření a hvězda se začne nezadržitelně smršťovat. Při tom dojde k výbuchu, při kterém je odmrštěna atmosféra hvězdy a zůstává pouze jádro, které má v té době průměr jen řádu tisíců kilometrů.

Hvězda se dostává do posledního stadia svého života, do stadia tzv. **bílého trpaslíka** obklopeného odraženou atmosférou. Pozorovateli se tento stav jeví jako planetární mlhovina. V H-R diagramu dojde k prudkému posuvu vlevo dolů. Gravitačními silami smrštěné jádro hvězdy je z degenerované hmoty o hustotě o mnoho řádů vyšší, než je běžné např. na Zemi. Termonukleární reakce už zhasly a bílý trpaslík září už pouze vlivem vysoké teploty svého povrchu. Teplota se pozvolna snižuje a bílý trpaslík postupně vyhasíná. Stává se z něho **infračervený trpaslík**. Posléze zhasne úplně a má pak statut tzv. **černého trpaslíka** bez zářivé energie, leč s obrovskou hustotou. Stadium vyhasínání může trvat velmi dlouhou dobu. Doba existence černých trpaslíků může mnohonásobně převýšit dobu existence současného vesmíru. Tímto způsobem skončí svůj život 95% všech hvězd.

Pouze malé procento velmi hmotných hvězd může ve svých jádrech provozovat další termonukleární reakce, při kterých vznikají další, těžší prvky. Vzniká tak síra, fosfor, křemík, nikl, kobalt a další kovová jádra. Při teplotě cca 10^9 Kelvinů slučování jader končí vznikem jádra železa. Jádro železa je stavěno ze všech prvků nejúspěšněji, takže jej už nelze zapojit do žádné termonukleární reakce. Po vyčerpání "paliva" převládnu opět gravitační síly a pokračuje smršťování jádra hvězdy. V té době dochází v atmosféře hvězdy k výbuchu na termonukleární bázi, při kterém vznikají jádra těžkých a radioaktivních prvků. Tímto výbuchem je obal hvězdy odmrštěn do vesmíru. Tento jev se pozoruje jako **výbuch supernovy**.

V jádru hvězdy pokračuje smršťování do takového stadia, že elektrony atomových obalů jsou vtlačovány do protonů v atomových jádrech za vzniku neutronů (a neutrin). Vzniká tzv. **neutronová hvězda**. Zářivý výkon takové hvězdy je velmi nízký. Hvězda se v H-R diagramu stěhuje až na samý spodní okraj. Má v tu dobu průměr pouze řádu desítek kilometrů při hmotnosti několika slunečních hmotností. Hustota degenerované hmoty neutronové hvězdy je proto řádu 10^{17} kg/m³. Některé neutronové hvězdy s rychlou rotací jsou pozorovatelné jako tzv. **pulsary**. Jako neutronové hvězdy končí svůj život hvězdy o hmotnostech svých jader mezi 1.4 až 4-násobku hmotnosti Slunce (tzv. **Chandrasekharova mez**). Doba existence neutronové hvězdy opět mnohonásobně převyší dobu existence současného vesmíru.

U nejhmotnějších hvězd, kdy hmotnost jader převyší 4-násobek hmotnosti Slunce, dochází k dalšímu smršťování jádra až za hranici tzv. **gravitačního kolapsu**. Tímto vývojem vzniká tzv. **černá díra**. Jedná se o těleso, ze kterého nemůže uniknout záření. Hvězda proto totálně opouští H-R diagram. Kromě výše popsaných **černých děr hvězdných** existují ještě **černé díry obří**, jež se pravděpodobně nacházejí ve středech všech galaxií.

Z hlediska Newtonovy klasické mechaniky, lze černou díru popsat jako těleso, u kterého úniková (tedy druhá kosmická) rychlost je rovna rychlosti světla. Určíme proto, jakého poloměru r_S musí být kulové těleso hmotnosti M , aby bylo černou dírou, tedy aby úniková rychlost v_{II} z jeho povrchu (tedy ze vzdálenosti r_S od středu) byla rovna rychlosti světla c . Protože pro únikovou rychlost z gravitačního pole tělesa o hmotnosti M ze vzdálenosti r platí

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2\kappa M}{r}},$$

dostáváme s ohledem na popsané podmínky

$$c = \sqrt{\frac{2\kappa M}{r_S}} \Leftrightarrow r_S = \frac{2\kappa M}{c^2}.$$

Jedná se o tzv. **Schwarzschildův poloměr** a platí pro něj ($\kappa = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$, $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$)

$$r_S = 1.48 \cdot 10^{-27} \cdot M [\text{m}].$$

Pro Slunce je $M_S = 1.987 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, takže vychází $r_{S_S} = 2945 \text{ m}$. Odtud vyplývá dolní mez pro poloměr neutronové hvězdy o dané hmotnosti. Tato mez pro poloměr statického tělesa vyplývá zároveň i z řešení Einsteinových rovnic obecné relativity.

Možnosti existence mimozemských civilizací

Aby vznikla civilizace schopná komunikace s jinou civilizací, je potřeba splnit mnoho podmínek. Kvantifikovat se to snaží tzv. **Drakeova rovnice** tvaru

$$N = 1.5 \cdot 10^{11} \cdot \prod_{i=1}^7 f_i.$$

Zde N je počet technicky vyspělých civilizací, schopných komunikace s jinou civilizací v Galaxii, v níž se nachází $1.5 \cdot 10^{11}$ hvězd. Jednotlivé činitele f_1, \dots, f_7 jsou čísla z intervalu $(0;1)$ označující část, splňující určité specifické podmínky, a to

- f_1 je část hvězd mající zdroj energie vhodný pro život,
- f_2 je část z předchozích, u nichž se vyvinula planetární soustava,
- f_3 je část z předchozích, jež mají planety vhodné pro život,
- f_4 je část z předchozích, kde se život skutečně vyvinul,
- f_5 je část z předchozích, kde život dospěl do inteligentního stadia,
- f_6 je část z předchozích, kde život dospěl do vývoje komunikativní vyspělé civilizace,
- f_7 je zlomek, vyjadřující jakou část doby existence planety na ní trvá existence technicky vyspělé, komunikace schopné civilizace.

Z astronomického hlediska se můžeme vyjádřit pouze k prvním třem činitelům. Aby mohl vzniknout život, musí mateřská hvězda splňovat tyto podmínky:

- Nesmí být příliš mladá, aby se v jejím okolí stačil život vyvinout.
- Nesmí mít příliš velkou hmotnost. Jinak by pravděpodobně zanikla dříve, než by se v jejím okolí stačil život vyvinout.
- Nesmí to být proměnná hvězda ani vícenásobný systém. Jinak by případné planety byly vystaveny příliš kolísavému toku záření.

U Slunci podobných hvězd je planetární soustava pravděpodobně všední záležitostí. Mnohé mimosluneční planety už byly objeveny. Většinou to ale byly velmi hmotné planety typu Jupitera. Planety vhodné pro život musí splňovat tyto podmínky:

- Nesmí být příliš hmotné. Hmotné planety si totiž udržují původní vodíkovo-heliovou atmosféru, jež je pro vznik života naprosto nevhodná.
- Nesmí být příliš málo hmotné. Málo hmotné planety si totiž neudrží vůbec žádnou atmosféru (např. Merkur), což je opět stav nevhodný pro vznik života.
- Jejich oběžné dráhy musí ležet v obyvatelné části planetární soustavy. Tato oblast leží cca mezi teplotními hranicemi tuhnutí a varu vody. U Slunce je to přibližně v hranicích mezi Venuší a Marsem.

Vznik a vývoj života vyžaduje další množství fyzikálních a chemických (a později i biologických) podmínek, které přesahují rámec astronomie. Zlomky f_4 , f_5 a f_6 , které tyto podmínky zohledňují, se podle různých autorů liší. I podle nejpesimističtějších údajů ale Drakeova rovnice rezultuje minimálně řád statisíců planet v Galaxii, na nichž by měl naději vzniknout život a vyvinout se do inteligentní formy na "komunikativní úrovni". Obloha se kvůli možnostem zachycení signálů inteligentní civilizace sleduje na mnoha frekvencích elektromagnetického záření. Zejména v oblasti centimetrových mikrovln. Nejznámější projekt, do kterého je zapojeno mnoho států, je projekt SETI (Search for Extra Terrestrial Intelligence).