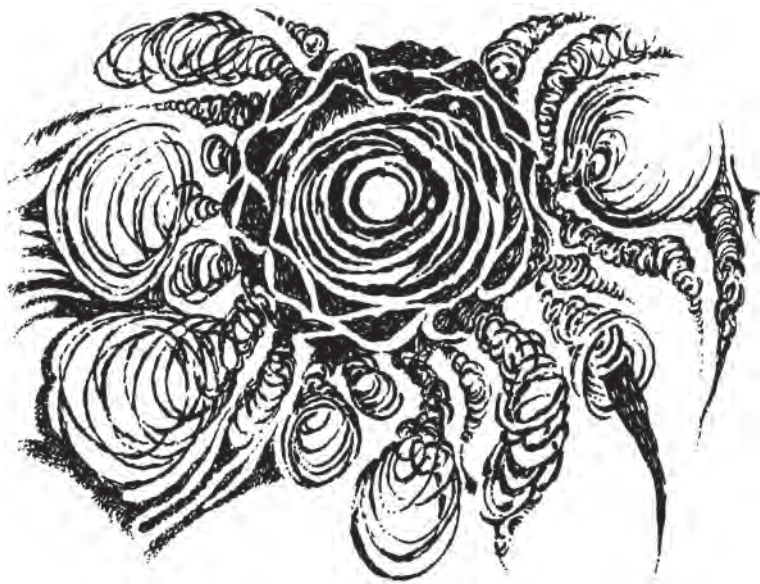


4. Příběh umírající hvězdy Betelgeuse



Hvězdy netuší, že tvoří souhvězdí.

Jean Cocteau

Ty tam jsou doby, kdy si lidé mysleli, že vesmír je neměnný a hvězdy jsou stálice připevněné navěky na křišťálových sférách. Hvězdy mají své osudy jako lidé. Rodí se, žijí a umírají. Z jejich popela vznikají další generace hvězd obohacené o prvky generací předcházejících. Koloběh života a smrti ne nepodobný tomu lidskému. Pohled člověka na hvězdnou oblohu v současnosti se liší od pohledu našich předků i našich potomků. To je jen jeden lidský život příliš krátký na to, abychom postřehli změny v uskupení hvězd na obloze. Za tisíce roků budou naše souhvězdí vypadat jinak. Některé hvězdy se posunou na nová místa, některé se narodí a jiné zemřou. Smrt těch nejhmotnějších končí grandiózní explozí, posledním zábleskem krásy bývalé hvězdy, poslední zprávou o vyhasínajícím životě, tajuplnou explozí supernovy. Na místě zůstane náhrobek v podobě mlhoviny, kterou uvidíme ještě tisíce let. A po tisících let se možná někdo podívá na oblohu a uvidí zašlou slávu bývalé hvězdy. A snad ho napadne otázka: Jaká asi byla, když majestátně svítila na obloze? A jací asi byli lidé, kteří se na ni tenkrát dívali?

Akteři příběhu

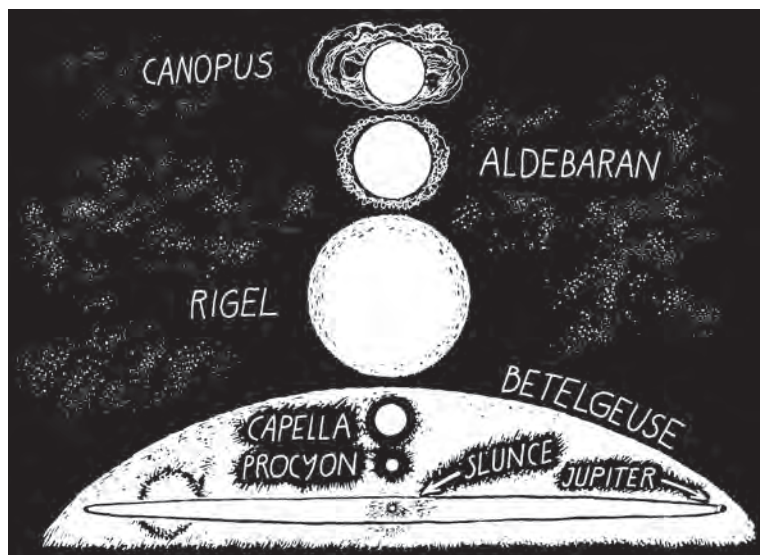
Hlavním hercem v našem příběhu je hvězda Betelgeuse, červený veleobr, kterého nalezneme v pravém rameni nejvýraznějšího zimního souhvězdí Orion. Přestože jde až o druhou nejjasnější hvězdu souhvězdí, má označení *Alfa Orionis*. Písmeny řecké abecedy se zpravidla hvězdy označují v pořadí podle své jasnosti (alfa je nejjasnější, beta druhá nejjasnější atd.). Občas jsou ale výjimky, Betelgeuse je jednou z nich, nejjasnější hvězdou souhvězdí Orion je totiž modrý veleobr Rigel nacházející se v levé noze Orionu.

Druhou postavou je nechtěně naše Slunce, neboť právě s ním budeme hvězdu Betelgeuse neustále porovnávat. Slunce se označ-

je symbolem \odot . Tahle značka se objevila poprvé u starověkých alchymistů. Kroužkem s tečkou označovali jednak roztok (*Solutio*) a jednak Slunce (*Solaris*). Obě slova měla stejnou zkratku *sol*, a pravděpodobně proto se pro ně ujal stejný symbol, který je známý ze starých receptur a učených knih.



Obr. 12. Zimní souhvězdí Orion. Betelgeuse tvoří jeho pravé rameno.



Obr. 13. Porovnání velikosti hvězdy Betelgeuse s některými známými hvězdami a s drahou Jupiteru. Slunce a Jupiter jen vymezují dráhu Jupiteru a na obrázku nejsou ve správném poměru.

Betelgeuse má oproti Slunci obrovské rozměry, její poloměr je tisíckrát větší než sluneční. Kdyby byla ve středu naší sluneční soustavy, dosahoval by její povrch až k dráze planety Jupiter. Přitom hmotnost Betelgeuse je „jen“ dvacetkrát větší než hmotnost Slunce. To znamená, že Betelgeuse má velmi malou průměrnou hustotu 10^{-7} g/cm^3 , zatímco Slunce má průměrnou hustotu $1,4 \text{ g/cm}^3$. Hustota Slunce je nepatrně vyšší než hustota vody, zatímco hustota Betelgeuse odpovídá desetitisícině hustoty vzduchu za normálních podmínek. Hvězda má malé husté jádro a kolem plynný obal, který tvoří většinu jejího objemu.

Pro životní osud hvězdy je klíčovým parametrem hmotnost. Hvězdy s velkou hmotností, jako má Betelgeuse, žijí jen krátkou dobu, v jejich nitru je vysoký tlak a teplota a jaderné reakce probíhají intenzivněji než u méně hmotných hvězdných bratrů. Stáří Slunce je 5 miliard let a má za sebou necelou polovinu života. Betelgeuse je stará jen 10 milionů roků a je na úplném konci svého života.

Pro chování hvězdy je velmi důležitým parametrem její *povrchová teplota*. Místo teploty se někdy používá *spektrální třída*²³ hvězdy. Slunce má povrchovou teplotu kolem 6 000 K, čemuž odpovídá spektrální třída G2, hvězda Betelgeuse má na povrchu teplotu 3 500 K a jde o červenou hvězdu spektrální třídy M2. Hvězdy s nízkou povrchovou teplotou jsou červené, hvězdy s vysokou povrchovou teplotou svítí modře.

Pro porovnávání jasnosti hvězd na obloze se zavádí tzv. *hvězdná velikost* neboli *relativní magnituda*. Nejjasnější hvězdy mají magnitudu kolem nuly, nejméně jasné hvězdy viditelné lidským okem mají magnitudu mezi 5 a 6. Hvězdy s vyšší hodnotou magnitudy uvidíme jen v dalekohledu. Na obloze jsou ale i jasnější objekty než nejjasnější hvězdy. Venuše může mít magnitudu kolem -4 , Měsíc v úplňku $-12,6$ a Slunce dokonce $-26,6$. Čím menší číslo, tím jasnější objekt na obloze je. Hvězda Betelgeuse svou jasnost mění, a tak její hvězdná velikost (magnituda) kolísá mezi hodnotami 0,2 až 1,2 s periodou 5,8 let. Hvězdná magnituda ale nevyovídá nic o skutečném *zářivém výkonu hvězdy* neboli *svítivosti*. Slunce je velmi jasné, protože je blízko a Betelgeuse je méně jasná, protože je daleko. Pokud bychom chtěli hvězdy porovnávat mezi sebou, musíme zavést tzv. *absolutní magnitudu*. Jde o magnitudu, kterou by hvězda měla, kdybychom se na ní dívali ze vzdálenosti 10 parseků²⁴. Naše Slunce má absolutní magnitudu $+4,71$ a hvězda Betelgeuse -5 ; kdyby tedy obě hvězdy byly ve stejné vzdálenosti, Betelgeuse by byla mnohem jasnější než naše Slunce. Přestože je Betelgeuse výrazně chladnější než Slunce, je její zářivý výkon (sví-

23 **Spektrální třída** – rozdělení hvězd podle charakteristiky jejich spektra do základních tříd W, O, B, A, F, G, K, M, L, T. Nejteplejší, modrofialové hvězdy mají spektrum označené W, nejchladnější hvězdy spektrálních tříd M, L a T jsou červené. Spektrální třída odpovídá povrchové teplotě hvězdy. Dělení do spektrálních tříd je příliš hrubé, proto se každá třída ještě dělí na podtřídy s čísly 0 až 9 (například F9, G0, G1 atd.). Mnemotechnická pomůcka pro zapamatování pořadí tříd: Whisky Od Babičky Anastázie – Fantasticky Geniální Koupě! Moderní Léčivo Traumat.

24 **Parsek** – jednotka vzdálenosti, tzv. paralaktická sekunda. Jde o vzdálenost, ze které by velká poloosa dráhy Země kolem Slunce byla vidět pod úhlem jedné obloukové vteřiny. Číselně je $1 \text{ pc} = 30 \times 10^{12} \text{ km}$, což je zhruba 3,26 světelného roku. Často používanými násobky jsou kiloparsek (kpc) a megaparsek (Mpc).

tivost) je stotisíckrát větší než sluneční. To je způsobeno výrazně větším povrchem hvězdy. Teplota (spektrální třída) a svítivost (absolutní magnituda) jsou základní dva parametry pro klasifikaci hvězd.

Shrňme nyní základní parametry našeho Slunce a hvězdy Betelgeuse do přehledné tabulky:

hvězda	Slunce	Betelgeuse
typ hvězdy	hlavní posloupnost	červený veleobr
vzdálenost	8 svět. minut	~640 svět. roků
stáří	5×10^9 let	$\sim 10 \times 10^6$ let
hmotnost	$1 M_{\odot}$ (2×10^{30} kg)	$\sim 20 M_{\odot}$
poloměr	$1 R_{\odot}$ (700 000 km)	$\sim 1\,000 R_{\odot}$
hustota	$1,4 \text{ g/cm}^3$	$\sim 10^{-7} \text{ g/cm}^3$
povrchová teplota	5 780 K	$\sim 3\,500$ K
spektrální třída	G2	M2
zářivý výkon	$1 L_{\odot}$ (4×10^{26} W)	$100\,000 L_{\odot}$
absolutní magnituda	4,71	-5,1
relativní magnituda	-26,6	0,2 až 1,2

Jak se hvězdy rodí

Hvězdy obvykle vznikají z rozsáhlých zárodečných mlhovin či molekulárních mračen, kterým říkáme hvězdné porodnice. Typická pramlhovina má rozměry desítek světelných roků a celkovou hmotnost tisíců Sluncí. Koncentrace částic bývá v rozmezí 10^5 až 10^9 částic v jednom metru krychlovém. Teplota pramlhoviny musí být nižší než 100 K, jinak by tepelné procesy zabránily gravitačnímu hroucení. Zrod hvězdy probíhá v několika fázích:

zárodečná mlhovina → globule → protohvězda →
→ hvězda hlavní posloupnosti

■ **Zárodečná mlhovina.** Asi nejznámější mlhovinou, ve které vznikají hvězdy, je Velká mlhovina v Orionu. Shodou okolností se nachází ve stejném souhvězdí jako hlavní postava našeho příběhu – hvězda Betelgeuse. Nalezneme ji pod výraznou trojicí hvězd tvořící pás Orionu. Rodící se hvězdy zde pozoroval již v 70. letech 20. století vynikající sovětsko-arménský astrofyzik Viktor Ambarcumjan (1908–1996), který pracoval na Bjurakanské observatoři na území dnešní Arménie. V naší Galaxii je ale hvězdných porodnic celá řada. K dalším patří Orlí mlhovina ze souhvězdí Hada, molekulární mračno v Perseu nebo molekulární mračno v Hadonoši. I v jiných galaxiích pozorujeme oblasti rodících se hvězd, velmi časté jsou u prolínajících²⁵ se galaxií, jakými je například dvojice galaxií nazývaná Antény, jež se nachází ve směru souhvězdí Havrana.

■ **Globule.** Za určitých podmínek se v pramlhovině mohou objevit shluky nepravidelného tvaru, které jsou dostatečně rozsáhlé a husté na to, aby gravitační síla převládla nad tlakovou silou. Shluk se začne rychle hroutit do svého středu, hovoříme o *globuli*. K prvopočátečním impulzům, jež mají za následek vznik globulí, může patřit například exploze blízké supernovy (a následné stlačené látky v pramlhovině rázovou vlnou), přechod spirálního ramene galaxie přes danou oblast, srážka dvou galaxií, nestability vyvolané přítomností magnetického pole a další jevy. Globule v takové situaci zpravidla vznikají po stovkách až po tisících.

■ **Protohvězda.** Globule se z počátku hroutí velmi rychle, ale v jejím středu narůstá teplota a tlak do té doby, až se ustaví rovnováha mezi tlakovou silou a gravitací. V tuto chvíli vzniká útvar,

25 **Srážka galaxií** – dosti častý jev, při kterém nedochází k přímým srážkám mezi hvězdami (jejich vzájemné vzdálenosti jsou příliš velké), ale k prolínání mezigalaktického prostředí. To může vést na překotnou tvorbu hvězd v interagujících mlhovinách obou galaxií.

který nazýváme protohvězda. Protohvězda má přibližně kulový tvar a další smršťování probíhá velmi pomalu. Nadbytečná energie uvolňovaná pomalým gravitačním smršťováním je z protohvězdy odváděna zářením. Zde má nezastupitelnou úlohu především prach, který září v široké škále vlnových délek a jeho záření může účinně odvádět energii z nitra protohvězdy. Protohvězda září především v mikrovlnné a infračervené oblasti, proto jsou k pozorování vzniku hvězd výhodné mikrovlnné nebo infračervené observatoře. Ze starších observatoří jmenujme alespoň infračervenou družici IRAS a ze současných přístrojů patří k tomu nejlepšímu, co mají astronomové k dispozici, Spitzerův vesmírný dalekohled v infračervené oblasti a evropská sonda Planck v mikrovlnné oblasti. Protohvězda pohybující se v zárodečné mlhovině před sebou často vytvoří charakteristickou rázovou vlnu podobnou rázové vlně před přídílí lodi, jež pluje po hladině oceánu.

■ **Hvězda hlavní posloupnosti.** Při pomalém smršťování protohvězdy se postupně zvyšuje tlak a teplota v nitru útvaru až do okamžiku, kdy je zažehnuta termojaderná syntéza. Zdrojem energie se stane slučování jader vodíku na hélium a z protohvězdy vznikne hvězda se zdrojem energie, který ji bude živit po většinu jejího aktivního života. Hvězdy slučující vodík na hélium se nazývají *hvězdy hlavní posloupnosti*. Tento poněkud podivný název vznikl podle polohy tohoto typu hvězd v tzv. Hertzsprungově-Russellově diagramu, se kterým se seznámíme později v této kapitole (hvězdy slučující vodík v něm vytvářejí nejvýraznější uskupení hvězd, tzv. hlavní posloupnost). Naše Slunce je v současnosti hvězdou hlavní posloupnosti a ještě jí bude po mnoho miliard roků. Hvězda Betelgeuse už má tuto hlavní fázi života hvězdy dávno za sebou. Proto se na chvíli budeme zabývat Sluncem, u kterého slučování vodíku na hélium ještě probíhá.

Zdroj energie hvězd

Zdroj energie hvězd byl po staletí záhadou. Dosti dlouho se předpokládalo, že jím je pomalá gravitační kontrakce hvězdy, a že se

proto v průběhu života každá hvězda postupně zmenšuje. Takový mechanismus by ale mohl pokrýt energetické výdaje hvězdy maximálně po dobu několika milionů let. Naše Slunce a mnoho dalších hvězd již svítí mnoho miliard roků, a tak je tento mechanismus nemožný.

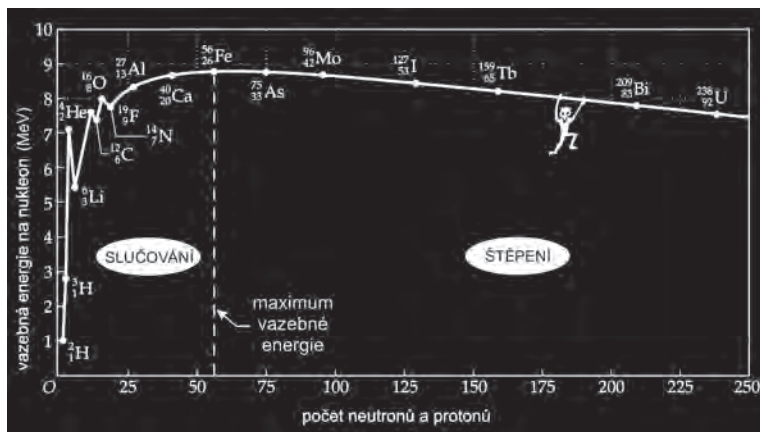
Skutečný zdroj energie hvězd byl odhalen až v souvislosti s poznáním hmoty na atomární úrovni. Atomy mají obaly z elektronů a jádra z protonů a neutronů. Tato jádra jsou vázána tzv. silnou interakcí, nicméně průměrná vazebná energie na jeden nukleon (energie jádra vydělená počtem částic jádra) se u různých prvků liší. Největší je u železa ^{56}Fe , nižší je u lehčích i u těžších prvků. Průběh vazebné energie pro různé prvky je znázorněn na grafu na pravé straně.

Z grafu je patrné, že z hmoty je možné energii získávat (vytvářet prvky s vyšší vazebnou energií) dvojím způsobem: buď štěpit²⁶ těžká jádra na lehčí nebo slučovat²⁷ lehká jádra na těžší. Cílem obou cest je dosáhnout oblasti největší vazebné energie (okolí prvku železa). Štěpení lidé využívají v jaderných elektrárnách. Slučování (fúze) je zdrojem energie v nitru hvězd. Jedním z prvních, kdo podrobně zkoumal možnosti fúzních reakcí v nitru hvězd byl německo-americký jaderný fyzik Hans Bethe (1906–2005). V jádru hvězd hlavní posloupnosti se za vysoké teploty a tlaku v divokém reji srážejí protony, deuterony²⁸ a další částice. Jen tu a tam se dva protony spojí a vytvoří jádro deuteria, ze kterého unikne pozitron a neutrino. Jednomu konkrétnímu protonu trvá stovky milionů

26 **Štěpení** – způsob získávání energie štěpením těžkých atomárních jader. Je základem současných atomových elektráren, ve kterých jsou jádra štěpena nalétávajícími neutrony. Produktem rozpadu jsou další neutrony, které štěpí další jádra (dojde k tzv. řetězové reakci). První štěpný reaktor postavil Enrico Fermi v roce 1942 v Chicagu.

27 **Slučování (fúze)** – způsob získávání energie slučováním lehkých atomárních jader. Tento proces probíhá přirozenou cestou ve hvězdách. V pozemských podmínkách je základním problémem udržení plazmatu na potřebnou dobu. Může jít o tzv. inerciální fúzi (například iniciovanou laserem), kdy terčík na krátkou dobu drží pohromadě setrvačností nebo o fúzi udržovanou v magnetickém poli (tokamak, pinč).

28 **Deuteron** – jádro těžkého vodíku (deuteria), jde o vázaný stav protonu a neutronu. V průměru na Zemi připadá na 7 000 atomů normálního vodíku jeden atom deuteria. Jde o stabilní izotop vodíku.

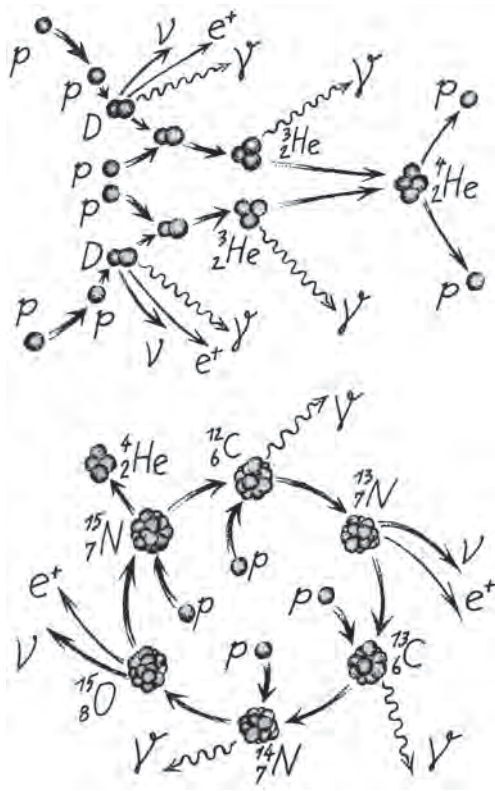


Obr. 14. Graf vazebné energie prvků. energii lze získat buď štěpením velkých nebo slučováním malých jader.

let, než se sloučí s jiným protonem. Jaderná syntéza probíhá v nitru hvězd velmi pomalu. Proto je tak obtížné ji napodobit v laboratorních podmínkách. Jeden kilogram sluneční látky vydává v průměru výkon pouhých 0,2 miliwattu a nerozsvítí by ani žárovku. Nicméně takových „kilogramů“ je ve Slunci 2×10^{30} , takže celkový zářivý výkon je enormní: 4×10^{26} W.

V nitru Slunce, kde je teplota 15 milionů kelvinů, dominuje tzv. *protono-protonový řetězec*. To je reakce, při které se v mnoha srážkách nakonec sloučí čtyři protony na jádro hélia. Při tomto procesu vzniknou ještě pozitrony, neutrina a samozřejmě energie. Ve Slunci probíhá ale i celá řada dalších jaderných reakcí, jednou z nich je i tzv. *CNO cyklus*. Ve Slunci není CNO cyklus hlavním zdrojem energie, ale ve hvězdách s o něco málo vyšší centrální teplotou (postačí 18 milionů kelvinů) tento cyklus dominuje. Jde opět o řadu reakcí se stejným výsledkem: čtyři protony se přemění na jedno jádro hélia, dva pozitrony, neutrina a energii.

V nitru našeho Slunce a ostatních hvězd probíhá i celá řada dalších reakcí, o nichž víme jen velmi málo. Foton unikající z termojaderného kotle k povrchu se prodírá plazmatem, které ho po



Obr. 15. Dvě nejdůležitější reakce – pp řetězec a CNO cyklus.

několikacentimetrové cestě pohltí a opětovně vyzáří v náhodném směru, opět uletí několik centimetrů, opět je pohlcen a vyzářen, třeba směrem zpět k jádru atd. Tímto náhodným procesem se přece jen v průměru náš foton velmi pomalu blíží k povrchu. Foton, který by z nitra Slunce letěl přímou cestou k povrchu jen něco málo přes dvě sekundy, urazí tuto cestu za statisíce až miliony let. Situace je ve skutečnosti ještě složitější. Jeden pohlcený foton je zpravidla vyzářen v podobě většího množství fotonů s nižší energií (delší vlnovou délkou). K povrchu se tedy nedostane foton původní, ale jeho hodně vzdálení potomci. Získávat informace o dějích v nitru Slunce z takto pozměněných fotonů je velmi obtížné. Exis-

tuje ale nadějný způsob, jak pozorovat děje v nitru Slunce takřka v přímém přenosu – pozorování neutrin, která vznikají při termojaderné syntéze. Ta procházejí celým Sluncem bez nejmenších problémů a některá z nich se daří zachytit v našich detektorech. Existují i specializované detektory zkoumající za pomoci neutrin méně běžné větve termojaderné syntézy v nitru Slunce. Jedním z nich je například detektor Borexino umístěný pod italskou horou Gran Sasso, kde se nachází obří evropský komplex podzemních laboratoří. Takové detektory umožňují lépe poznávat procesy probíhající hluboko v nitru hvězd.

Portréty hvězdy Betelgeuse

V době, kdy jsem navštěvoval astronomické kurzy v pražském planetáriu, nám říkali, že hvězdy jsou tak daleko, že je vždy uvidíme jako pouhé body a že ani sebevětší přístroj světa nedokáže hvězdu zobrazit jako kotouček. Prošly dvě desetky let a v roce 1995 se podařilo Hubbleovým vesmírným dalekohledem vyfotografovat povrch hvězdy Betelgeuse. Malý načervenalý kotouček jsem si dlouho a s velkou nedůvěrou prohlížel. Opět padnul jeden mýtus, který jsem měl zakořeněný hluboko v paměti. Úhlový rozměr hvězdy Betelgeuse je $0,055''$ ve viditelném spektru (na vlnové délce 720 nm), v blízkém ultrafialovém oboru jde ale již o $0,125''$ a ve vzdáleném ultrafialovém oboru činí úhlový průměr Betelgeuse dokonce $0,27''$.

Přelomový snímek byl pořízen dne 3. března 1995 v ultrafialovém oboru kamerou FOC (*Faint Object Camera*) na Hubbleově vesmírném dalekohledu. Na snímku byl patrný nejen nenulový rozměr hvězdy a její atmosféra, ale i zajímavá povrchová skvrna. Velikost horké skvrny byla srovnatelná s průměrem dráhy Země kolem Slunce a byla asi o $2\ 000\text{ K}$ teplejší než okolní povrch. Zjevná nehomogenita byla prvním svědectvím bouřlivých procesů na povrchu i v nitru umírající hvězdy Betelgeuse, která se nachází v závěrečné fázi svého života.

Od té doby byly nalezeny specializované interferometrické²⁹ postupy, které umožňují zobrazovat povrchy některých blízkých a obřích hvězd. První pořízená fotografie umírající Betelgeuse odstartovala snímkování hvězdy mnoha přístroji. V roce 1997 byly pořízeny snímky z nově instalovaného anglického interferometru COAST (*Cambridge Optical Aperture Synthesis Telescope*). COAST tvoří čtyři dalekohledy se základnou 100 metrů, které jsou citlivé od blízkého infračerveného oboru až po červenou část viditelného spektra. Každá jednotka je složena ze siderostatu³⁰ se zrcadlem o průměru 50 cm, ze kterého je světlo namířeno na Cassegrainův dalekohled³¹ se zrcadlem o průměru 40 cm. Světlo ze všech čtyř dalekohledů je vedeno hliníkovými trubkami do podzemní optické laboratoře, kde je metodou tzv. aperturní syntézy³² získán výsledný obraz s rozlišením 0,02". Infračervené snímky z interferometru COAST byly doplněny vizuálním snímkem (zpracovaným stejnou metodou) z Dalekohledu Williama Herschela (WHT), který má průměr 4,2 metru a je postaven na Kanárském ostrovu La Palma. Kompletní výsledky tohoto výzkumu byly publikovány v roce 2000. Na vizuálním snímku byly patrné tři výrazné skvrny. Pravděpodobně jde o vzestupné proudy látky z kolotající hvězdy. Ve velmi blízké infračervené oblasti (905 nm) měla hvězda výrazně menší rozměr a jen jednu viditelnou skvrnu. V blízkém IR (na

29 **Interferometrie** – skládání světla (případně elektromagnetického signálu) z více zdrojů a jeho následné matematické zpracování.

30 **Siderostat** – speciální zrcadlová montáž, na které se zrcadlo pohybuje tak, aby se sledovaná hvězda v centru zorného pole nepohybovala. Ostatní objekty kolem ní opisují kružnice.

31 **Cassegrainův dalekohled** – zrcadlový dalekohled s vrtným primárním zrcadlem a s vydutým sekundárním zrcadlem před primárním ohniskem. Světelný svazek se odráží od sekundárního zrcadla a vrací se pak v ose dalekohledu otvorem v primárním parabolickém zrcadle do okuláru. Výhoda tohoto typu spočívá v tom, že má podstatně delší ohniskovou vzdálenost a umožňuje tak větší rozlišení. Systém navrhl téměř neznámý francouzský sochař a vědec Sieur Cassegrain v roce 1672.

32 **Aperturní syntéza** – pozorovací metoda, která se používá v radioastronomii a infračervené astronomii ke zvýšení účinné plochy antény, a tedy k dosažení vyššího úhlového rozlišení. V minimálním uspořádání je zapotřebí dvojice dalekohledů, z nichž jeden je umístěn staticky a druhý je mobilní (jeho poloha se průběžně mění). Signál je poté zpracován speciálním matematickým postupem, jehož autorem je britský astronom a matematik Martin Ryle (1918–1984). Za práce v radioastronomii obdržel Nobelovu cenu v roce 1974.

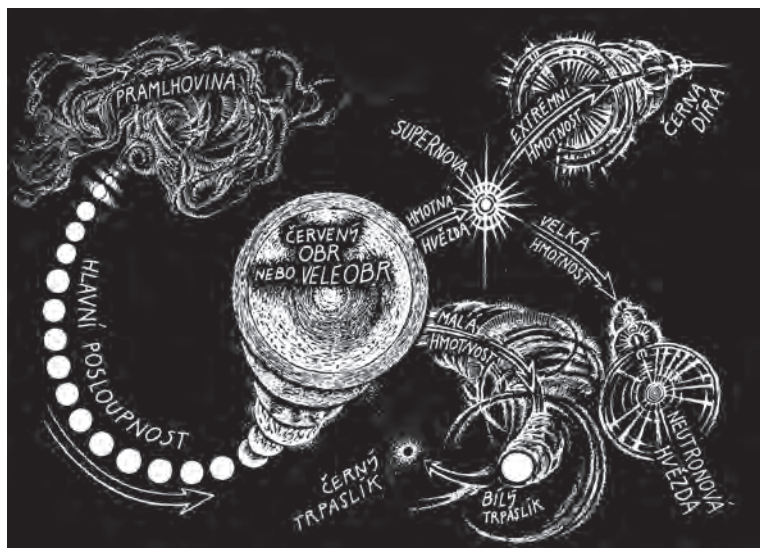
vlnové délce 1290 nm) měla hvězda nejmenší rozměr a nejostřejší hranici. Změna rozměrů s vlnovou délkou je způsobena tím, že v infračerveném oboru vidíme podvrchové vrstvy a hvězda se jeví menší.

Existenci skvrn na povrchu Betelgeuse se pokusila vysvětlit řada numerických simulací. Z většiny z nich plyne, že hvězda prochází obdobím pulzací a intenzivního mísení látky. Nejpůsobivější simulace pocházejí z dílny Bernda Freytaga z Univerzity v Uppsale), viz [46]. Na obrázku 10 v barevné příloze naleznete současnou představu o podobě této hvězdy.

Jak hvězdy umírají

Již jsme se zmínili, že tempo vývoje hvězdy silně závisí na její počáteční hmotnosti. Životní cyklus Slunce bude trvat přibližně 12 miliard roků, zatímco dvacetkrát hmotnější Betelgeuse bude žít jen 10 milionů let. Po vyčerpání vodíku jakožto paliva v jádře hvězdy dojde k výrazným strukturálním změnám. Hvězda se zpočátku začne smršťovat, v jejím středu poroste teplota a tlak až do okamžiku, kdy se zažehnou další jaderné reakce. Hélium se bude slučovat na uhlík, dusík, kyslík, xenon, a další prvky. Hvězda výrazně zvětší své rozměry a stane se obrem nebo veleobrem. Vždy když dojde k vyčerpání jednoho paliva, zažehne se záhy další reakce a hvězda bude postupně „prohořívát“ na těžší a těžší prvky až po železo, které je energeticky nejstabilnější. Na konci života hvězdy bude v jejím nitru převládat železo, ale ve vnějších vrstvách budou stále ještě existovat i lehké prvky.

Další osud hvězdy bude záležet na její počáteční hmotnosti. Málo hmotné hvězdy projdou tzv. stadiem pulzací, při kterém několikrát odhodí obálku a vytvoří kolem sebe krásné mlhoviny. Nakonec se stanou bílým trpaslíkem, který postupně vychladne na černého trpaslíka. Hmotnější hvězdy budou explodovat jako supernovy a obohatí okolí o těžké prvky, které v nich vznikly. V explodujících obálkách jsou takové energetické poměry, že zde mohou dokonce



Obr. 16. Různé varianty vývoje hvězdy.

vznikat i prvky těžší než železo. Z rozmetané látky bohaté na těžké prvky pak vznikají další generace hvězd. Každý z nás je tak vytvořen z materiálu, který rozházela do svého okolí nějaká supernova. Na místě bývalé supernovy zůstane buď neutronová hvězda nebo pro extrémně hmotné hvězdy černá díra. K závěrečným stádiím života hvězd tedy patří:

■ **Bílý trpaslík** – závěrečné stádium hvězdy, ve kterém elektronový plyn vyvíjí tlakovou sílu (způsobenou Pauliho vylučovacím principem³³), která zabrání gravitačnímu hroucení. Poloměr je 1 000 km až 30 000 km, hustota řádově 10^3 kg cm^{-3} , maximální hmotnost $1,44 M_{\odot}$. Hmotnější bílí trpaslíci jsou nestabilní. Tuto tzv. *Chandrasekharovu mez* odvodil indický fyzik a astronom Subrahmanyan Chandrasekhar (1910–1995) v roce 1930. Již v roce 1834 si německý matematik a astronom Fridrich Bessel

33 **Pauliho vylučovací princip** – dvě částice s poločíselným spinem (například elektron nebo neutron) se nemohou nikdy nacházet ve stejném kvantovém stavu. Důsledkem tohoto principu je tlak kvantové povahy, kterým mohou bílí trpaslíci a neutronové hvězdy odolat závěrečnému gravitačnímu hroucení.

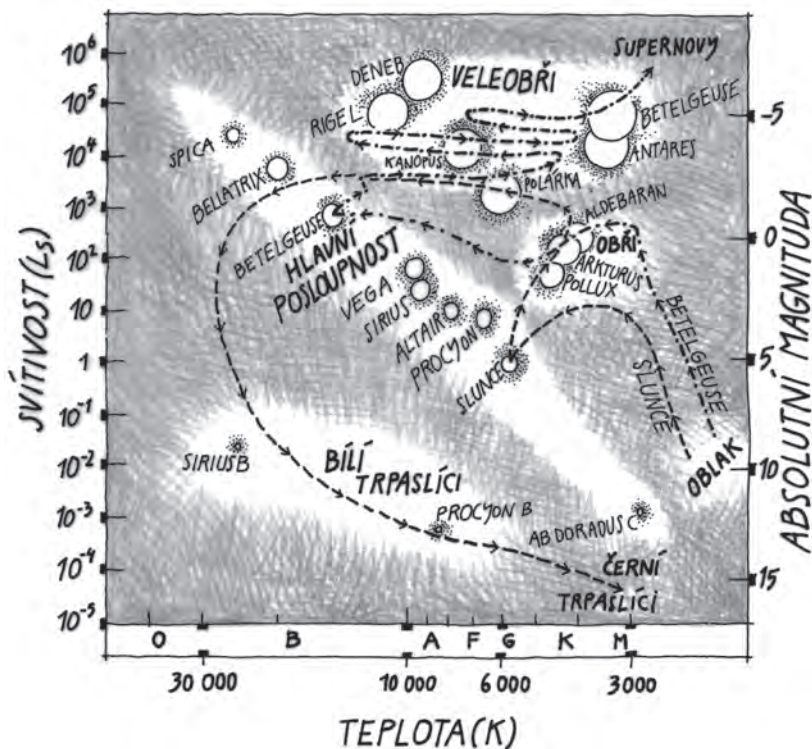
(1784–1846) povšimnul, že hvězda Síríus se pohybuje po vlnkovité dráze. Z toho usoudil, že by měla mít malého průvodce. Tento průvodce (Síríus B) byl objeven v optické dílně bratří Clarků roku 1862, když Alvan Clark testoval objektiv o průměru 45 cm. Síríus B se stal prvním objeveným bílým trpaslíkem. Na Síríu B byla demonstrována správnost newtonovské teorie (vlnkovitá trajektorie Síría A) i potvrzena obecná relativita (červený posuv světla unikajícího z trpaslíka). Síríus B je enormně malý a hustý bílý trpaslík s průměrem 11 736 km a hustotou $\rho = 3 \times 10^3 \text{ kg cm}^{-3}$. Povrchová teplota je 24 800 K, vzdálenost 8,6 světelného roku a hmotnost $1,03 M_{\odot}$.

■ **Neutronová hvězda** – závěrečné stádium hvězdy, jejíž nitro je složené především z neutronů. Ty se chovají jako kvantový plyn, který svým tlakem zastaví gravitační hroucení. Hmotnost neutronové hvězdy musí být menší než přibližně $2 M_{\odot}$ (tzv. *Tolmanova-Oppenheimerova-Volkoffova mez*). Typický průměr neutronové hvězdy je v řádu desítek kilometrů, průměrná hustota $10^{11} \text{ kg cm}^{-3}$ dosahuje hustoty atomového jádra. Neutronové hvězdy vznikají při gravitačním kolapsu velmi hmotných červených veleobrů, při výbuchu supernovy. Obrovský tlak způsobuje sloučení většiny elektronů a protonů na neutrony. Přitom se uvolní velké množství neutrin, která mohou být pozorována našimi detektory. Neutronové hvězdy byly teoreticky předpovězeny ve 30. letech 20. století. První neutronovou hvězdu objevila v roce 1967 mladá asistentka Jocelyne Bellová, která pracovala pod vedením vynikajícího astronoma Anthony Hewishe.

■ **Černá díra** – objekt, který kolem sebe zakříví čas a prostor natolik, že z něho nemůže uniknout ani světlo. Část černých děr vzniká kolapsem hvězdy v závěrečných fázích vývoje, jiné, obří černé díry, sídlí v centrech galaxií. Rotující černé díry kolem sebe vytvářejí akreční disky látky a v ose rotace výtrysky vysoce urychlených částic. Paradoxně akreční disky i výtrysky vznikající v bezprostředním okolí černé díry velmi intenzivně vyzařují. Existenci černých děr předpověděl na základě Einsteinovy obecné teorie

relativity německý fyzik Karl Schwarzschild (1873–1916) v roce 1916. První černá díra byla objevena v roce 1971 anglickým astronomem Paulem Murdinem. Ztotožnil s ní rentgenový zdroj Cyg X1 v souhvězdí Labutě, který byl známý již od roku 1964.

Teoretici ještě uvažují o možné existenci kvarkových hvězd, ve kterých by gravitaci odolávaly kvarky, z nichž jsou složeny protony a neutrony. Takové hvězdy ale nebyly prozatím pozorovány. Životní osudy hvězd různé hmotnosti je možné snadno znázornit v Hertzsprungově-Russellově diagramu. Na vodorovné ose je teplota (spektrální třída) a na svislé ose svítivost (absolutní magni-



Obr. 17. Hertzsprungův-Russelloův diagram. Vykresleny jsou životní dráhy Slunce a Betelgeuse. Je patrné, že hvězdu Antares čeká podobný osud jako Betelgeuse.

tuda). Na obrázku 17 jsou zakresleny základní životní etapy Slunce a Betelgeuse.

Jaký bude osud Slunce a Země? Vodík v jádru Slunce dojde za přibližně 7 miliard roků. V té době se v nitru zažehnou další termojaderné reakce a Slunce se stane červeným obrem. Jeho povrch bude zasahovat až k dnešní dráze Marsu. Slunce bude mít o 20 % nižší hmotnost a planety budou na jiných drahách než dnes. Země se bude pohybovat tam, kde je v současnosti Mars, a tak zůstane nad slunečním povrchem a bude pro tuto chvíli ušetřena okamžité zkázy. V té době ale již Země nebude obyvatelná a veškerá voda se vyvaří a zmizí z naší planety. Země se bude pohybovat sluneční korónou a bude intenzivně na své dráze brzděna. Nebude to trvat dlouho a po spirále se zřítí do Slunce a její osud tak bude definitivně naplněn.

Jak umírá Betelgeuse

Kolik času ještě zbývá umírající hvězdě Betelgeuse do závěrečné exploze, kdy naposledy zazáří a její hvězdný život vyhasne definitivně? Těžko říci. V naší Galaxii v průměru exploduje jedna supernova za století, maximálně dvě. Zkušenosti s tímto jevem máme minimální. Betelgeuse je zjevně na samém konci života a její exploze je dílem okamžiku. Astronomického okamžiku. Snad století. Možná několik set let. A možná také jen několik let. Zajímavá jsou měření průměru Betelgeuse na americké observatoři Mt. Wilson s pomocí interferometru ISI (*Infrared Spatial Interferometer*). Interferometr pracuje v infračervené oblasti spektra, je složen ze tří mobilních jednotek, každá slouží jako siderostat s jedním rovinným a jedním parabolickým zrcadlem. Maximální základna může být až 85 metrů. Přístroj je specializován na interferometrii hvězd. Měření průměru Betelgeuse za 15 let (1993 až 2009) přineslo velké překvapení. Průměr hvězdy se na vlnové délce 11,3 μm zmenšil o 15 % a pokles rozměru Betelgeuse rozhodně není lineární, ale kvadratický. Jde již o závěrečný kolaps? Pravděpodobně nikoli,

může jít o horní část sinusovky a další z mnoha postupně obje-
vaných pulzací.

Senzacechtiví novináři spojují explozi Betelgeuse s avizovaným
koncem světa v roce 2012 a tvrdí, že na obloze budou po něko-
lik týdnů zářit dvě Slunce. Co bychom vlastně doopravdy viděli,
kdyby Betelgeuse explodovala nyní? Dozajista by šlo o mimořádný
astronomický zážitek. Betelgeuse v rameni Orionu by se rozzářila
jako ostrý svítící bod, jehož jasnost by mohla dosáhnout až svitu
Měsíce v úplňku. Nicméně den by rozhodně nenastal, bez problé-
mu bychom v okolí viděli i ostatní jasné hvězdy, stejně tak, jako je
běžně vidíme v okolí Měsíce. Svit explodující Betelgeuse by nám
umožnil si v noci přečíst noviny a předměty by vrhaly stíny způso-
bené svitem supernovy.

Ve dne by Betelgeuse byla na obloze vidět jako výrazný svítící bod.
Po několika týdnech by levé rameno Orionu zaniklo a na jeho mís-
tě se postupně vytvořila mlhovina z materiálu rozmetaného tou-
to gigantickou explozí, v jejímž nitru zůstane neutronová hvězda
nebo černá díra. Celou událost astronomové označují jako super-
nova typu II. Přímé ohrožení Země ze vzdálenosti 640 světelných
roků je téměř vyloučené. Pokud by Betelgeuse měla silné dipólové
magnetické pole, mohl by být v magnetické ose směřován výrazný
rentgenový a gama záblesk. Šance, že by byl namířen právě k Zemi
je velmi malá. Navíc hvězdní obři nemívají silné magnetické pole.
Betelgeuse je v tomto směru výjimkou, v roce 2010 bylo namě-
řeno povrchové pole 10^{-4} T. Betelgeuse má velmi pomalou rotaci
a klasické tekutinové dynamo v ní není možné. S největší pravdě-
podobností je zdrojem pole konvektivní proudění plazmatu a při
něm vznikající supercely (supergranule). Takové pole ale nebude
mít výrazně dipólový charakter a schopnost směřovat gama záření
do jednoho výhradního směru. Betelgeuse je z vědeckého hlediska
nesmírně cenný objekt a jednou lidstvu příchystá zajímavou astro-
nomickou podívanou, kterou budeme naštěstí sledovat z bezpečné
vzdálenosti. Dokonce je velmi pravděpodobné, že v současné době
již Betelgeuse neexistuje a signál o jejím konci je na cestě k nám.

Víte, že

- Víte, že existují i další hvězdy, u nichž se předpokládá astronomicky blízká exploze? Jednou z nich je extrémně hmotná hvězda Éta Carinae ze souhvězdí Lodní kýl.
- Víte, že první neutrino jakožto svědectví exploze supernovy, byla zachycena v roce 1987? Šlo o explozi supernovy SN 1987A z Velkého Magellanova mračna a neutrino vznikla při překotné tvorbě prvků těžších než železo v rázové vlně spojené s explozí.
- Víte, že by se slovo Betelgeuse mělo česky správně číst přibližně tak, jak je napsané? Výslovnost *bitldžús* ze známého filmu Tima Burtona není správná.

Poučení na závěr. *Život ani těch nejúžasnějších hvězd netrvá věčně. Po období krásy a marnivosti vždy přijde rychlý pád.*