

Když vybuchne supernova

Často se v médiích objevují „zaručené zprávy“ o konci světa a nezřídka jsou doprovázeny zmínkou o výbuchu supernovy, která svým zářením rozsvítí noční oblohu do denního jasu a připraví zemský povrch o vše živé. Je takový scénář možný? A co je to vlastně supernova? Pojďme se na téma supernov podívat podrobněji, zejména na některé mýty, jež toto téma obestírají.

K výbuchu supernovy dochází v závěrečném stádiu života velmi hmotných hvězd, alespoň $8\times$ hmotnějších, než je naše Slunce. Život hvězdy – to je neustálý souboj gravitace, snažící se hvězdu smrštit do co nejmenšího objemu, a tlakového gradientu, který působí směrem opačným a hvězdu naopak „nafukuje“. Po většinu života jsou obě tyto síly v rovnováze, ale na jeho konci dojde k finálnímu souboji. V něm může být dočasně silnějším soupeřem tlakový gradient, který je zejména u hmotnějších hvězd podporován tlakem záření unikajícího z jádra, ale konečným vítězem je vždy gravitace, která hvězdu smrštit na setinu, nebo dokonce až stotisícinu původního poloměru. V prvním případě

je konečným stadiem bílý trpaslík, ve druhém pak neutronová hvězda. A právě druhý případ je doprovázen komplexním sledem událostí, jež souhrnně označujeme jako výbuch supernovy.

Třídíme supernovy

Hlavním kriteriem pro klasifikaci supernov je přítomnost čar vodíku v jejich spektru. Supernovy, v jejichž spektru přítomnost vodíku nezjistíme, zařazujeme do třídy I (SN I), tam, kde se spektrální čáry projeví, hovoříme o typu II (SN II). Supernovy SN I dále dělíme na podtypy Ia (přítomny spektrální čáry křemíku), Ib a Ic (dle obsahu helia). Supernovy typu Ia jsou nejsvitivější, supernovy typů

Pozůstatek po explozi supernovy SN 1987A ve Velkém Magellanově oblaku. Jde o typickou supernovu typu II, která explodovala ve vzdálenosti 167 000 ly. Signál k nám doletěl v roce 1987. Prstence jsou zahřáté na teplotu 5 000 až 25 000 kelvinů. Centrální prstenec se vytvořil asi 30 000 roků před explozí hvězdy a je tedy fosilním záznamem závěrečných stadií hvězdného života v sousední galaxii. Zdroj: HST/WFPC2, 1997.



Ib a Ic jsou několikrát méně svítivé, stejně jako supernovy typu II, jejichž jasnost však dosti kolísá.

Daleko důležitější je pro nás ale fakt, že zatímco supernovy typu Ia nacházíme ve všech typech galaxií, supernovy typů Ib, Ic a II pozorujeme pouze v galaxiích nepravidelných nebo spirálních (zejména v oblasti spirálních ramen). Protože spirální a nepravidelné galaxie obsahují velké množství mezihvězdné látky a jsou tudíž místem intenzivní tvorby hvězd, domníváme se, že progenitory (vývojovými předchůdci) supernov typu II, Ib a Ic jsou právě mladé hmotné hvězdy, které se zde zrodily před pouhými několika miliony let.

Naopak supernovy typu Ia nacházíme i v eliptických galaxiích, které jsou na mezihvězdnou hmotu velmi chudé a prakticky žádné nové hvězdy se zde nevyskytují. To znamená, že supernovy Ia musejí vzniknout ze starších a tedy méně hmotných hvězd než supernovy výše uvedených typů, a také mechanismus jejich vzniku je odlišný.

Kolabující jádra hvězd

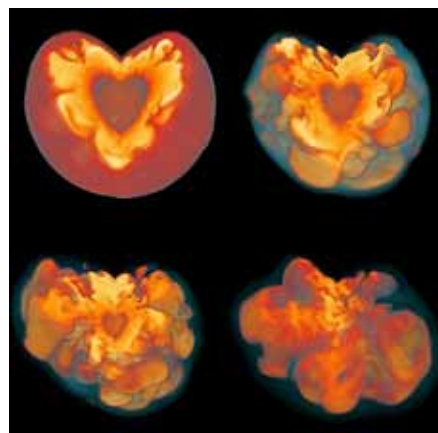
Supernovy typu Ib, Ic a II vznikají v důsledku gravitačního kolapsu jádra hmotných osamocených hvězd. Vývoj vnitřních částí hvězdy je vlastně jedním dlouhotrvajícím gravitačním kolapsem. Hvězda kolabuje takovou rychlostí, s jakou dochází ke ztrátám energie vyzařované do jejího okolí. Kvůli nim je termonukleární reaktor v nitru hvězdy nucen energii doplňovat, aby udržela dostatečný tlakový gradient odolávající tíze okolních vrstev.

Jádro hvězdy, ve kterém dochází k termonukleární syntéze jader lehčích prvků na těžší, je zároveň skladištěm „vyhořelého“ paliva, které se ukládá v jeho centru. Kromě těžších prvků jsou produktem termonukleárních reakcí také neutrina a pozitrony. Vzhledem k postupnému zahušťování jádra a zvyšování teploty se ale produkty předchozích reakcí stávají novým palivem a dochází k syntéze těžších a těžších prvků. Pro hmotné hvězdy v závěrečném stadiu vývoje je proto typická slupkovitá struktura nitra, v jehož jednotlivých vrstvách dochází směrem k centru k produkci stále těžších prvků.

Jádro hvězdy zpočátku kolabuje velmi pomalu, neboť výkon termojaderných reakcí je dostatečný k tomu, aby poskytoval stejnou energii, jakou hvězda pozbývá díky záření a odlétávajícím neutrinům. Pokaždé, když v nitru dojde příslušné palivo, jádro se smrští, zahřeje a nastartuje se nová jaderná reakce. Po spálení helia jsou následující

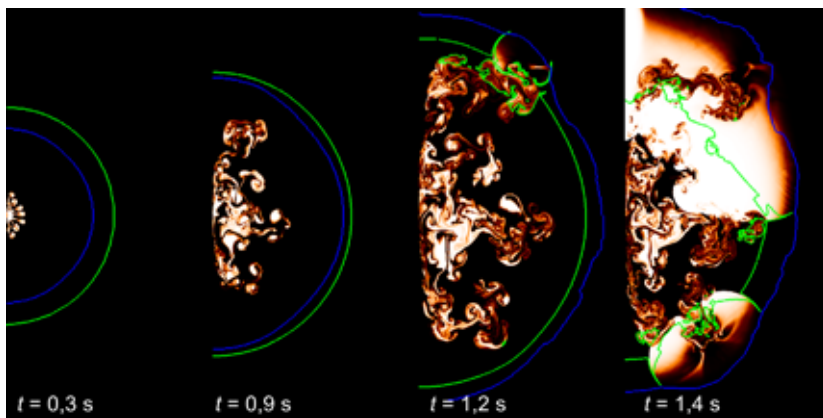
Supernova – rozmetání podstatné části hvězdy, při kterém vznikne extrémně jasný objekt, jehož svítivost se o více než 4 řády zvýší. Minimálně 10 % hmotnosti původní hvězdy se přemění na energii exploze. Svítivost posléze klesá v průběhu týdnu či měsíců. K tomuto konci vedou dvě možné cesty: buďto se jedná o velmi hmotnou hvězdu, která ve svém jádře vyčerpala zásoby paliva a začala se hroutit pod silou své vlastní gravitace na neutronovou hvězdu, nebo o bílého trpaslíka, který nahromadil materiál od svého hvězdného průvodce, dosáhl Chandrasekharovy meze a prodělal objemovou termonukleární explozi.

Numerická simulace časového vývoje rozpínající se bubliny, která vytváří na svém vnějším okraji rázovou vlnu.
Zdroj: K. Kifonidis a kol., Max Planck Institut.



Supernova typu Ia – závěrečné vývojové stádium těsné dvojhvězdy. Tvoří-li dvojhvězdu bílý trpaslík a obr (veleobr) nebo hvězda hlavní posloupnosti, může docházet k přenosu látky na bílého trpaslíka, který tak zvětšuje svoji hmotnost. Po překročení Chandrasekharovy meze ($1,4 M_{\odot}$) se bílý trpaslík zhroutí do neutronové hvězdy, dojde k explozivnímu termonukleárnímu hoření C a O na ^{56}Ni v celém objemu trpaslíka a uvolněná potenciální energie se projeví jako výbuch supernovy typu Ia. Množství energie je vždy zhruba stejné, takže z relativní pozorované jasnosti lze vypočítat vzdálenost příslušné supernovy. Přesnější hodnoty se pak určí z tvaru světelné křivky (z průběhu nárůstu a poklesu jasnosti). Supernovu typu Ia lze identifikovat podle tvaru jejího spektra, ve kterém chybí čáry vodíku a jsou přítomné čáry křemíku.

Časový vývoj deflagrační vlny, která se podzvukovou rychlostí šíří do chvíle, kdy materiál dosáhne kritické hustoty (vyznačeno zeleně). V té chvíli přechází v detonaci. Modře je označena hranice původního konvektivního jádra. Zdroj: Aaron Jackson, Laboratory for Computational Physics and Fluid Dynamics, Washington.



reakce obrovsky urychleny díky skokovému navýšení ztrát energie odnášené neutriny. Při teplotě kolem jedné miliardy kelvinů dojde v nitru k rovnováze mezi počtem volných elektronů a pozitronů vznikajících při jaderných reakcích. Při vzájemné anihilaci těchto částic se může vytvořit pár neutrino-antineutrino, který díky malému účinnému průřezu interakce s hmotou opouští hvězdné nitro a energetické ztráty hvězdy se tak zněkolikanásobují. Zatímco hoření vodíku probíhá v nitrech velmi hmotných hvězd miliony let (u hvězd hmotnosti Slunce miliardy let), hoření uhlíku probíhá již jen tisíce let a hoření křemíku pouhé 2 týdny!

Cyklus zážehu nových termonukleárních reakcí končí u prvků skupiny železa, které vykazují maximální hodnotu vazebné energie na nukleon. Další syntézou těchto prvků by jádro energii potřebnou k zastavení kolapsu nezískalo. Hvězda však nadále ztrácí energii prostřednictvím neutrin, jejichž tok v tu chvíli převyšuje tok neutrin ze Slunce o 15 řádů. Jádro je o cennou energii navíc okrádáno dvěma dalšími procesy. Při hustotách blízkých 10^{10} g/cm^3 dochází ke „vtlačování“ elektronů do protonů v jádrech, čímž dochází k zvyšování neutronového čísla. A protože volné elektrony jsou v elektronově degenerovaném jádře hlavním zdrojem tlaku, je jejich úbytek dalším důvodem k vychýlení rovnováhy ve prospěch gravitace.

Železné jádro, zbavené možnosti bránit se drtivé síle gravitace, se počíná hroutit volným pádem, jehož rychlost dosáhne až čtvrtiny rychlosti světla. Původní jádro o velikosti Země se v řádu sekund smrští do tzv. protoneutronové hvězdy o poloměru kolem 30 km. Tento útvar je důsledkem ustavení krátkodobé rovnováhy mezi gravitací a repulzivní složkou jaderných sil, které se uplatní při hustotě přibližně 10^{14} g/cm^3 (díky působící gravitaci je to dvojnásobek hustoty atomového jádra). Důsledkem ustavení krátkodobé rovnováhy ve vnitřní části kolabujícího jádra je vznik mohutné rázové vlny, která vznikne při pádu vnějších vrstev na proto-neutronovou hvězdu. Dříve jsme

měli zato, že právě tato rázová vlna je zodpovědná za „výbuch“ supernovy, tj. rozmetání veškeré hmoty nad hranici proton-neutronové hvězdy. Tento mechanismus výbuchu supernovy při kolapsu jádra na neutronovou hvězdu poprvé nastílnili Fritz Zwicky a Walter Baade roku 1939.

Ve skutečnosti se ale rázová vlna během několika tisícín sekundy rozpadne, a to díky obrovským ztrátám energie odlétávajícími neutrinami a jadernou fotodisintegrací železa. Následně pokračuje akrece hmoty na neutronovou hvězdu v jádře, a to rychlostí několika desetin hmotnosti Slunce za sekundu! V případě supernovy však akrece trvá jen zlomek sekundy, jedna sekunda je čas postačující ke vzniku černé díry. Během následujících několika sekund vyzáří proton-neutronová hvězda pomocí unikajících neutrin až 10 % své klidové hmotnosti. Na úkor vyzářené energie se smrští do koule o typickém průměru 10 km – vznikne neutronová hvězda.

Obálka obklopující jádro hvězdy je následně rozmetána do okolního vesmíru. Ačkoli je tento „výbuch“ způsoben unikajícími neutrinami, nejedná se o přímočarý proces. Tento problém zaměstnával astrofyziky po několik desítek let a rozřešen byl až po rozvoji výpočetní techniky, kdy mohly být provedeny vícerozměrné simulace kontrakce proton-neutronové hvězdy a transformace energie neutrin do jejího bezprostředního okolí. Ta se ukládá do horké nafukující se „bubliny“ naplněné fotony vzniklými při anihilaci neutrin a také elektron-pozitronovými páry. Rozpínající se bublina vytváří na svém vnějším okraji rázovou vlnu, která je zodpovědná za pozorovaný „výbuch“. Atmosféra neutronové hvězdy, složená ze záření, elektron-pozitronových párů, neutrin a volných protonů a neutronů, připomíná složení našeho vesmíru jen několik minut po jeho vzniku! Opět se zde projevuje fakt, že cesta ke studiu počátečních fází vesmíru vede k vysokým energiím.

Těžší než železo

Je všeobecně známo, že prvky s atomovým číslem vyšším, než má železo, vznikají pouze při výbuších

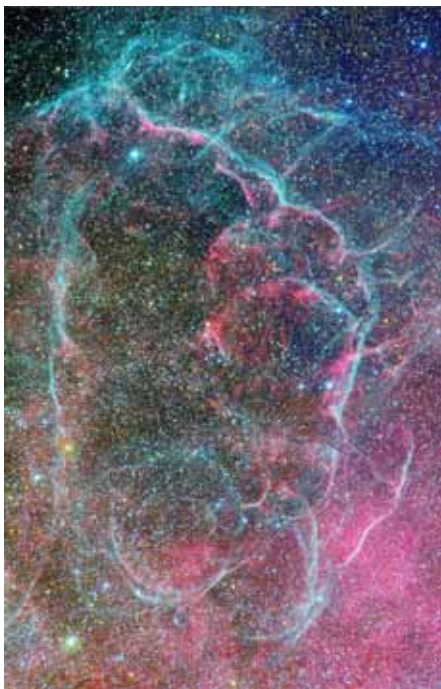
Supernova typu Ib – velmi hmotná hvězda v závěrečném stádiu, která se zbavila obálky z vodíku. Zůstala jí však obálka z helia, která tvoří výraznou absorpční čáru na vlnové délce 570 nm. Spektrum dále obsahuje typické čáry O I, Ca II, Mg II, zcela chybí čáry vodíku. Příkladem může být objekt SN 2008D v galaxii NGC 2770 v souhvězdí Rysa ve vzdálenosti 88×10^6 světelných roků.

Supernovu SN 2011fe, která vybuchla v roce 2011 v galaxii Větrník (Pinwheel Galaxy), se podařilo vyfotografovat pouhých 11 hodin po výbuchu. Srovnáním snímků před explozí a po explozi byl identifikován průvodce (nepozorovaného) uhlíko-kyslíkového trpaslíka. Jednalo se o hvězdu hlavní posloupnosti. Zdroj: NASA/ESA/HST.



Supernova typu Ic – velmi hmotná hvězda v závěrečném stádiu, která se zbavila obálky z vodíku a helia. Mohla ji odhodit nebo ji odsál souputník. Ve směru osy rotace se vytvářejí obálkou netlumené výtrysky, které díky brzdění okolním prostředím září krátkodobě v rentgenovém a gama oboru. Zbylé železné jádro s uhlíkovsi-kovou vnější vrstvou kolabuje na černou díru. Ve spektru chybí jak vodíkové, tak heliové čáry. Při kolapsu dojde k prudkému zrychlení rotace a vytvoření tlustého akrečního disku. Příkladem může být objekt SN 2003yd v souhvězdí Vodnáře, který je vzdálen 270×10^6 světelných roků. Osa výtrysků nemíří k Zemi.

Malá část pozůstatku po explozi supernovy v souhvězdí Plachet. Supernova explodovala velmi dávno, přibližně před 12 000 lety. Zdroj: Paolo Peggì.



supernov. Jejich vznik však není zdaleka tak přímočarý, jak se často tvrdí. Hnacím motorem nukleosyntézy je v tomto případě tzv. r-proces (r z anglického „rapid“, což znamená „rychlý“). Jedná se o proces zachytu neutronů, který probíhá dostatečně rychle v porovnání s paralelně probíhajícím beta rozpadem. K tomu jsou zapotřebí teploty řádu 10^9 K a koncentrace neutronů alespoň 10^{20} částic v jednom cm^3 . Takové podmínky existují pouze v těsném okolí kolabujícího jádra, kde intenzivní tok neutronů z ochlazujícího se jádra vytvoří náraz „neutronového větru“ o délce trvání pouhých 10 s, což znamená, že k syntéze prvků r-procesem dochází ve chvíli, kdy je neutronová hvězda jen několik sekund stará. Jeho studium je proto pro astrofyziky nesmírně důležité.

V počátečních fázích je tok neutrin a antineutrin z jádra neutronové hvězdy vyrovnaný, ale protože neutrony, které jádro vytvářejí, reagují s neutrinami za vzniku protonů a elektronů, začne tok antineutrin převažovat. Jinými slovy: antineutrino procházejí z jádra neutronové hvězdy snadněji než neutrina. Antineutrino posléze reagují s protony v atmosféře a celkově je tedy vítr z neutronové hvězdy významně obohacen o neutrony na úkor protonů. Ty spolu s poklesem teploty pod 10^{10} K začnou reagovat za vzniku částic alfa, jader helia. Protože neutronů je ve větru přebytek, vytvoří se nad atmosférou neutronové hvězdy vrstva obsahující alfa částice a neutrony. Při dalším poklesu teploty pod 5×10^9 K se začnou heliová jádra slučovat do jader prvků skupiny železa.

V této vrstvě se tedy nachází částice alfa, volné neutrony a těžké prvky, které jsou základními kondenzačními jádry pro nastartování r-procesu. Ten začne probíhat ve chvíli, kdy teplota poklesne pod 10^9 K. Volné neutrony se začnou na jádrech těžších prvků zachytávat a vytvářet tak popsáním procesem prvky těžší než železo. Výsledkem je, že supernova rozmetá do svého okolí celkem $10^{-5} M_{\odot}$ hvězdného materiálu, obsahujícího 10 až 20 % těžkých prvků, syntetizovaných r-procesem, zbytek připadá na helium. Shrňme-li tedy proces syntézy těžkých prvků v supernově, zjistíme, že supernova nejdříve všechna jádra těžkých prvků rozloží při fotodisintegraci, a teprve poté vytvoří postupným slučováním nukleonů jádra helia, posléze jádra těžších prvků skupiny železa a následně jejich bombardováním neutrony prvky ještě těžší. Jakoby se proces vzniku prvků na počátku vesmíru rychle během deseti sekund zopakoval a protáhl do pozdních fází nukleosyntézy.

Dosvit

Výše uvedený scénář výbuchu supernovy podrobně popisoval vznik neutronové hvězdy a uvolnění obrovského množství energie, z níž asi 99 % odnášejí neutrina vznikající neutronizací hmoty, 1 % je uloženo v kinetické energii rozpínající se obálky a jen 0,01 % uniká ve formě záření. Přestože se jedná o proces trvající řádově sekundy, supernovu coby svítící bod můžeme na obloze sledovat výrazně déle. Během prvních 100 dní po výbuchu poklesne její jasnost přibližně stokrát, během roku asi tisíckrát. Tvar světelné křivky prozrazuje, že v rozpínající se obálce dochází po výbuchu k radioaktivnímu rozpadu nestabilních izotopů niklu a kobaltu. Pozůstatky po výbuchu supernovy však můžeme ve vesmíru pozorovat i stovky tisíc let. Jedná se jak o vizuálně pozorované řasové mlhoviny, jejichž tvar určuje interakce rozpínající se obálky s rázovými vlnami vniklými při výbuchu, tak o rentgenové záření, které při této interakci vzniká. Uvnitř těchto mlhovin pozorujeme neutronovou hvězdu – žhavý pozůstatek po fenomenálním zániku jedné hmotné hvězdy.

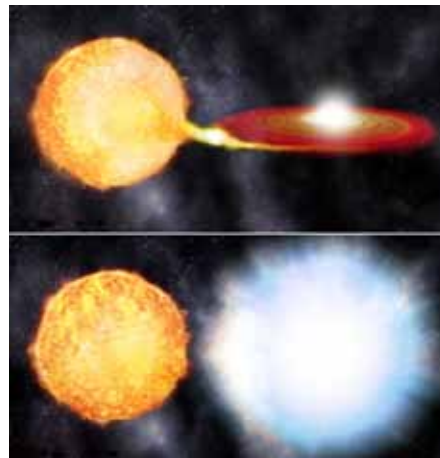
Supernovy Ia

Nepřítomnost vodíku ve spektru těchto supernov, spolu s čarami křemíku a profilem světelné křivky, v jejímž dosvitu pozorujeme čáry niklu – to vše svědčí pro hypotézu, že předchůdci těchto supernov jsou uhlíko-kyslíkoví bílí trpaslíci, akreující hmotu coby složka dvojhvězdy. Bohužel, žádný z takových progenitorů nebyl doposud pozorován, jedním z možných kandidátů jsou velmi měkké rentgenové zdroje (SSXS). V našich výzkumech jsme proto zatím vázáni pouze na fyzikální modely a numerické simulace.

Typického předchůdce supernovy Ia si představujeme jako dvojhvězdu, jejíž jednou složkou je C-O trpaslík, tedy finální stádium hvězd, jež svůj vývoj započaly jako hvězdy s hmotností našeho Slunce. Tato hmotnost je dostatečná k tomu, aby došlo k zažehnutí heliových reakcí, spalujících helium na uhlík a kyslík, ale nestačí na to, aby reakce pokračovaly k těžším prvkům. Druhou složkou dvojhvězdy je zpravidla červený obr, který díky svým rozměrům zcela vyplnil tzv. Rocheův lalok, oblast ohraničenou ekvipotenciální plochou, jež se v jednom bodě dotýká Rocheova laloku bílého trpaslíka. Přes tento bod dochází k přenosu látky (vodíku a helia) z obra na trpaslíka. Díky rotaci soustavy nepadá hmota na trpaslíka přímo, ale je momentem hybnosti

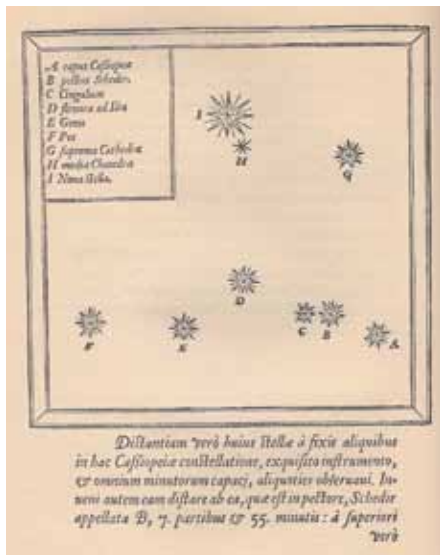
Supernova typu II – velmi hmotná, hroutící se hvězda po období termonukleární syntézy, pozůstatkem je neutronová hvězda nebo černá díra, zbytek se rozmetá do okolí. Supernovy typu II mají ve spektru přítomné vodíkové čáry. Tyto supernovy dále dělíme podle dosvitu na dvě skupiny II L s lineárním poklesem jasnosti a II P, u kterých má dosvit platit s malým poklesem jasnosti. Typickým příkladem typu II P je velmi známá supernova SN 1987A ve Velkém Magellanově oblaku ve vzdálenosti 167×10^3 světelných roků.

Princip exploze supernovy typu Ia. Zdroj: NASA/Chandra.



Rocheův lalok – prostorové ohraničení ekvipotenciální plochy systému dvou těles, například hvězd. Tato plocha se stejnou potenciální energií má tvar osmičky složené ze dvou kapkovitých útvarů – Rocheových laloků. Pokud hvězda zcela vyplní prostor svého Rocheova laloku, dojde k přetoku látky na druhou složku. V případě planety a měsíce dojde při průchodu měsíce Rocheovou plochou k nestabilní situaci, kdy měsíc začne padat na planetu a bude roztrhán slapovými silami.

Stránka ze spisu Tychona Brahe „De nova stella“ z roku 1573 ukazuje polohu exploze supernovy, vzplanuvší v roce 1572 (supernova označena písmenem I, další hvězdy náleží do souhvězdí Kasiopeji).



stáčena do akrečního disku, ze kterého se teprve usazuje na povrchu trpasličí hvězdy. Poznamenejme, že tento proces nemusí být plynulý. Při nahromadění dostatečného množství látky kroužící v akrečním disku dojde k rozvoji turbulence, která hmotu zbrzdí, a teprve poté dojde k jejímu pádu na trpaslíka. Náhlá akrece většího množství hmoty z disku je doprovázena náhlým uvolněním gravitační potenciální energie, což se projeví krátkodobým zjasněním, označovaným jako vzplanutí trpasličí novy.

Při vhodné rychlosti akrece může časem dojít k dosažení mezní hmotnosti bílého trpaslíka, Chandrasekharovy meze, po níž následuje kontrakce doprovázená zažehnutím termonukleárních reakcí, jež hvězdu rozmetají. Právě fakt, že hvězda vybuchuje vždy při překročení dané hmotnosti, činí ze supernov typu Ia neocenitelné standardní svíčky, pomocí nichž můžeme určit vzdálenost mateřské galaxie této supernovy. Detailní studium procesů, které jejich výbuch provázejí, je tedy důležité nejen pro astronomy zabývající se závěrečnými stadii hvězdného vývoje, ale i pro kosmology.

Zmínili jsme, že pro překročení Chandrasekharovy hmotnosti bílého trpaslíka je nutná vhodná rychlost akrece hmoty. Pokud je totiž tato hmotnost příliš malá, dojde časem k explozivnímu vznícení vrstvy vodíku, ukládajícího se na povrchu degenerovaného uhlíko-kyslíkového jádra. Tento děj označujeme jako vzplanutí klasické novy a může k němu docházet opakovaně (pak hovoříme o rekurentních novách).

Pokud by byla naopak rychlost akrece příliš velká, vytvořila by se ještě před vlastním zážehem C-O reakcí vodíková atmosféra hvězdy, jejíž přítomnost by se musela nutně projevit ve spektru, což však nepozorujeme. Rychlost akrece proto musí být „tak akorát“. Modely ukazují, že vhodná rychlost akrece je v případě dvojice červený obr – bílý trpaslík přibližně $10^{-7} M_{\odot}$ za rok.

Důležitým rozdílem mezi supernovami Ia a supernovami ostatních typů je fakt, že supernovy Ia jsou při vzplanutí výbuchem zcela dezintegrovány, zatímco pozůstatkem supernov typu II, Ib a Ic je neutronová hvězda (ev. černá díra). Z numerických simulací se ukazuje, že při výbuchu supernov Ia hrají důležitou roli turbulentní jevy. Alternativním scénářem exploze supernovy Ia je také spojení dvou bílých trpaslíků, tj. akrece C-O plynu přetékajícího z jednoho bílého trpaslíka na druhého. Základním předpokladem tohoto scénáře je dostatečně pomalá akrece látky.

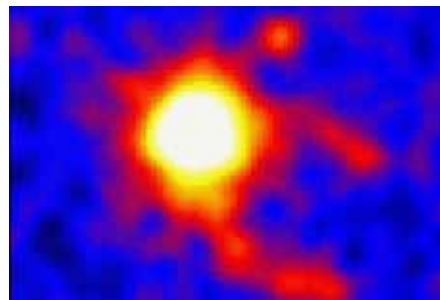
Zbytky po supernovách

Výbuch supernovy je dramatickou událostí, která významně poznamená své okolí do vzdálenosti mnoha stovek světelných roků. Rázová vlna, vznikající šířením vyvrženého materiálu rychlostmi až tisíckrát většími, než je rychlost zvuku v daném prostředí, ohřívá mezihvězdný plyn a prach na teploty řádu 10^5 až 10^6 K. Díky těmto vysokým teplotám je zbytek po supernově dobře pozorovatelný nejprve v rentgenovém oboru spektra, posléze i v optickém oboru (díky rekombinaci ionizovaných atomů) jako obálka o tloušťce několika málo světelných roků a typické hustotě 10 atomů/cm³ (běžná hustota horké mezihvězdné hmoty je přibližně o dva řády nižší). Tvar rozpínající se obálky je zpočátku zpravidla kulový, následně však může být deformován dalšími vlivy, mezi něž patří zejména přítomnost a povaha makroskopických magnetických polí, z nich plynoucí přítomnost sekundárních rázových vln a také přítomnost či absence neutronové hvězdy (pulzaru), respektive hvězdného větru z ní vanoucího.

Slavné supernovy

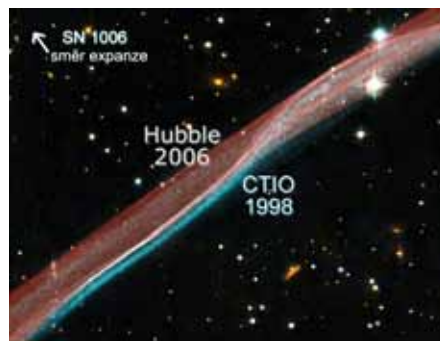
Geminga (zkratka z *Gemini Gamma-ray source*) byla objevena roku 1972 družicí SAS-2 jako intenzivní zdroj záření gama. Jeho optický protějšek se však dlouho nedařilo nalézt, což je mj. zakódováno v názvu – „geminga“ totiž v milánském dialektu znamená něco jako „houby s octem“, tj. „zde nic není“. Teprve roku 1984 se pomocí dalekohledu CFHT na Havajských ostrovech o průměru 3,5 metru podařilo tento zdroj nalézt jako extrémně slabou hvězdu 25. magnitudy. Fyzikální povahu objektu odhalila až družice ROSAT, která v roce 1992 prokázala existenci pulzů rentgenového záření o periodě cca 0,3 s. Jedná se tedy o pulzar, neutronovou hvězdu, která je pozůstatkem výbuchu supernovy typu II. Analýzy změn pulzů a radiální rychlosti hvězdy pomohly určit, že k výbuchu došlo před přibližně 340 000 lety, a to ve vzdálenosti méně než 100 světelných roků od Země.

SN 1006 je patrně nejjasnější pozorovaná supernova, která vybuchla pravděpodobně v noci z 30. dubna na 1. května 1006 v souhvězdí Vlka. Její jasnost přesáhla -7 mag. Záznamy o ní pořídili evropští, arabsí i čínští pozorovatelé, podle některých interpretací je tato událost zaznamenána i na indiánském petroglyfu, nalezeném v Hohokamu (Kalifornie, USA). Pozůstatek po supernově se podařilo nalézt v roce 1965, kdy byl ztotožněn s radiovým zdrojem v blízkosti hvězdy β Lupi.



Neutronová hvězda Geminga vyfotografována přístrojem EPIC na palubě rentgenové družice XMM-Newton. Dva výrazné výběžky jsou tvořeny nabitými částicemi, které jsou vyvrhovány silným magnetickým polem hvězdy. Jejich hybnost se následně vyrovnává s prostředím, kterým hvězda prolétává, čímž odhalují i směr jejího putování. Zdroj: ESA.

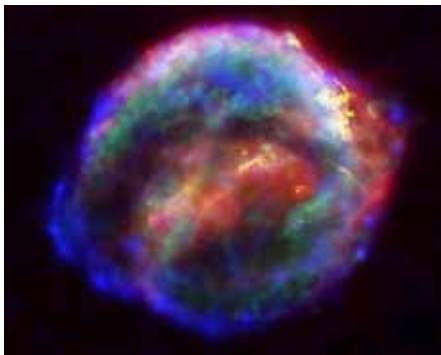
Rozpínající se obálka po výbuchu supernovy SN 1006. Modře je vyznačena v roce 1998, červeně o 8 let později. Zdroj: ESA/STScI.





Pozůstatek po SN 1054 (Krabí mlhovina). Na fotografii jsou patrné projevy Rayleighovy-Taylorovy nestability v expandující obálce. Zdroj: ESO/SLT.

Zbytek po Keplerově supernově, která vzplála roku 1604. Snímek vznikl kompozicí záznamů observatoří Chandra (pásma 0,2 až 0,3 nm a 0,9 až 4 nm), HST (optický obor) a Spitzer (infračervený obor). Krátkovlnné rentgenové záření pochází z oblastí, kterými prochází rázová vlna (modře), měkkí rentgenové záření (zeleně) ukazuje pozůstatky po explodující hvězdě. Optický obor (žlutě) odhaluje oblasti, kde se rázová vlna setkala s mezihvězdnou látkou a ohřála ji na teplotu 10 000 K. V infračerveném pásmu (červeně) jsou patrné částice prachu, ohřáté a unášené rázovou vlnou. Zdroj: ESA/NASA.



Rozpínající se obálka leží ve vzdálenosti přes 7 000 světelných roků od Země a má úhlový průměr 0,5°. Z toho vyplývá, že její skutečný průměr činí úctyhodných 60 světelných roků. Progenitora supernovy se doposud nepodařilo nalézt, proto předpokládáme, že se jednalo o supernovu typu Ia.

SN 1054 byla na obloze pozorována 4. července 1054, o jejím pozorování byly učiněny mnohé záznamy, především čínské a japonské, ale také korejské, arabské, evropské a severoamerické. Pozůstatek po supernově objevil jako první anglický lékař a astronom John Bevis roku 1731. Roku 1758 jej francouzský astronom Charles Messier mylně považoval za Halleyovu kometu. Když poznal svůj omyl, začal sestavovat katalog objektů, které vypadají v malém dalekohledu jako mlhavé obláčky. Právě pozůstatek po supernově z roku 1054 nese v Messierově katalogu označení M1. Krabí mlhovina, jak tento objekt nazýváme, leží ve vzdálenosti 6 500 světelných roků. V jejím centru se nachází neutronová hvězda, kterou v roce 1942 objevil Rudolf Minkowski. Tato hvězda se v roce 1968 ukázala být pulzarem, jednalo se o první pulzar, který byl ztotožněn se zbytkem po supernově.

SN 1572 (Tychova supernova) vzplála dne 11. listopadu 1572, kdy ji spatřil Tycho Brahe jako jasnou hvězdu v souhvězdí Kasiopeji, která zde předtím nebyla pozorována. Svoji jasností předčila planetu Venuši a na denní obloze byla pozorována po dobu dvou týdnů. Z oblohy zcela zmizela v březnu 1574, 16 měsíců po svém výbuchu. Zrod této „nové hvězdy“ definitivně pohřbil téměř dva tisíce let staré aristotelovské paradigma o neměnnosti nebeské sféry a jeho studium přispělo k vybudování základů, na nichž stojí moderní astrofyzika. V roce 2008 se týmům astronomů z Institutu Maxe Placka a Subaru Telescope (8,2 m) podařilo získat spektrum světelné ozvěny Tychovy supernovy, která se odrazila od oblaku mezihvězdné hmoty tak, že světlo záblesku k nám na Zemi doletělo se zpožděním 436 let. Jedná se zatím o (časově) nejvzdálenější supernovu, jejíž světelné echo bylo pozorováno. Rozbor spektra prokázal nepřítomnost čar vodíku a přítomnost čar křemíku, což ukazuje na skutečnost, že Tycho Brahe pozoroval supernovu typu Ia.

SN 1604 (Keplerova supernova) byla poprvé pozorovaná 9. října 1604 v severní Itálii. Od 17. října 1604 ji sledoval z Prahy Johannes Kepler. Pozůstatek po supernově leží ve vzdálenosti 20 000 světelných roků. Podobně jako Tycho Brahe, i Kepler zřejmě pozoroval supernovu

typu Ia. Za zmínku stojí fakt, že se jednalo o poslední supernovu, která byla v naší Galaxii do dnešního dne pozorována! Zatímco v první polovině druhého tisíciletí byla supernova na obloze pozorována v průměru každých sto let, od dob Keplera se žádná další na obloze neobjevila.

Cassiopea A je nejjasnější rádiový zdroj na noční obloze. Jedná se o zbytek po supernově ležící ve vzdálenosti přibližně 11 000 světelných roků od Země. Vybuchla patrně někdy před 300 lety, nemáme však spolehlivá svědectví o tom, že byla pozorována. Možnou příčinou je oblak mezihvězdné hmoty, který utlumil její svit v optickém oboru. Rozborem spektra světelné ozvěny se podařilo určit, že se jednalo o supernovu typu II. Pozůstatek po supernově dnes pozorujeme ve tvaru rozpínající se obálky o průměru 10 světelných roků, která září zejména v rádiovém a rentgenovém oboru. V jejím středu se nachází neutronová hvězda.

SN 1987a je nejznámější novodobá supernova. Byla objevena 24. února 1987. Vybuchla ve Velkém Magellanově oblaku ve vzdálenosti 168 000 světelných roků. Proslavilo ji celkem 24 neutrin (!), která zachytily detektory Kamiokande, IMB a Baksan. Ačkoli se dle všech indicií jednalo o supernovu typu II, u níž se s největší pravděpodobností podařilo zpětně dohledat i progenitora, modrého veleobra označovaného jako Sanduleak $-69^{\circ} 202$, žádnou neutronovou hvězdu jsme v jejích pozůstatcích dosud nenalezli. Teorií, popisujících důvody, proč neutronová hvězda uniká našemu pátrání, je několik, žádná však není dostatečně uspokojivá.

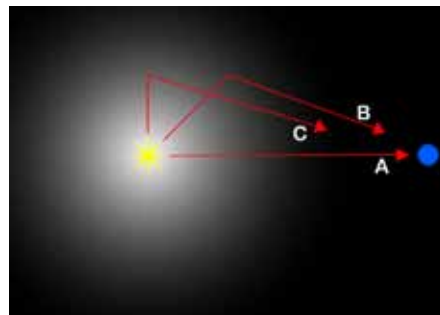
Mýty a fakta o nebezpečí supernov

Výbuch supernovy rozzáří oblohu tak, že nebude rozdíl mezi dnem a nocí. Toto tvrzení je mýtus. Předpokládejme, že supernova vybuchne na noční obloze. Absolutní magnituda supernov v okamžiku vzplanutí dosahuje hodnoty cca -19 mag, což znamená, že supernova ve vzdálenosti cca 32 světelných roků od Země bude více než $300\times$ jasnější než Měsíc v úplňku, zatímco Slunce by v téže vzdálenosti zářilo jen o něco více než nejslabší hvězdy pozorovatelné na obloze pouhým okem. Jak blízko by ale supernova musela být, aby byla jasnější než Slunce ve skutečné vzdálenosti? To lze snadno vypočítat: vyjde vzdálenost kratší než světelný rok, tedy blíže než vzdálenost vnějších oblastí sluneční soustavy. Pravděpodobnost, že se nějaká hvězda dostane tak blízko ke Slunci, je v následujících sto milionech let prakticky nulová.



Cassiopea A, nejjasnější zbytek po supernově (v rádiovém oboru). Snímek je kombinací vizuálního (HST), infračerveného (SST) a rentgenového (Chandra) oboru. Zdroj: NASA/ESA.

Princip světelné ozvěny umožnil pozorovat spektrum supernovy, která vybuchla v souhvězdí Kasiopeji někdy kolem roku 1680. Zatímco přímočarému šíření záblesku (paprsek A) překáží oblak mezihvězdné hmoty, ležící mezi supernovou a Zemí, paprsky odražené od mezihvězdné hmoty (B, C) umožňují se zpožděním pozorovat. Zdroj: Wikipedia.



Bílý trpaslík – jedna z možných závěrečných fází vývoje hvězd. Hvězda, ve které degenerovaný elektronový plyn vyvíjí gradient tlaku (způsobený Pauliho vylučovacím principem), který odolává gravitaci. Poloměr je 1 000 km až 30 000 km, hustota řádově 10^3 kg/cm^3 , maximální hmotnost $1,4 M_S$. Hmotnější bílí trpaslíci jsou nestabilní, explodují jako supernovy typu Ia.

Blízká supernova nás při svém výbuchu ozáří smrtelnou dávkou záření. Toto tvrzení je částečně pravdivé. Při výbuchu známé supernovy SN 1987 A byl celkový tok energie v rentgenovém oboru odhadnut na $10^{-12} \text{ J/m}^2\text{s}$, přitom tok rentgenového záření uvolněného při velké sluneční erupci dosahuje hodnoty asi třicetisíckrát větší. Aby byl registrován na Zemi stejný tok rentgenového záření, jako je ten uvolněný při sluneční erupci, musela by se supernova nacházet ve vzdálenosti asi šest světelných roků. Ovšem mnohem mohutnější supernova, jež vybuchla v roce 1993 v galaxii M81, by stejný tok poskytovala již ze vzdálenosti $10\times$ větší, tedy 60 světelných roků, a supernova 2001em dokonce ze vzdálenosti 150 světelných roků. Zatímco sluneční erupce je děj krátkodobý, rentgenové záření supernovy může trvat i několik let. Je toto záření pro člověka nebezpečné? Smrtelná dávka záření je přibližně 6 Sv, což odpovídá množství rentgenového záření o energii 420 J, absorbovaného tělem člověka o hmotnosti 70 kg. Výkon supernovy v rentgenovém oboru dosahuje v maximu řádu 10^{35} W , což znamená, že vybuchla-li by taková supernova ve vzdálenosti 10 světelných roků, obdrží člověk smrtelnou dávku záření během 10 s, ze vzdálenosti 30 světelných roků za více než minutu a ze vzdálenosti 100 světelných roků za 15 minut. Tyto drastické hodnoty by však platily pro osobu nechráněnou stíněním zemské atmosféry, která je naštěstí

v rentgenovém a gama oboru prakticky nepropustná. Živočichům na zemském povrchu tedy žádné nebezpečí z ozáření nehrozí. Jinak by na tom byly ale posádky orbitálních stanic. Kdyby vybuchl dosud nejbližší známý předchůdce supernovy, hvězda IK Pegasi (150 ly), museli by se kosmonauté z oběžné dráhy během několika minut evakuovat, smrtelnou dávku záření by patrně obdrželi do 30 minut.

Výbuch supernovy zničí ozonovou vrstvu. Toto tvrzení může být pravdivé. Kosmické záření, tedy proud vysoce energetických nabitých částic, vyvržených při

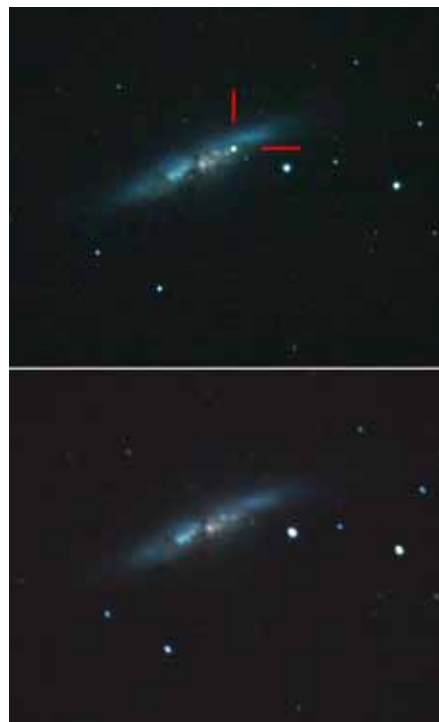


výbuchu supernovy, bude při dosažení zemské atmosféry způsobovat disociaci molekul dusíku. Vznikají tak vysoce reaktivní atomy dusíku, reagující s kyslíkem za vzniku oxidů, jež katalyticky rozkládají ozon. Výpočty ukazují, že supernova vzplanuvší ve vzdálenosti pod 30 světelných roků by byla sto zlikvidovat kosmickým zářením přibližně polovinu ozónové vrstvy. Dávka krátkovlnného záření, dopadajícího na povrch Země, by se tak zdvojnásobila, což by patrně, zejména pro vyšší organizmy, znamenalo závažný problém. Vzhledem k tomu, že kosmické záření se pohybuje pomaleji než světlo, ochránila by nás ozonoféra před nejničivějším gama zářením, které supernova vyzařuje přibližně dva roky. Nejnovější modely ozonosféry ukazují, že tato vrstva má samoobnovovací schopnost a ze svého poškození intenzivním kosmickým zářením je schopna zregenerovat v době přibližně za jeden až dva roky. Uvážíme-li, že supernova je intenzivním zdrojem kosmického záření po dobu několika desítek let, měla by přítomnost supernovy bližší než 25 až 30 světelných roků pro život na Zemi patrně fatální následky. Pravděpodobnost takové události odhadují astronomové na 1 supernovu za miliardu let.

Závěr

Co říci závěrem? Supernovy jsou nepochybně fascinujícími ději, které stojí zato zkoumat. Jsou svědectvím o obrovských množstvích energie ukrytých ve hmotě a ukazují nám křehkost života na Zemi i vzdálených planetách. Přesto si přeje, abychom takovou (dostatečně vzdálenou) supernovu mohli na vlastní oči spatřit. Vždyť na to čekáme již 400 let.

■ **Jakub Rozehnal, 16. 3. 2012, AB 11/2012, aktualizováno**



Snímek supernovy, která vzplanula v galaxii M82 v souhvězdí Velké medvědice dne 23. ledna 2014. Na dolním snímku je fotografie téže galaxie ze dne 5. ledna 2014, tedy před explozí. Zdroj: Emmanuel Marchal.