

Explozivní děje ve vesmíru

VLADIMÍR ŠTEFL – JULIUSZ DOMANSKI

Přírodovědecká fakulta MU, Brno – Toruň

Cílem článku je seznámit studenty středních škol s problematikou explozivních dějů probíhajících na kosmických tělesech různých typů. Co rozumíme explozí? Chápeme ji jako rychlou změnu fyzikálního stavu kosmického tělesa doprovázenou přeměnou energie a jejím uvolňováním do okolního prostoru. Exploze jsou vyvolány různými příčinami a jsou rozdílné svými vnějšími projevy a velikostí při nich uvolňované energie. Zpravidla jejich společným znakem je vyvrhování hmoty, jakož i produkce záření, které způsobuje přeměnou části uvolněné energie na kinetickou, resp. tepelnou energii. Výrony hmoty dosahují rychlostí od řádově $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ až do několika desítek tisíc $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$; typické velikosti uvolňovaných energií jsou zachyceny v tabulce v dalším odstavci.

Vzhledem k různorodosti astrofyzikálních podmínek je obtížné vytvořit přesné číselné představy o zářivých výkonech kosmických těles a velikostech energie uvolňované při explozivních procesech. Budeme se proto opírat o zjednodušující kvalitativní úvahy, které však vystihují astrofyzikální podstatu jevů a umožňují provést alespoň číselné odhady veličin. Přitom vycházíme z fyzikálních znalostí studentů středních škol.

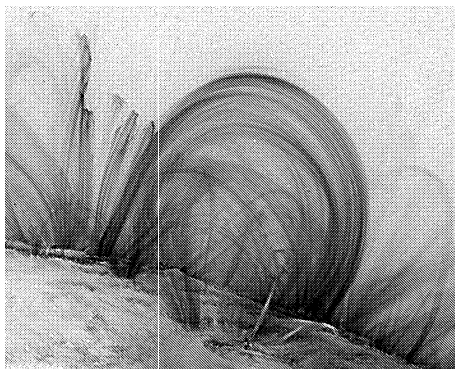
Které procesy charakterizují explozi? V astrofyzikálních jevech je podstatná část uvolňované energie při explozi předávána částicím – elektronům, protonům, resp. dalším částicím. Z detekované hustoty zářivého toku při znalosti vzdálenosti můžeme stanovit celkové množství uvolňované energie. Pro porovnání uvádíme některé číselné hodnoty velikostí energií z explozivních jevů na Zemi a ve vesmíru:

atomová bomba nad Hirošimou	10^{14} J
exploze sopky	10^{17} J
velká erupce na Slunci	10^{25} J
exploze novy	10^{39} J
exploze supernovy	10^{46} J
exploze v M 82	10^{50} J

Postupně uvedeme jednotlivé explozivní jevy probíhající na hvězdách. Nejbližší hvězdou je naše Slunce.

Slunce

Sluneční *erupce* probíhající v chromosféře, resp. koróně, jsou vyvolány urychlováním pohybu nabitých elektronů, protonů a těžších iontů magnetickými poli. Trvají řádově několik minut, vznikají zpravidla v blízkosti slunečních skvrn. Při přibližné hmotnosti vyvržené hmoty 10^{13} kg a její rychlosti až $1,5 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}$ je kinetická energie uvolněná při erupci přibližně 10^{25} J. Část energie je transformována na zmiňované urychlení elementárních částic, další část na rentgenové a ultrafialové záření. Erupce (obr. 1) vyvolávají vznik rázových vln, šířících se jak vzhůru do koróny, tak dolů do fotosféry či horizontálně podél povrchových vrstev sluneční atmosféry.



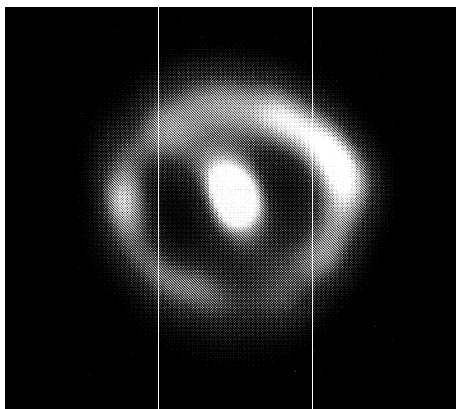
Obr. 1

Poznámka: Sluneční erupce výrazně ovlivňují horní vrstvy zemské atmosféry, vedou ke komplexu jevů v celé atmosféře. Např. jedna z největších

erupcí 4. 11. 2003 vedla k narušení sítě vysokého napětí i rádiového spojení na Zemi.

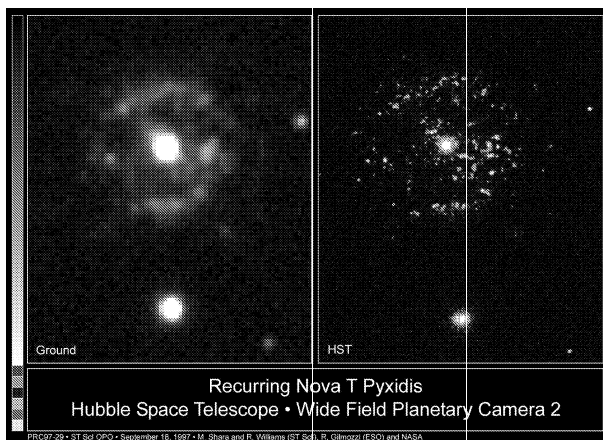
Novy

Explozivní procesy probíhají ve hvězdách zejména v závěrečných stadiích vývoje. Podle původního Kraftova výkladu [1] z 60. let minulého století jsou exploze nov (na obr. 2 nova V 1494 Aql) výsledkem termonukleárního hoření atmosférické obálky na povrchu bílého trpaslíka, která na něj byla přenesena ze sousední složky, hvězdy bohaté na vodík. Ten reaguje s jádry helia, uhlíku, dusíku, kyslíku a s volnými elektrony při teplotě $T \approx 20 \cdot 10^6$ K. Při hoření teplota stále narůstá, protože degenerovaný elektronový plyn nezvětšuje objem s nárůstem teploty. Po dosažení teploty $T \approx 10^8$ K uvolňování energie na několik minut získává explozivní charakter. Plyn přestává být degenerovaným, stává se znovu ideálním. Při jeho zahřívání narůstá teplota a v souladu se stavovou rovnicí i tlak. Je narušena hydrostatická rovnováha mezi vnějšími obálkami hvězdy a vrstvou s probíhající explozí. Vnější obálka se expanzivně rozšiřuje rychlostí přibližně 10^2 až 10^3 km·s⁻¹, narůstá vyzařovací povrch hvězdy a zvyšuje se její zářivý výkon. Pozorujeme nárůst jasnosti hvězdy o 4 až 5 mag, hovoříme o *novách*. Nejde tudíž o nové hvězdy, ale hvězdy staré, kterým vedlejší složka dodala nové termonukleární palivo – vodík.



Obr. 2

Hmotnost vodíku vstupujícího do reakce je zhruba $\Delta m = 10^{24}$ kg, účinnost při explozivním spalování dosahuje přibližně 1 %. Uvolněnou energii při explozi novy vyjádříme $\Delta E = 0,01\Delta mc^2 \approx 10^{39}$ J. Tvoří pouze malou část celkové energie hvězdy, nevede proto k podstatným změnám její vnitřní stavby. Gravitační potenciální energií bílého trpaslíka o hmotnosti $0,6 M_S$ a poloměru $2 \cdot 10^{-2} R_S$ je $E_p = -\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} = -10^{43}$ J. V absolutní hodnotě výrazně převyšuje energii uvolňovanou při explozi, proto bílý trpaslík zůstává kompaktní a přenos hmoty se může vícekrát opakovat, jde o rekurentní novy (obr. 3), podrobněji např. [2].



Obr. 3

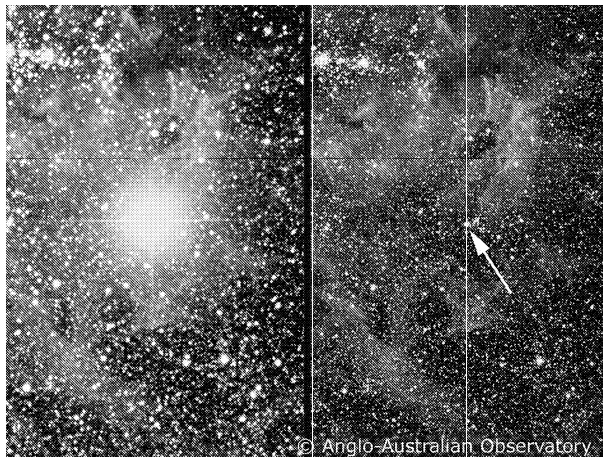
Supernova SN 1987 A

Řádově mnohem větší uvolněná energie doprovází exploze *supernov*, viz např. SN 1987 A na obr. 4. Velikost gravitační potenciální energie uvolněné výbuchem supernovy, omezíme se na supernovy II typu, určíme teoreticky z rozdílu energií

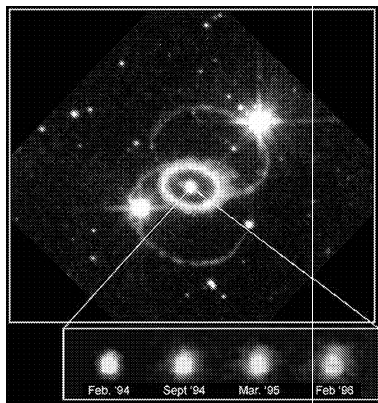
$$E_{\text{sup}} = E_{\text{nh}} - E_{\text{poč}} = \frac{3GM^2}{5R_{\text{nh}}}.$$

Při dosazení $M = 1,4M_S = 2,8 \cdot 10^{30}$ kg, $R_{\text{nh}} = 10^4$ m, obdržíme $E_{\text{sup}} = 10^{46}$ J. Uvolněná energie se přeměňuje především na *kinetickou energii* *neutrín* a expandující obálky, dále na záření a na formování neutronové

hvězdy. Převážnou část, asi 95 % energie, odnáší neutrino. Rychlost expanze vnějších vrstev dosahuje $(10^3 - 10^4) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.



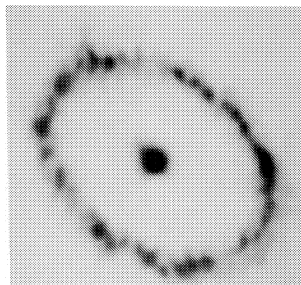
Obr. 4



Obr. 5

Od roku 1987 pozorujeme u zmiňované supernovy SN 1987 A rozpínání její obálky (obr. 5). Snímky získané v polovině devadesátých roků pomocí HST umožnily upřesnit souvislost vzdálenosti, úhlové velikosti a poloměru

expandující obálky (obr. 6), což můžeme využít ke konstrukci následující úlohy, zpracované podle [3] úloha 1. Supernova SN 1987 A explodovala ve vzdálenosti $51,4 \text{ kpc} = 1,6 \cdot 10^{21} \text{ m}$. Určete poloměr prstence R , jehož úhlovou velikost α_R stanovíme z přiloženého obr. 7, ve kterém úhlová velikost strany a činí $\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$. Změřením poloměru na snímku $R = 0,6 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$, tedy $R = \alpha_R r = 6 \cdot 10^{15} \text{ m}$.



Obr. 6

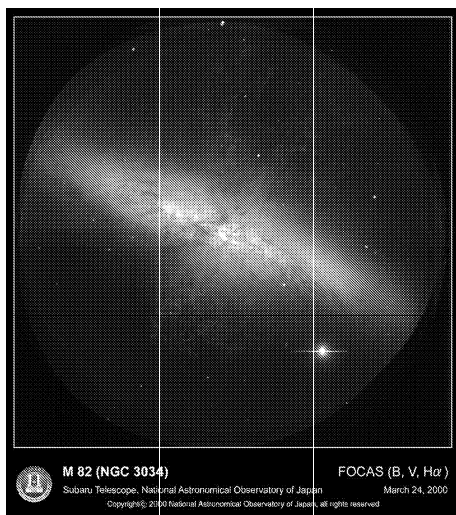
Obr. 7

Galaxie M 82

Značné množství energie je uvolňováno při explozivních procesech probíhajících v mimogalaktických objektech například v *aktivních galaxiích*, kvasarech či zábleskových zdrojích a záření. Přibližně do poloviny 20. století astrofyzici předpokládali, že základním zdrojem záření v galaxiích jsou hvězdy. Následně však byly objeveny galaxie, jejichž aktivita byla spjata s intenzivním uvolňováním energie z relativně nevelkých oblastí menších než 1 pc v jádrech galaxií. Jaké jsou znaky takové aktivity?

Vyznačují se netepelným zářením od rádiové až po oblast γ elektromagnetického spektra, zdrojem je zejména synchrotronové záření. Dále pozorujeme změny jasnosti objektů od řádově minut (v rtg. oblasti), až po desítky roků v optické a rádiové oblasti elektromagnetického spektra. Charakteristické jsou široké emisní čáry ve spektru, dokládajících pohyb horkého plynu velkými rychlostmi, jakož i morfologické zvláštnosti (výrony, horké skvrny). Neobyčejný vzhled je často důsledkem aktivity jádra, z kterého jsou vyvrhována velká množství hmoty.

Demonstrativně zajímavým příkladem je aktivní galaxie M 82, jedna z nejjasnějších galaxií v infračerveném oboru spektra, nacházející se ve vzdálenosti 3,6 Mpc. Jde o nepravidelnou galaxii o hmotnosti $\sim 10^{10} M_{\odot}$, s velikostí zhruba 3krát menší, než je naše Galaxie. Z jádra M 82 probíhá výrazná a pozorovatelná expanze vodíku (obr. 8). V roce 1962 *Sandage* pořídil na observatoři Mount Palomar snímek galaxie ve světla čáry H_{α} a *Lynds* z Yerkeské observatoře použil spektrograf k získání jejího spektra. Nastavil šterbinu spektrografu podél osy vláken a ve spektru získal široké jasné emisní čáry vodíku, jakož i kyslíku, dusíku a síry. Čáry byly posunuty na obě strany, jak k fialovému tak k červenému konci spektra. Rychlost rozpínání vláknité struktury plynu stanovil na $\approx 1\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, což 7krát převyšovalo únikovou rychlost v daném místě v galaxii M 82.



Obr. 8

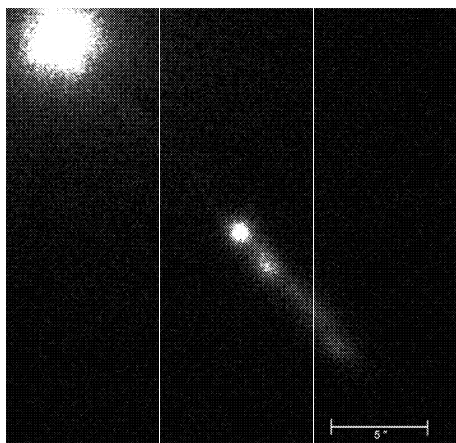
Lynds a *Sandage* v [4] provedli výpočty uvolňované energie při explozi, za předpokladu uvedené vzdálenosti 3,6 Mpc galaxie M 82 stanovili hodnotu toku záření v čáře $H_{\alpha} 2 \cdot 10^{33}\text{ W}$. Přijmeme-li hustotu protonů 10^7 v m^3 , dostáváme odhad expandující části vodíkového plynu na $6 \cdot 10^6 M_{\odot}$. Odtud byla určena horní hranice kinetické energie na $\sim 10^{49}\text{ J}$. Značná část energie se transformuje na vznik synchrotronového záření, které je detekováno v rádiovém oboru. Celkové množství uvolněné energie se odhaduje

na 10^{50} J. Porovnání, exploze v M 82 je z hlediska energie ekvivalentní explozi 10 tisíců supernov.

Kvasar 3C 273

Kvasary, zřejmě jádra nově vznikajících galaxií, se vyznačují proměnným tokem záření ve spojitém spektru, výrazným ultrafialovým a rtg zářením. Spektroskopická měření u nich zjistila velké rudé posuvy až $z \approx 6,4$ a široké emisní čáry, svědčící o značných rychlostech pohybu hmoty v nich.

Nejjasnějším a jedním z nejprozkoumanějších kvasarů na obloze je 3C 273. Vyznačuje se v rtg, optickém i rádiovém oboru jetem – výtryskem, jehož úhlová velikost dosahuje 23 arcsec, což při $z = 0,158$ a $H = 73 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ dává při vzdálenosti $r = 690 \text{ Mpc} = 2,1 \cdot 10^{25} \text{ m}$ skutečnou délku $l = r \sin 23'' = 2,1 \cdot 10^{21} \text{ m} = 81 \text{ kpc}$ [5]. Při rychlosti expanze jetu $\approx 0,7c$ je jeho stáří $t = \frac{r \sin 23''}{0,7c} \approx 10^{13} \text{ s} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ r}$.



Obr. 9

Expanzní energie jetu je uvolňována z černé díry v jádře kvasaru, následně přeměrována a kolimována do jetu, jehož expanze je poháněna souvislým rtg tokem z jádra (obr. 9). Celkový zářivý výkon kvasaru je odhadován $L \approx 10^{40} \text{ W}$. Předpokládejme, že k uvolňování energie dochází při akreci hmoty na černou díru. Můžeme určit množství hmoty dopadající na černou díru, tak aby pokrývalo uvedený zářivý výkon kvasaru

3C 273 jestliže předpokládáme účinnost $\eta = 0,1$. Platí $L = \eta c^2 \frac{dM}{dt} \rightarrow \rightarrow 10^{24} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \approx 15 M_{\text{S}} \cdot \text{r}^{-1}$.

Poznámka: Faktor 0,1 obdržíme při výpočtu velikostí gravitační potenciální energie hmoty přenesené z velké vzdálenosti na dráhu $3 R_{\text{g}}$, kde $R_{\text{g}} = \frac{2GM}{c^2}$ je tzv. Schwarzschildův poloměr.

V článku byly popsány explozivní procesy v klíčových etapách vývoje hvězd, galaxií respektive kvasarů. Díky rychlému zdokonalování metod astrofyzikálních pozorování lze získávat o těchto jevech informace z celého rozsahu elektromagnetického spektra. Zmiňované objekty se tak stávají kosmickými laboratořemi značných měřítek s dosud v pozemských podmínkách obtížně získávanými energiemi částic. Právě relativistické částice, nejčastěji elektrony pohybujících se v magnetických polích umožňují vznik synchrotronového záření. Elektrony ionizují plyn a předávají mu svoji energii a následně vyvolávají další jevy. Jejich podrobnější výklad najde čtenář – zájemce např. v [6].

Astrofyzikální výzkum explozivních procesů je teprve v počátcích, interpretace probíhajících jevů se opírá o hypotézy a teorie. Jde však o jeden z nejdůležitějších směrů současné astrofyziky, který má objasnit fyzikální mechanismy uvolňování vysokých energií.

Číselná znalost hodnot uvolněných energií umožňuje zkoumat možné zdroje, resp. příčiny exploze. Vzhledem k analogickým astrofyzikálním příčinám jejich vzniku jsou hodnoty velikostí jimi uvolněných energií při některých explozivních procesech přibližně konstantní. Proto jsou například novy a supernovy využívány jako standardní svíčky – indikátory vzdáleností ve vesmíru.

L i t e r a t u r a

- [1] *Kraft, R. P.*: Are all Novae Binary Stars? ASPL 418 (1964), 137.
- [2] *Contini, M., Prialnik, D.*: The shell of recurrent Nova T Pyxidis: A model based on shocks. ApJ 475, (1997), 803.
- [3] www.astroex.org/english/index.php
- [4] *Lynds, C. R., Sandage, A. R.*: Evidence for an Explosion in the Center of the Galaxy 82. ApJ 137, (1963), 1005.
- [5] *Courvoisier, T. J. L.*: The bright quasar 3C 273. The Astron. Astrophys. Rev. 9 (1998), 1.
- [6] *Gorbackij, V. G.*: Kosmičeskije vzryvy. Nauka, Moskva 1979.