

Černé díry II

Petr Kulhánek

Černé díry byly po mnoho desetiletí tajemnými objekty. Staly se vděčným námětem sci-fi literatury. Pocit tajemna a podivných jevů, které jsou nad naše chápání, je doprovázel na každém kroku... Tak těmito slovy začínal minulý díl našeho vyprávění o černých děrách. Seznámili jsme se s jejich vlastnostmi z nichž pro dnešní díl jen stručně připomeňme základní pojmy.

Stlačíme-li objekt pod *Schwarzschildův poloměr*, stane se objekt černou dírou, ze které neunikne ani světlo. Většina objektů ve Vesmíru rotuje. Rotujícím černým děrám říkáme Kerrovy černé díry. Kolem nich se vytváří mimořádně zajímavá oblast, kterou nazýváme *ergosféra*. Částice, která vletne do ergosféry, ji může opustit s vyšší energií. Tak odčerpává rotační energii černé díry. Rotující černá díra je zpravidla doprovázena tlustým akrečním diskem, jehož látka postupně padá do černé díry, je silně zahřála a září v rentgenovém oboru. V rotační ose se objevují *výtrysky* vysoce urychlených částic, které září v různých oborech spektra. Na koncích výtrysků by měly být patrné radiové brzděné skvrny.

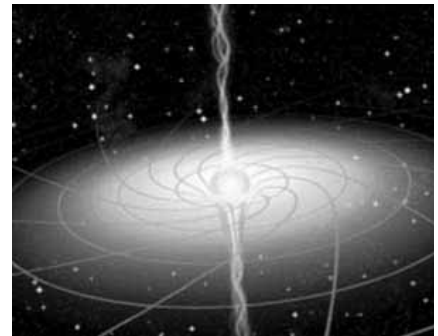
Je to vše šilena fantazie, hra čísel a teorií, nebo existují v přírodě procesy, které vedou ke vzniku těchto objektů?

Závěrečné fáze vývoje hvězd

Nejdelší období svého života hvězdy prožijí tak, že v centru uvolňují energii termojaderným slučováním vodíku na helium. Těmto hvězdám říkáme hvězdy *hlavní posloupnosti* (podle nejvíce zastoupené oblasti v tzv. Hertzsprung-Russelově diagramu). Po tomto období se ve hvězdách ustanoví nová rovnováha. Hvězdy se stávají obry a v nitru se postupně slučuje helium na těžší prvky. Naše Slunce toto období čeká asi za 7 miliard let. Tím aktivní život hvězdy v podstatě končí. Pokud je hvězda součástí binárního systému, nemusí tyto závěrečné fáze probíhat zcela hladce a jsou komplikovány přetokem hmoty mezi složkami. Nestability mohou, jak u hvězdy samotné, tak u binárního systému, vést v závěrečných fázích k explozím supernov. Ať je však závěr života hvězdy jakkoli bouřlivý, končí podle současných znalostí jako chladnoucí bílý trpaslík, neutronová hvězda nebo černá díra.

Bílí trpaslíci. Tlak gravitace v bílých trpaslících je tak veliký, že uvolňuje elektrony z atomárních obalů. Elektronový plyn, který vyplní hvězdu za těchto podmínek klade gravitaci tuhý odpor. Elektrony jsou fermiony, mají poločíselný spin a podle Pauliho vylučovacího principu se dva nemohou nacházet ve stejném kvantovém stavu. Výsledkem je ohromný tlak kvantové povahy, jehož gradient vyrovnává v bílých trpaslících gravitační hroucení. Poloměr bílých trpaslíků leží v intervalu 1 000 km až 20 000 km, hustota dosahuje až 10^3 kg/cm³, maximální hmotnost 1,44 M_{\odot} . Hmotnější bílí trpaslíci jsou nestabilní, tuto tzv. *Chandrasekharovu mez* odvodil Subrahmanyan Chandrasekhar v roce 1930. První bílý trpaslík Sírius B byl objeven již v roce 1834. Fridrich Bessel předpověděl průvodce Síria A z newtonovské teorie na základě vlnovkovité trajektorie hvězdy Sírius. Tento průvodce byl objeven v optické dílně bratří Clarků roku 1862. Alvan Clark testoval objektiv o průměru 45 cm. Na Síriu B byla demonstrována správnost newtonovské gravitační teorie (vlnovkovitá trajektorie Síria A) i potvrzení OTR (červený posuv). Sírius B je enormně malý a hustý. Má průměr 11 736 km, hustotu 3×10^3 kg/cm³, hmotnost 1,03 M_{\odot} , povrchovou teplotu 24 800 K a jeho vzdálenost je 8,6 l.y.

Neutronové hvězdy. Nezastaví-li gravitační hroucení tlak degenerovaného elektronového plynu, hvězda se dále hroučí. V určité fázi začne být energeticky výhodný inverzní beta rozpad - spojování elektronů a protonů za vzniku neutronů a elektronových neutrin. V takové hvězdě roste zastoupení neutronů. Neutrony jsou také fermiony a gradient tlaku neutronového plynu (opět kvantového původu) je schopen zastavit další hroucení. Vzniká neutronová hvězda o rozměrech 10 km až 100 km a hustotě dosahují hodnot jaderné



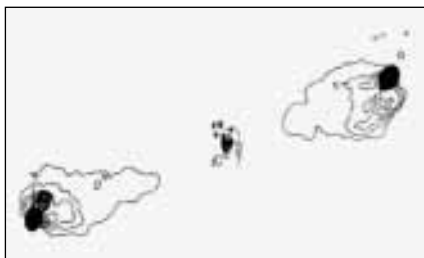
hustoty 10^{10} kg/cm³ až 10^{12} kg/cm³. Jde vlastně o veliké stabilní atomové jádro s rychlou rotací a silným magnetickým polem. Nesouhlasí-li směr rotační a magnetické osy, vytvářejí výtrysky světelného záření a nabitých částic ve směru magnetické osy efekt *pulsaru*. Pozorovatel vidí pravidelné záblesky od rotující neutronové hvězdy, podobně jako od majáku policejního automobilu. První pulsar objeven v roce 1967 Jocelyne Bellovou v Cambridge (asistentka A. Hewishe, který dostal Nobelovu cenu za objev pulsarů). Původně pulsary získali označení LGM (Little Green Men - malí zelení mužičkové), neboť nebylo z počátku jisté zda nejde o inteligentní signály mimozemského původu. Typická perioda pulsarů je kolem jedné sekundy, známy jsou i milisekundové pulsary. Mezi nejznámější pulsary patří například pulsar v *Krabí mlhovině M1*, který je pozůstatkem po explozi supernovy z roku 1054. Dalším známým pulsarem je *podvojný pulsar 1913+16*, u kterého bylo naměřeno mnoho relativistických efektů včetně změny periody vlivem vyzařování gravitačních vln. Je-li neutronová hvězda součástí binárního systému a od souputníka na ní přetéká hmota, mohou se v oblasti magnetických pólů vytvořit horké skvrny vysílající RTG záření. To je podstatou rentgenového pulsaru. Maximální hmotnost neutronových hvězd dosahuje něco málo přes 2 M_{\odot} . Nad touto hmotností jde o nestabilní útvar. Tuto mez nazýváme *Landau-Volkov-Oppenheimerovu mezí*. Hvězdy s hmotností vyšší jak asi 3 M_{\odot} by měly zakončit svoji životní kariéru jako černé díry.

Doc. RNDr. Petr Kulhánek, CSc. (*1959)

vystudoval MFF UK, obor teoretická fyzika, v současné době se zabývá fyzikou plazmatu na katedře FEL ČVUT. Poslední tři roky kromě standardních přednášek vede výběrovou přednášku „Astrofyzika“ doplněnou astronomickým soustředěním.

Kandidáti na hvězdné černé díry

Rentgenový zdroj Cygnus X-1. Nejstarším kandidátem na černou díru je rentgenový zdroj Cygnus X-1 v souhvězdí Labutě. Jde o zdroj záření z naší Galaxie, který byl objeven družicí UHURU v roce 1971. Zdroj je vysoce proměnný a nepravidelný. Rentgenové záblesky mají trvání kolem 10 milisekund. To ale znamená, že zdroj těchto záblesků musí být velmi malý (za dobu trvání záblesku musí mít světlo možnost prolétnout z jednoho okraje objektu na druhý). Rozměry zdroje vycházejí dokonce menší než rozměry naší Země. Objekt je gravitačně vázán s blízkým modrým veleobrem HDE 226868 deváté magnitudy. Vzájemná oběžná perioda obou těles je 5,6 dne, vzdálenost



Isofoty radiových skvrn na periferii zdroje Cygnus X-1.

0,27 AU, precesní pohyb má periodu 294 dnů. Z těchto údajů vychází hmotnost kompaktního objektu větší než $9 M_{\odot}$. Objekt je tedy velmi nadějným kandidátem na černou díru. Tuto myšlenku navíc podporují dvě typické radiové skvrny na periferii rentgenového zdroje. Tyto skvrny by měly být důsledkem interakce výtrysků vyvrhovaných z černé díry s mezihvězdným prostředím. V teoretických modelech soustavy se počítá s přetokem hmoty z modrého veleobra na černou díru. Právě tento přetok hmoty na černou díru je zodpovědný za rentgenové záblesky soustavy.

GRS 1915+105 v Orlu. Jde o zdroj gama záření (GRS - Gamma Ray Source) v souhvězdí Orla, který je opět binárním zdrojem hvězdné velikosti s typickým akrečním diskem a dvěma výtrysky. Na počátku roku 1998 vydalo NASA zprávu o pozorování periodičnosti výtrysků. Výtrysky za půl hodiny vyvrhnou látku o hmotnosti asi 10^{23} kg (hmotnost menšího asteroidu) a to rychlostí blízkou rychlosti světla a potom přibližně na 5 minut zmizí. Z družice RXTE bylo

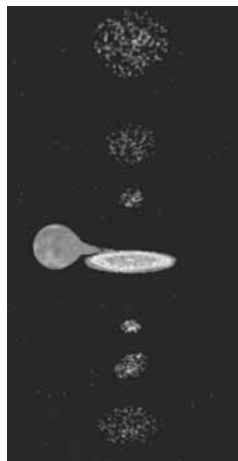
pozorováno, že v okamžiku vzniku výtrysku se výrazně snižuje produkce RTG záření z disku. Síť radioteleskopů VLA pozorovala, že samotné výtrysky na počátku fáze vyvíjejí intenzivně také v oborech IR a R. Hmotu disku se pravděpodobně nějak transformuje do

výtrysku a je periodicky vyvrhovávána ven. Celý mechanismus je ale značně nejasný. V této binární soustavě byl také pozorován jeden zajímavý relativistický efekt - strhávání souřadnicových systémů vlivem rotace (frame dragging). Vše nasvědčuje tomu, že se tento mimořádně zajímavý objekt chová jako miniaturní kvasar umístěný přímo v naší Galaxii.

LMC X-1. Nejintenzivnější rentgenový zdroj ve Velkém Magellanově mračnu, malé nepravidelné galaxii spojené s naší galaxií mosty vodíku, je dalším vážným kandidátem na hvězdnou černou díru. Jde o silný rentgenový zdroj pocházející z dvojhvězdy. Jedna složka je pravděpodobně normální hvězda, druhou složku tvoří kompaktní průvodce. Plyn z normální hvězdy dopadá na povrch kompaktní složky, ten se zahřívá a emituje rentgenové záření. Rentgenové záření



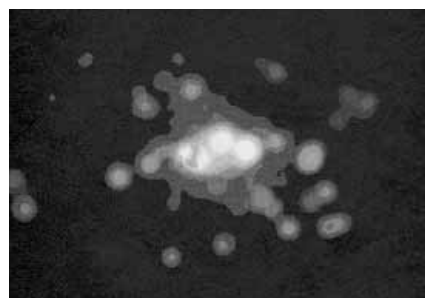
LMC X-1. Snímek z družice ROSAT z 30. 12. 1995 v oboru 0,1-2 keV. Oblast má podélné úhlové rozměry 180'.



Tak takhle nějak by mohl vypadat objekt GRS 1915+105 zblízka.

ze systému vytrhává elektrony z atomových obalů v okruhu několika světelných let. Rekombinující elektrony potom září opět v rentgenovém oboru spektra. Z charakteru pohybu dvojhvězdy vyplývá, že kompaktní průvodce je s vysokou pravděpodobností černá díra s hmotností zhruba $5 M_{\odot}$. Zdroj byl objeven rentgenovou družicí ROSAT.

Rentgenové zdroje v galaxii M 31. Velká galaxie v Andromedě je nejbližší velká spirální galaxie. Je vzdálená asi 3 miliony světelných let a je dosti podobná naší Mléčné dráze. Mnoho hvězdných systémů v této galaxii vyzářuje vysoce energetické záření v rentgenovém oboru. Družice ROSAT našla v galaxii M 31 přes 500 diskretních rentgenových zdrojů. Nacházejí se v kulových hvězdokupách, ve spirálních ramenech a v blízkosti centra galaxie. Většina zdrojů jsou pravděpodobně akreční disky binárních systémů a snad i černých děr. Galaxie M 31



Rentgenové zdroje v centru galaxie M 31. ROSAT 0,4-1,6 keV.

má v blízkosti centra větší množství rentgenových zdrojů než naše Galaxie. Příčina není známa.

GRB 980425/SN 1998bw. Dne 25.4.1998 byl sondou BeppoSAX 25 pozorován gama záblesk označený GRB 980425. O den později, 26.4.1998, byla ve stejném místě oblohy nalezena dalekohledem NTT (ESO) supernova SN 1998bw v galaxii ESO 184-G82, která je od nás vzdálena jen 120 milionů l.y. Supernova měla magnitudu 15 a podle pořízených spekter (1.5.1998, Mt Stromlo) šlo o supernovu typu Ib. Pokud spolu oba jevy souvisely, mohlo jít o první zaznamenání kolapsu hvězdy na černou díru. Většina gama záblesků má původ v kosmologických vzdálenostech a jsou výrazně energetičtější. Jejich původ zatím není znám.

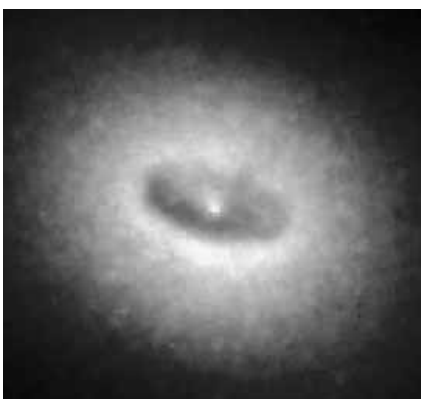


Supernova 1998 bw v blízké galaxii
ESO 184-G82

Kandidáti na galaktické černé díry

Hvězdné černé díry jsou závěrečným produktem, vývoje velmi hmotných hvězd. U galaktických černých děr není doposud jasné, zda se černé díry v centrech galaxií vyvinuly až v průběhu života galaxie, či zda zde byly přítomny od počátku. Popišme si nyní některé typické galaktické černé díry.

Galaxie NGC 4261. V centru eliptické galaxie NGC 4261 byl v roce 1992 Hubbleovým teleskopem objeven zkolabovaný objekt, který je dnes nejtypičtější ukázkou černé díry. Galaxie je vzdálená 10 milionů světelných let ve směru souhvězdí Panny. V centru galaxie je masivní černá díra krmená prachem z tlustého akrečního disku o průměru 800 světelných let. Měřením rychlosti rotace prachového disku byla stanovena hmotnost černé díry na $1,2 \times 10^{12} M_{\odot}$. Tato ohromná hmotnost se nachází v oblasti jen o něco málo větší než je naše Sluneční soustava. Akreční disk obklopu-



Jádro galaxie NGC 4261. Dalekohled HST,
WFPC 2 (1995).

jící černou díru má hmotnost $10^5 M_{\odot}$. Snímky z dalekohledu HST z roku 1995 zaznamenaly poprvé strukturu disku, která pravděpodobně souvisí s vlnami a nestabilitami šířícími se diskem. Také se ukázalo, že černá díra s diskem není přesně v centru galaxie NGC 4261. Pro tento fakt zatím chybí uspokojivé vysvětlení. Na snímku je dobře patrná i část výtrysku mířícího vzhůru.

Galaxie M 87. Centrum blízké obří galaxie M 87 je velmi husté. Na fotografii z dalekohledu HST (1994) byl nalezen akreční disk horkých plynů rotující kolem centra této obří galaxie. Disk je patrný v levé dolní části snímku. Známa jsou spektra různých částí disku. Z rychlosti



Jádro galaxie M 87. Dalekohled HST, WFPC 2
(1994).

rotace disku lze určit hmotnost centrálního objektu a z rozměrů disku lze odhadnout maximální rozměr objektu. Tyto výpočty vedou k natolik vysoké hmotě centrálního objektu, že v úvahu připadá jedině černá díra. Šikmo vpravo vzhůru míří výtrysk horkých plynů, který obsahuje rychle se pohybující nabitě částice a je dlouhý 6500 l.y. Ve výtrysku byla nalezena vlákna o průměru 10 světelných let svědčící o přítomnosti magnetických polí. Charakter výtrysku odpovídá modelům černých děr s tlustým akrečním diskem.

Galaxie NGC 7052. Galaxie v souhvězdí Lištiček, v jejímž centru je pravděpodobně černá díra. Galaxie je vzdálená 200 milionů světelných let. Průměr akrečního disku je 3700 l.y. Ze spekter pořízených kamerou FOC (Faint Object Camera) dalekohledu HST bylo

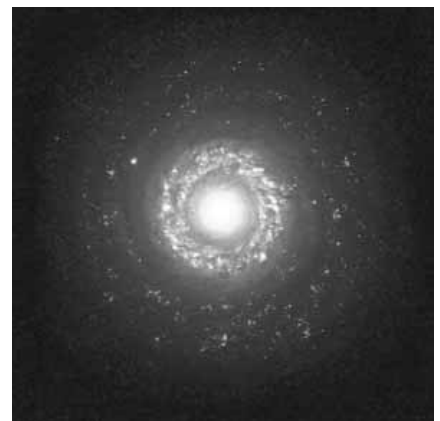


Jádro galaxie NGC 7052. Dalekohled HST,
WFPC 2 (1998).

určeno, že rotační rychlost je ve vzdálenosti 200 l.y. od centra rovna 155 km/s. Odsud plyne hmotnost objektu 300 milionů Sluncí. Jde o 0,05% hmoty galaxie. Na snímcích jsou patrné dva výtrysky se silnou radiovou emisí. Na pořízených snímcích jsou patrné detaily o velikosti 50 l.y.

Galaxie NGC 7742. Spirální galaxie v souhvězdí Pegase je vzdálená 3 000 světelných let. Jde o aktivní galaxii, v jejímž středu se asi nachází velká černá díra. Jádro ve středu snímku vypadá jako žlutouček. Žmolkovitý tlustý prsten kolem je oblast, kde se rodí nové hvězdy.

Galaxie NGC 5128 (Cen A). Velmi známá eliptická radiová galaxie s temným



Galaxie NGC 7742. Dalekohled HST, WFPC 2
(1998).

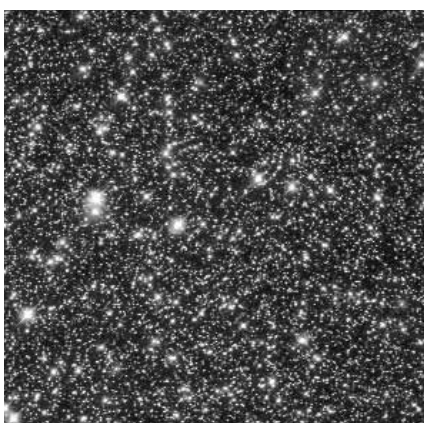
pruhem napříč. Původně se myslelo, že jde o pás temné hmoty. Dnes víme, že jde o pozůstatek kolize se spirální galaxií. V roce 1970 zjistila družice Uhuru, že kromě radiového oboru je galaxie i zdro-



Galaxie NGC 5128 (Cen A). Výtrysky objevené družicí Einstein.

jem RTG záření. V roce 1975 bylo družicí Sigma nalezeno ještě energetičtější záření gama. V roce 1979 byly rentgenovou družicí Einstein objeveny dva výtrysky z jádra. V roce 1996 se na základě snímků z dalekohledu HST začalo uvažovat o tom, že jde o pozůstatek kolize dvou galaxií. V roce 1997 se pomocí komplexu deseti radioantén VLBA našlo malé kompaktní jádro. Od roku 1998 se na základě snímků IR kamery NICMOS umístěné na dalekohledu HST začalo uvažovat, že v centru galaxie je černá díra.

Jádro Galaxie. Tak a je to tady. Na to, že černé díry jsou všude, už jsme si tak



Pohled ve smíru centra Galaxie (25 000 l.y.), HST (1994).

nějak zvykli. Že by mohla být i v centru naší Galaxie, to jsme si moc nepřipouštěli. V centru naší Galaxie leží objekt Sag A obklopený hustou hvězdkoupou (na snímku). Keckův 10 m dalekohled zjistil (Andrea Ghez, University of California) v IR oboru, že tyto hvězdy rotují rychlostí

1400 km/s kolem masivního objektu o hmotnosti 2,6 milionu Sluncí - černé díry.

Ostatní černé díry

Ve Vesmíru by v principu mohly existovat i malé prvotní (primordiální) černé díry, které vznikaly v raných vývojových fázích Vesmíru. Tyto miniaturní černé díry by dnes ale podstatně zářily efektem Hawkingova vypařování. Současná kvalita pozorovací techniky dává horní odhad na počet těchto objektů. Nemůže jich být více jak 300 v jednom krychlovém světelném roku. Ve vesmírných černých děrách také zcela chybí černé díry středních velikostí - mezi hmotou hvězdy a galaxie.

Další informace

S. Hawking: *Černé díry a budoucnost Vesmíru*. Mladá fronta, edice Kolumbus (1995)

I. Novikov: *Černé díry a vesmír*. Mladá fronta, edice Kolumbus (1989)

Aldebaran: http://aldebaran.feld.cvut.cz/vyuka/astrofyzika/hvezdy/stars_4.html

Günter D. Roth: Encyklopedie počasí

Knížní klub, Praha 2000, 296 stran.



Kdo někdy dělal demonstrátora na hvězdárně jistě potvrdí, že pro laickou veřejnost je astronomie vědou zaobírající se jevy na nebi - tudíž musí mít něco společného s meteorologií. Samozřejmě, že to člověk vždy uvede na pravou míru, nicméně meteorologické znalosti se astronomům mohou hodit. Vždyť jsme vlastně na jasné obloze téměř závislí a tak je jistě dobré být schopen porozumět meteorologickým jevům a předpovědím.

Knihla německého autora Güntera Rotha je právě vhodným úvodem do mete-

orologie. Její první část je zaměřena na popis a fyzikální vysvětlení meteorologických úkazů na obloze. Setkáme se v ní nejenom s popisem mlhy, halových jevů či duhy, ale například i s vysvětlením polárních září či svitu hvězd (z pohledu stavu atmosféry). Další části knihy jsou věnovány porozumění základních meteorologických pojmů a tvorbě povětrnostních map. Nesmí samozřejmě chybět kapitoly věnované hlubšímu fyzikálnímu vysvětlení toho jak „funguje“ počasí (to se může hodit i při porozumění atmosférických jevů u jiných planet) a jak se dělají moderní meteorologické předpovědi. Celá kniha je přitom bohatě ilustrována přehlednými grafy, mapkami a je doplněna velmi kvalitními fotografiemi meteorologických jevů.

Potud lze říci, že jde o dílko velmi užitečné a zdařilé. Žel vzdor tomu, že překladatel V. Vítek opatřil knihu řadou hodnotných poznámek (dle nich soudím, že překladatel je meteorolog), udělal základní chybu - nenechal kohokoli překlad po sobě přecházet. Proto se lze místy setkat s poněkud toporným překladem z jazyka německého a na několika místech s vyloženými nesmysly (např. str. 35 - povídání o jevech na Slunci - výraz „sluneční pochodně“ zřejmě značí fakulová pole, str. 235 - „Velkopočítač“ snad něco jako čistonosoplana, ale na ČHMÚ mají jistě superpočítače, etc.). Rovněž časté diskutování lingvistických „hříček“ zpěpřehledňuje text. Místo toho bylo mnohem vhodnější přeložit zkratky na synoptických mapách. Kniha je bohužel dílem německého autora a je tudíž orientována na německého čtenáře a do německého prostředí. I když se překladatel snažil tento „nedostatek“ dohnat, přesto se to zcela nepodařilo (např. na str. 234. chybí odkaz na www stránku ČHMÚ - <http://www.chmi.cas.cz>). Škoda, že u této knihy zvítězil opět ekonomický zájem před kvalitou.

Na druhou stranu, kniha byla autorem sepsána velmi pedagogicky a obecně srozumitelně, a tak pokud jste schopni přenést se přes její určité nedostatky, je jistě dobrou pomůckou pro rozhodnutí, zda se vydat na noční pozorování oblohy či nikoli.

■ Vladimír Kopecký Jr.