

Hvězdy znějící v Des dur

Milisekundové oscilace intenzity záření neutronových hvězd

VLADIMÍR KARAS
JAN WILD

Jak dlouhé ozvěny se cestou z dálky mísí a jemně splývají ve sjednocený hlas, jak širošírá noc, jak světlo, jako čas, tak vůně, barvy, tóny odpovídají si.

Charles Baudelaire
Souvztažnosti z Květů zla

Když ve hvězdě vyhasnou jaderné reakce, které byly po miliardy let zdrojem její energie, začne se hvězda vlastní gravitací prudce smršťovat. Jak takový dramatický kolaps skončí, to záleží na řadě okolností, především však na hmotnosti. Jedním z možných výsledků je neutronová hvězda, jakési gigantické atomové jádro. Přestože jde o velmi stabilní útvar, ve více případech se podařilo komplikovanými a pozoruhodně citlivými metodami zaznamenat rychlé pulzace signálu, který patrně přichází z blízkého okolí tělesa. Pulzace se zpravidla objevují u hodně starých neutronových hvězd, tvořících jednu ze složek binární soustavy, a proto tím představují výzvu jak pro pozorovatele, kteří mohou tyto oscilace sledovat pouze z umělých družic, tak pro teoretiky, kteří si lámou hlavu nad podstatou celého jevu.

Astronomové nacházejí ve vesmíru nepřeberné množství kosmických objektů, jejichž vzhled, rozměr, záření a stáří jsou velmi rozmanité: od mezihvězdného prachu a plynu přes komety, planety a planety, samozřejmě také hvězdy, hvězdokupy, až po gigan-

Pro porovnání: Bílý trpaslík je přibližně stejně velký jako Země, jeho hmotnost je však zhruba milionkrát větší než hmotnost Země. Neutronová hvězda je nepatrnou tečkou na špičce šipky, její hmotnost však je porovnatelná s hmotností bílého trpaslíka.



tické galaxie. Fyzikální podstatu některých objektů jsme již poznali velmi dobře, a tak nás jen stěží překvapí něčím opravdu novým, zatímco mnohé jiné se nám jeví jako bizarní a nevyzpytatelné. Je tedy pochopitelné, že si každý z badatelů vybírá k svému výzkumu úzký okruh otázek, jimž se věnuje do hloubky a snaží se k nim připojit další díl poznání.

K první skupině výzkumných témat se řadí fenomenologický popis různých objektů, shromažďování údajů či vyhledávání dalších příkladů již známých typů kosmických těles. Z odborného hlediska je takto vynaložené úsilí velmi cenné, protože statistické zpracování rozsáhlých katalogů a databází nám už nejednou poskytlo nový pohled na zdánlivě vyřešené otázky. Příkladem by mohl být i slavný objev rozpínání vesmíru. V jeho zárodku stálo systematické pozorování červeného posuvu spektra vzdálených galaxií, který svědčí o jejich pohybu směrem od nás. Poněkud úmorné proměřování spekter dalších stovek a tisíců galaxií pokračuje dodnes, samozřejmě mnohem přesnějšími a efektivnějšími metodami, a má zásadní význam pro kosmologii, tedy pro poznávání celkové struktury vesmíru, jeho historie a dalšího vývoje, a v konečných důsledcích i pro částicovou fyziku.

Kromě takové systemizační práce, tedy soustavného uspořádávání a třídění získaných poznatků, však existuje i druhá, mimořádně vzrušující oblast astronomického výzkumu, ve které se snažíme pochopit dosud nevysvětlené fyzikální procesy. V té souvislosti se jako zásadní pro soudobou astrofyziku obvykle uvádějí teoretické otázky spojené s existencí temné hmoty, problém neutrin vznikajících ve Slunci a supernovách a dosud málo probádané jevy související se závěrečnými stadii hvězdného vývoje a s černými dírami.

Dosud málo probádané jsou objekty obsahující neutronové hvězdy, málo se toho ví o velmi rychlých oscilacích intenzity jejich rentgenového záření. V průběhu posledních čtyř let byly objeveny dvě desítky těchto zdrojů.

Plazma kolem neutronových hvězd

Neutronové hvězdy jsou neobyčejně husté. Přestože mají hmotnost srovnatelnou se Sluncem (10^{30} kg), jejich rozměr nepřesahuje několik desítek kilometrů (zpravidla bývá 10 až 30 km). Jsou tedy nesmírně kompaktní a na rozdíl od normálních hvězd mají tyto zvláštní vyhořelé hvězdy zcela zřetelný povrch, na němž panuje silná gravitace. Zmíněné oscilace vznikají pravděpodobně těsně nad povrchem hvězdy v silně zahřátém plynném prostředí – plazmatu o teplotě přes 10 milionů kelvinů. Vysoké teploty jsou důsledkem neuspořádaného prudkého víření a krouživého pohybu plynných proudů v gravitačním poli. Plazma klesá k povrchu, postupně se ohřívá, a posleze naráží na tvrdý okraj neutronové hvězdy rychlostí kolem jedné poloviny rychlosti světla.

V systému neutronové hvězdy a obíhajícího plazmatu lze přirozeně očekávat řadu procesů produkujících záření, jehož intenzita se mění na několika ty-

Doc. RNDr. Vladimír Karas, CSc., (*1960) vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu UK v Praze. V Astronomickém ústavu této fakulty se zabývá relativistickou astrofyzikou a aktivními galaxiemi. (e-mail: karas@mbox.cesnet.cz)

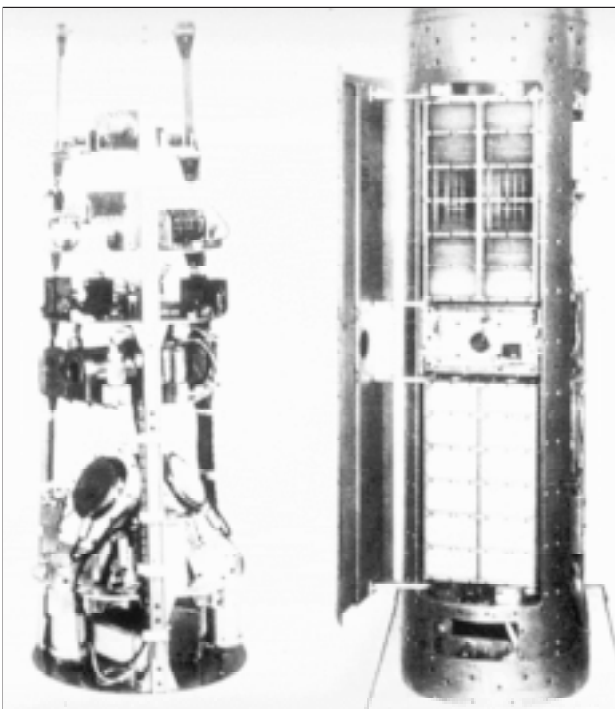
RNDr. Jan Wild, CSc., (*1960) vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu UK a Konzervatoř Jaroslava Ježka v Praze. Na katedře elektroniky a vakuové fyziky se zabývá tenkými supravodivými vrstvami. Současně vyučuje hudební teorii na konzervatoři. (e-mail: jan.wild@mff.cuni.cz)



Před 42 lety, 31. 1. 1958, odstartovala první americká umělá družice, Explorer 1. Mezi její úspěchy patří i odhalení Van Allenových radičních pásů, které jsou hlavním zdrojem rušivého šumu detektorů rentgenového záření.

pických časových škálách. Především v sobě toto proměnlivé záření nese informaci o oběžné době, která činí asi jednu milisekundu. Přes ni se překládají jen o málo delší škály, související s efekty teorie relativity. Oběžnou frekvenci lze přesně vypočítat z pohybových zákonů – při pohybu okolo neutronové hvězdy o hmotnosti 1,4násobku sluneční hmotnosti ve vzdálenosti pouhých 15 km od jejího středu tak nalezneme hodnotu asi 1200 Hz. Stojí tedy za povšimnutí, že frekvence pozorovaných oscilací je v rozmezí od 300 Hz do 1300 Hz.

Raketa Aerobee 150 startovala 18. června 1962 minutu před půlnocí. Ve výšce nad 80 km pobyla pouhých 5 minut 50 sekund (dosáhla výšky 225 km). Ve výšce 80 km se otevřel její kryt a přístroje zaznamenaly první důkaz kosmického rentgenového záření původu mimo sluneční soustavu. Během tohoto krátkého letu objevila nejjasnější rentgenový zdroj na obloze – Sco X-1, o němž dnes víme, že je binárním systémem. Kromě toho objevila rovněž silný rentgenový šum, který pochází z aktivních galaktických jader.



Odtud také pramení inspirace pro exkurzi do světa hudby a pro metaforický titulěk článku. Hvězdy samozřejmě neposloucháme ušima; většina údajů se získává rentgenovými detektory umístěnými na nejpokročilejších umělých družicích, nicméně interpretace pozorovaných frekvencí byla podnícena dávno známými pravidly akustiky. Právě nebývale vysoká frekvence odlišuje popisovaný jev od podobných, ale mnohem pomalejších oscilací (kolem 10 Hz), které u tohoto druhu objektů byly pozorovány už před dvaceti lety, a také od periodických jevů probíhajících v normálních hvězdách (jako jsou malé, ale přesto měřitelné pětiminutové oscilace slunečního povrchu). Možnost studovat touto cestou vlastnosti samotných neutronových hvězd, měřit rychlost jejich rotace a snad i ověřovat některé efekty obecné relativity je zcela nová a dozajista lákavá.

Motivací pro studium plynných proudů kolem neutronových hvězd je skutečnost, že odrážejí dosud neověřené, nebo dokonce neznámé vlastnosti prostoročasu a látky v místech, kde se plyn pohybuje. Padající plyn pochází z nedaleké hvězdy, která je s neutronovou hvězdou vázána do poměrně těsné dvojhvězdné soustavy. Druhá složka dvojhvězdy je méně kompaktní a její hmota přetéká vlivem gravitace na neutronovou hvězdu. Vnitřní část plynného proudu je v oblasti, kde již si k výpočtům pohybu hmoty musíme vzít na pomoc obecnou relativitu, s klasickou Newtonovou mechanikou nevystačíme. Pohyb v silných gravitačních polích je totiž doménu teorie relativity, která ale v této situaci dosud nebyla dostatečně testována. Hlavním důvodem ke studiu takových objektů je však to, že vlastnosti oscilací souvisejí se strukturou neutronové hvězdy samotné (fyzikové by řekli, že jsou ovlivněny její stavovou rovnicí), a podávají nám tedy informaci o vlastnostech elementárních částic v extrémních podmínkách.

Kvaziperiodické oscilace

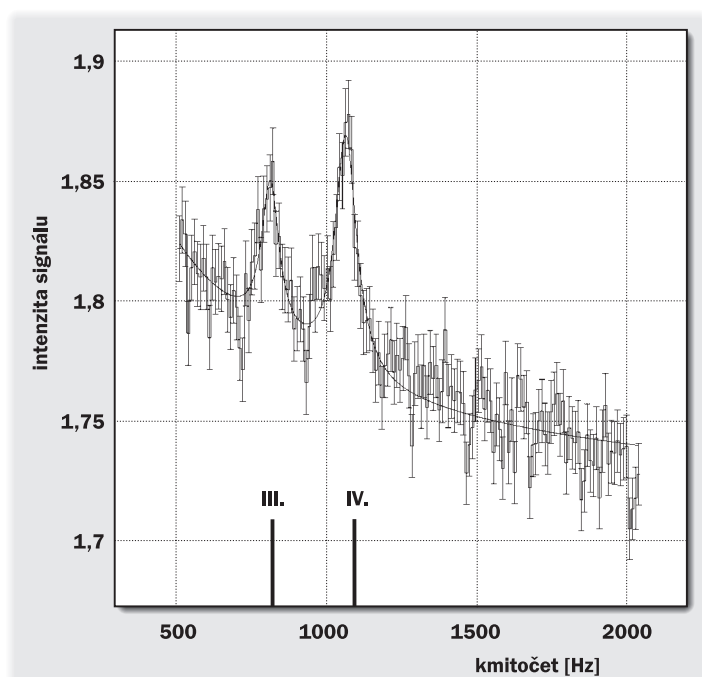
U mnoha astronomických objektů je patrná časová proměnnost jejich záření. Zda je tato proměnnost pravidelná, lze obvykle odhalit Fourierovou analýzou pozorovacích dat. Ta nám prozradí, s jakou frekvencí nebo frekvencemi se signál mění. Rozpoznat takovou pravidelnost však není snadné, protože výsledky pozorování bývají většinou různě zašuměné. Navíc je pozorovací čas omezen technickými možnostmi, takže nelze údaje strádat po neomezeně dlouhou dobu. V případě objektů, které máme nyní na mysli, vykazuje měřený rentgenový tok viditelnou modulaci na frekvenci řádu 1 kHz, jíž odpovídá jasně patrný vrcholek ve Fourierově spektru. Dominující frekvence je velmi výrazná, což svědčí o značně koherentních kmitcích. Ovšem zcela neměnná tato frekvence není, a proto se pozorovaným kmitům říká kvaziperiodické oscilace. Poprvé byly tyto milisekundové oscilace zaznamenány v r. 1996 u dvou objektů vedených v katalogích pod označením 4U 1728-34 a Sco X-1. Objev byl výsledkem systematické snahy detegovat rotaci neutronových hvězd a náleží týmu pozorovatelů okolo rentgenového satelitu RXTE. U druhého z uvedených zdrojů byla zjištěna frekvence asi 1100 Hz, a v té době to byl první submilisekundový astronomický objekt. Tuto frekvenci ovšem za rotační frekvenci nepovažujeme, i když je s ní přímo svázána, jak bude za okamžik zřejmé. Ještě v témže roce byla u Sco X-1 objevena další periodičnost, tentokrát na poněkud nižší frekvenci 830 Hz, a záhy se ukázalo, že takové zdvojení je typické.

Zdvojení frekvencí se projevuje dvěma jasně oddělenými vrcholky ve Fourierově spektru, vzdálenými od sebe asi 250 Hz (viz graf). Jestliže ale sledujeme konkrétní zdroj po určité dostatečně dlouhé období, zjistíme, že frekvence obou maxim kolísají až o 300 Hz, v závislosti na rentgenovém toku. Pozorované změny patrně souvisejí s proměnným množstvím plynu, který v daném okamžiku přetéká na neutronovou hvězdu. Přestože se oba vrcholky takto výrazně posunují, jejich vzájemný odstup zůstává téměř neměnný. Uvedené vlastnosti přivedly badatele k názoru, že by mohlo jít o zázračný signál (kolísavé napětí vznikající současným působením dvou tónů).

Podstata zdvojených vrcholků

Přetékající plyn krouží okolo neutronové hvězdy v diskovitěm útvaru, ale vnitřní okraj tohoto plynného disku většinou nedosahuje až k samotnému povrchu neutronové hvězdy. Bývá ukončen o něco výše, buď interakcí s magnetickým polem, které mívají neutronové hvězdy poměrně silné, anebo v důsledku efektů obecné relativity, jež způsobují, že pod jistou mezí už prostě stabilní oběžný pohyb není možný. Trvá poměrně dlouho, než plyn postupným spirálovitým pohybem dosáhne této limitní dráhy, ale pak už jen rychle padá k povrchu hvězdy. Čím níže plyn obíhá, tím vyšší je oběžná rychlost a také odpovídající frekvence, jíž je pozorovaný signál modulován. Poloha vnitřního okraje disku, a tedy i maximální oběžná frekvence ovšem závisí na množství plynu přitékajícího diskem. Totéž platí pro intenzitu rentgenové emise, a důsledkem těchto korelací je pozorovaná souvislost frekvencí s měřeným zářivým tokem.

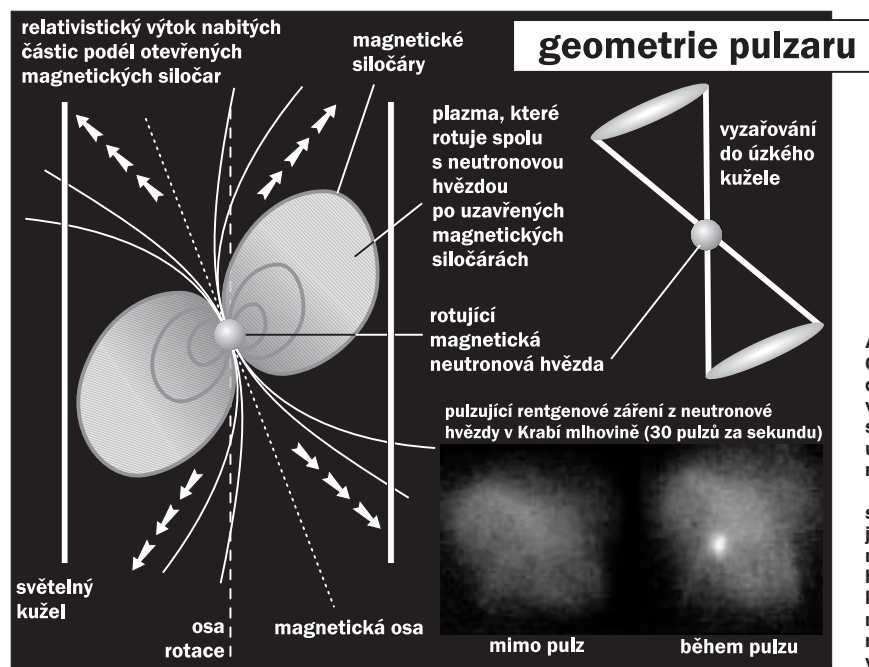
Zbývá vysvětlit, proč si oba vrcholky udržují stálý odstup. Jednoduše to pochopíme, jestliže se vyšší z obou frekvencí interpretuje jako důsledek oběžného pohybu u vnitřního okraje disku, kde je plyn značně zahřátý a přechází z podzvukového do nadzvukového proudění. Na druhé straně nižší frekvence odpovídá rozdílu mezi první, vyšší frekvencí a rotační frekvencí neutronové hvězdy. Takové součtové a rozdílové frekvence se při Fourierově analýze signálu opravdu objevují a pozorovatelé zaznamenali i další kombinace.



Fourierovo spektrum signálu rentgenového zdroje Sco X-1 (podle M. Van Der Klise a kol., *Astrophysical Journal* 469, L1, 1996). Dobře patrné je zde charakteristické zdvojení kvaziperiodických oscilací, o němž se hovoří v textu. Na obrázku jsou rovněž vyznačeny kmitočty odpovídající třetímu (III.) a čtvrtému (IV.) částkovému tónu k des', které spadají do formantové oblasti trubky (viz např. J. Burghauer, A. Špelda: *Akustické základy orchestrace*, Panton, Praha 1967).

U některých objektů se na přechodnou dobu, při dočasných prudkých zjasněních, objevuje v podobě třetího maxima také vlastní rotace hvězdy nebo přesněji vrstvy „přilepené“ těsně nad jejím povrchem, kde se pád plynu definitivně brzdí. U povrchu tak vznikají horké skvrny rotující společně s hvězdou, v nichž se také uvolňuje mnoho zářivé energie.

Není asi třeba zdůrazňovat, že existují další možná vysvětlení těchto navzájem svázaných oscilací. Alternativní modely nejsou tak elegantní, protože předpokládají komplikovanější situace (třeba pohyb plynu v eliptickém nebo jinak pokrouceném disku), ale zato jsou schopny popsat detaily, které pozorov-



Astronomové rozeznávají dva druhy pulzarů. Oba typy však souvisejí s neutronovými hvězdami. Schéma znázorňuje mechanismus radiových pulzarů, což jsou rychle rotující hvězdy s velmi silným magnetickým polem, které urychluje nabitě částice v těsném okolí – tzv. magnetosféře.

Proud zářících částic mění periodicky svůj směr, a vzdálenému pozorovateli se tak objekt jeví jako blikající maják. Naproti tomu rentgenové pulzary září díky přetoku plynu ve dvojhvězdné soustavě. Hvězdný materiál padá na kompaktní neutronovou hvězdu a při tom se velmi zahřívá. Známý pulzar v Krabí mlhovině je mimořádný mimo jiné tím, že ho lze pozorovat v širokém rozsahu vlnových délek.

vatelé v poslední době nasbírali a s nimiž má výše naznačená nejjednodušší verze záznejového modelu potíže. Je to například skutečnost, že podle zpřesněných měření z r. 1998 není odstup obou frekvencí tak dokonale konstantní. Výše nastíněný jednoduchý model však dobře odráží dnes převládající názor na původ tohoto jevu.

Podivuhodné souvztahnosti se světem hudby

Vysoké frekvence oscilací mají v akustické oblasti vnímatelné, to znamená pro lidské uši slyšitelné ekvivalenty. Podívejme se z tohoto hlediska na již zmíněnou hvězdu Sco X-1. Její charakteristické kmitočty 1100 a 830 Hz přibližně odpovídají tónu des v tříčárkové oktávě (des^3) a tónu as v oktávě dvoučárkové (as^2). Pokračujeme-li v rozvíjení této analogie, zjistíme, že jejich rozdílový kmitočet náleží tónu des^1 . Fourierův rozklad tónu (akustické spektrum) se v hudební akustice nazývá alikvotní řada; vezme-li tón des^1 za základ takové řady, pak tóny as^2 a des^3 představují třetí a čtvrtou harmonickou složku (částkový tón).

Položme si nyní otázku, zda známe hudební nástroj, který by při zahrání tónu des^1 zvlášť zdůraznil jeho třetí a čtvrtý částkový tón. Takový nástroj shodou okolností existuje – je jím trubka. Formantová oblast trubky (obdoba aktivního pásmového filtru) spadá do okolí kmitočtu 1000 Hz. Znamená to, že ačkoli je pro trubku typické relativně velké množství zejména vyšších částkových tónů, nejintenzivnější jsou právě ty z nich, jejichž kmitočty leží blízko uvedených hodnotě. Přitom des^1 , jakkoli v hlubokém rejstříku, je pro trubku dobře hrátelné, a navíc, na rozdíl od jásavých až útočných tónů středního a vysokého rejstříku trubky, je toto des^1 možno s malou

nadsázkou charakterizovat jako medově zbarvené do tajemna.

Naši krátkou úvahu o souvislosti s hudebním světem můžeme tedy shrnout zjištěním, že akustické ekvivalenty signálů některých neutronových hvězd by mohly znít tajemně jako hluboké tóny trubek. Asi bychom měli přiznat, že k porovnávání hudebních a kosmických oscilací máme kromě již zmíněné, snad trochu poetické motivace ještě prozaičtější důvod. Mnohé modely vzniku takových proměnných signálů jsou velmi nejednoznačné, zvlášť když jsou odvozeny z Fourierovy analýzy neúplných observačních dat. To je ovšem všeobecný problém astronomických měření, který trápí (nebo měl by trápit) všechny badatele snažící se o fyzikální interpretaci zaznamenaných údajů. V opačném případě totiž dojdou k závěrům, které jsou realitě značně vzdáleny. Bude tedy na místě znovu zdůraznit, že diskutovaná souvislost nejspíš nemá hlubší fyzikální význam, i když na druhé straně všechny tyto jevy velmi pravděpodobně vznikají oscilacemi v plynu, a tak kdybychom se dokázali přenést do blízkosti neutronových hvězd, třeba bychom je i zaslechli vlastníma ušima. Nebo je to jen metafora v duchu Baudelairově?

Tuto noticku jsme uvedli tradičním rozlišením dvou skupin vědců zabývajících se zkoumáním vesmíru: astronomů-pozorovatelů a astrofyziků-teoretiků. Ucelenější představy o fyzice neutronových hvězd zahalených v oblacích plazmatu, a samozřejmě i jakýchkoli jiných objektů, nám může poskytnout jen dobrá spolupráce obou skupin badatelů. Tím se ale hvězdy nijak zvlášť neznepokojují a klidně znějí dál, některé z nich možná v Des dur... □

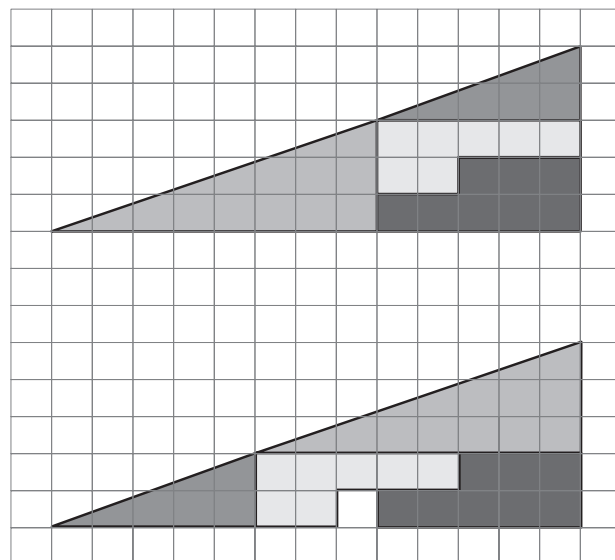
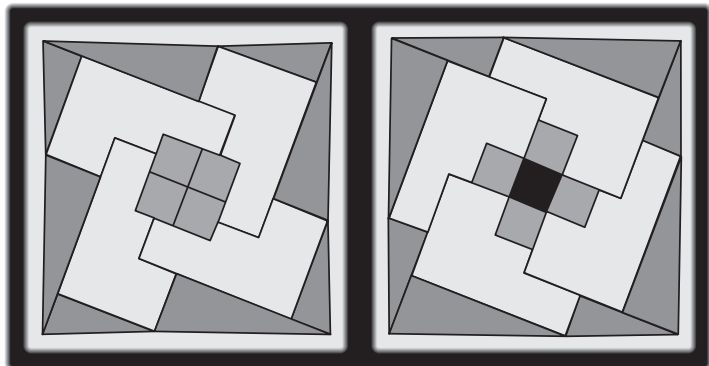
Děkujeme profesorovi Konzervatoře Jaroslava Ježka Antonínu Bílému za podnětné diskuse o hvězdách a hudbě.

Matematické hříčky

IVAN BOHÁČEK

Na rekreační matematiku se mnozí matematikové dívají s hlubokým opovržením. Existuje však člověk, který – alespoň v anglicky mluvících zemích – vydobyl rekreační matematice uznání. Je jím dnes již 85letý Martin Gardner, který po čtvrt století – od prosince roku 1956 do roku 1981 – psal rubriku „Matematické hříčky“ do časopisu Scientific American. V padesátých letech, kdy s touto rubrikou začínal, zabývalo se rekreační matematikou (resp. matematickými hříčkami) jen pár knih. Nejenže potom došlo přímo k explozi publikací, roku 1968 vznikl i specializovaný časopis „Journal of Recreational Mathematics“. (Za rekreační matematiku bývá považována ta matematika, jež obsahuje aspekt hry, který

Dvě verze paradoxu chybějící plochy



může pochopit a ocenit i ten, kdo se matematikou nezabývá. A jak říká Gardner, patří do ní i hlavolamy, paradoxy, triky, topologické kuriozity, jakými jsou např. Möbiova plocha či Kleinova láhev.) Z Gardnerových hříček uvádíme dvě verze paradoxu chybějící plochy. V podobě, jakou mají na obr. vlevo, vyšly roku 1961 v květnovém čísle časopisu Scientific American. □