

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

René Hudec

Nástup rentgenové astronomie

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 23 (1978), No. 5, 262--270,271

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138213>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1978

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Nástup rentgenové astronomie*)

René Hudec, Ondřejov

Start první umělé družice Země — sovětského Sputniku 1 v r. 1957 — byl velkým příslibem zejména pro astronomy a kosmické fyziky. Zemská atmosféra totiž absorbuje veškeré z vesmíru přicházející záření kratších vlnových délek než asi 290 nm. Vzhledem k tomu, že vlnová délka elektromagnetického záření souvisí s energií fotonu vztahem

$$\lambda[\text{nm}] \cdot E[\text{keV}] = hc = 1,24 \cdot 10^{-6} [\text{eV} \cdot \text{m}]$$

byli jsme při pozorování ze zemského povrchu ošizeni o vzhled vesmíru v záření o vyšších energiích, než má viditelné světlo. Energetické záření však vzniká ve vesmíru všude tam, kde se děje něco zajímavého — při procesech, v nichž je hmota v extrémních fyzikálních podmínkách.

Teprve rychlý rozvoj kosmonautiky v šedesátých letech otevřel fyzikům a astronomům pohled do kosmu v oboru záření ultrafialového (přibližně $\lambda = 10 - 300$ nm), rentgenového ($\lambda =$ přibližně 0,1–10 nm) a gama ($\lambda <$ přibližně 0,1 nm). Nové tři oblasti astronomie — astronomie ultrafialová, rentgenová a gama se zejména v posledních letech bouřlivě rozvíjejí a již poskytly řadu nových a často nečekaných poznatků o dějích v kosmu. Rentgenová neboli X-astronomie, jíž věnujeme tento článek, se stala nejrychleji se vyvíjejícím odvětvím současné astronomie vůbec. Jeden objev následuje za druhým — a není divu, vždyť jde o dosud neznámou a neprobádanou půdu. Např. v časopise *Astrophysical Journal*, který patří mezi nejrozšířenější světové astronomické časopisy, rostl v letech 1972–1975 počet vědeckých prací z oblasti rentgenové astronomie každoročně přibližně o 100 %.

Jak vlastně rentgenové záření v kosmických podmínkách vzniká? Rentgenová emise může vznikat při různých jevech různými mechanismy: tepelným zářením opticky tlusté plazmy, tepelným brzdným zářením opticky tenké plazmy, synchrotronovým zářením nebo inverzním Comptonovým jevem. Vždy však vznik rentgenových fotonů, které oproti fotonům viditelného světla mají zhruba o 3 řády vyšší energii, předpokládá extrémní fyzikální podmínky, ať již jde o vysoké teploty (až 10^8 K), silná elektrická a magnetická pole nebo přítomnost relativistických elektronů.

Podle objektu výzkumu dělíme rentgenovou astronomii na sluneční a stelární (hvězdnou). To, že Slunce je intenzivním zdrojem rentgenového záření, víme již dlouho — podařilo se to prokázat z paluby výškové sondážní rakety poprvé v roce 1948. Stelární rentgenová astronomie je mnohem mladší — datuje se teprve od roku 1962, kdy byl přístroji výškové rakety určené k pozorování fluorescenční rentgenové emise měsíčního povrchu náhodně objeven první hvězdný rentgenový zdroj, označený později jako Sco X-1. Zatímco rentgenový tok od klidného Slunce činí $10^{-15} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a při velkých

*) Reprodukce fotografií k tomuto článku jsou otištěny na příloze za str. 270. (Pozn. red.)

erupcích může stoupnout až na řádově $10^{-11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, Sco X-1 jako nejjasnější hvězdný zdroj s $10^{-18} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ vyzařuje zhruba jednu tisícinu toku klidného Slunce. Nejslabší zdroje katalogu rentgenových zdrojů 3U mají jen $10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, tj. rentgenový tok od nich přicházející je desetmilionkrát slabší než od klidného Slunce. Výkonné rentgenové dalekohledy však jsou schopny registrovat ještě mnohem slabší toky. I když jsou kosmické zdroje mohutnými zdroji rentgenové emise, uplatňuje se vliv jejich velkých vzdáleností, a tak byl nepatrný tok záření hlavně zpočátku velkou překážkou rozvoji rentgenové stelární astronomie. To však je díky stále citlivějším a dokonalejším přístrojům vynášeným na oběžné dráhy již zcela překonáno a dalšímu rozmachu rentgenové astronomie nestojí již nic v cestě.

1. Přístroje pro rentgenovou astronomii

Dělíme je na dvě skupiny – rentgenové detektory a rentgenové dalekohledy (teleskopy). První skupina neobsahuje na rozdíl od druhé rentgenovou optiku.

1.1. RENTGENOVÉ DETEKTORY

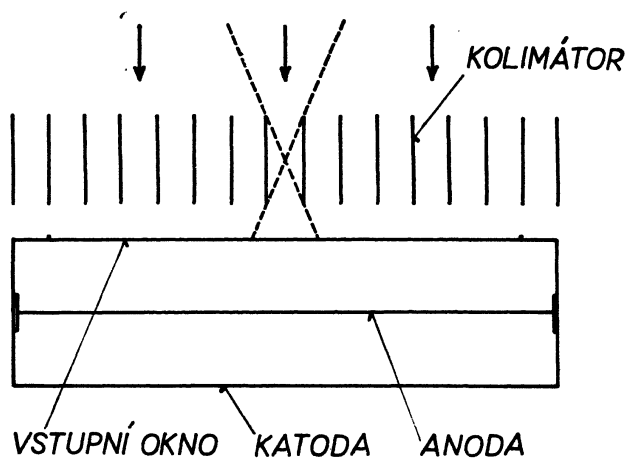
K detekci rentgenového záření slouží převážně plynové, scintilační a polovodičové detektory; méně často se používají detektory na bázi fotoelektrických elementů. Dominantní postavení pro tvrdé rentgenové záření ($\lambda < 1 \text{ nm}$) mají detektory scintilační, pro měkké rentgenové záření ($\lambda > 1 \text{ nm}$) plynové počítače, a to jak ve sluneční, tak i v stelární rentgenové astronomii. Pro sluneční výzkum postačí detektor malých rozměrů, zatímco pro stelární účely – kde jde o malé toky záření – vždy vyžadujeme detektor s co největší účinnou plochou. Říkáme jim pak velkoplošné detektory.

Povšimněme si podrobněji obou hlavních typů rentgenových detektorů. Scintilační detektor je tvořen vlastním scintilátorem (krystaly nejčastěji NaI či CsI se stopami Tl) a fotonásobičem. Srážky rentgenových fotonů s molekulami scintilátoru vyvolávají záblesky ve viditelné oblasti spektra, které pak fotonásobič registruje. Protože je počet vzniklých fotonů viditelného světla přímo úměrný energii dopadlého rentgenového kvanta, lze měřením amplitudy výsledného signálu (tzv. amplitudová analýza) získat energetické spektrum pozorovaného rentgenového zdroje. V důsledku špatného energetického rozlišení jde ovšem jen o velmi hrubé spektrum.

Plynové počítače tvoří kovová trubice či krabice (katoda) s jedním nebo více kovovými vlákny (anoda) a vhodnou plynovou náplní; rentgenové záření vstupuje do detektoru okénkem v jeho stěně. První plynové počítače používané v počátcích rentgenové astronomie byly Geigerovy-Müllerovy, později byly vytlačeny počítači proporcionálními. Proporcionálním počítačem lze – na rozdíl od počítače Geigerova-Müllerova – získat hrubé energetické spektrum. Plynové počítače se používají pro obor energií mezi 0,1 a 50 keV.

Samotný detektor rentgenového záření má zorné pole přibližně 2π steradiánů, což pro účely rentgenové astronomie většinou není vhodné. Proto se plošné detektory

obvykle doplňují kolimačními systémy-kolimátory, které vymezí menší zorné pole (viz obr. 1). Nejčastěji to jsou kolimátory voštinové nebo mřížkové, které umožňují dosáhnout úhlového rozlišení až $10'$. Pokud necháme kolimační systém se dvěma nebo i více mřížkami rotovat (výhodné to je u družic stabilizovaných rotací), dostaneme rotující modulační kolimátor, který dává rozlišení až $40''$.



Obr. 1. Rentgenový detektor (plynový) s kolimátorem.

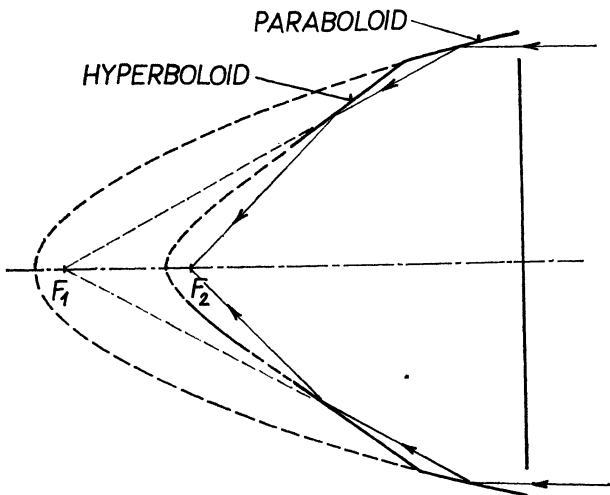
1.2. RENTGENOVÉ DALEKOHLEDY

Sestávají z fokusujícího objektivu a ze záznamového zařízení v ohnisku. Pracují buď jako kolektory záření z velké plochy objektivu na miniaturní ohniskový detektor (rentgenové teleskopy 1. generace), nebo jako zobrazující systémy s dokonalejším objektivem a ohniskovým zařízením pro záznam a přenos obrazu (rentgenové teleskopy 2. generace). Jedno je však pro rentgenové objektivy společné – využívají odrazu na zrcadle. Paprsky přitom musí dopadat pod velmi malým úhlem, pro měkké rentgenové záření asi 1° až 5° , pro tvrdé záření jen desítky až několik minut. Jen tak se totiž rentgenové záření odráží s dostatečnou účinností. Zrcadlové rentgenové objektivy se nejčastěji zhotovují ze skla, niklu nebo zlata a zpravidla jsou vhodné jen pro měkké rentgenové záření.

Rentgenové teleskopy 1. generace neposkytují tedy přímo zobrazení v rentgenovém oboru spektra. V řadě případů – např. při pozorování bodových zdrojů – to zcela postačuje; snažit se o zobrazení by tam nemělo smyslu a určení intenzity, popřípadě spektra zdroje je zcela dostatečným výsledkem. Fokusace záření na malou plochu ohniskového počítače (který tak může být miniaturních rozměrů) je i tak velmi výhodná ve srovnání s použitím plošného detektoru bez optiky. Miniaturní ohniskový detektor má totiž podstatně lepší vlastnosti než velkoplošné detektory, zejména co se týče rušivého vlivu vlastních pulsů počítače a pozadí od kosmického záření a částic. Miniaturizace detektoru umožňuje kromě toho použití proporcionálního plynového počítače

s velmi tenkým okénkem, popřípadě polovodičového detektoru nebo kanálkového násobiče. Zvýšení poměru signál/šum umožňuje pozorovat podstatně slabší zdroje, než je možné u velkoplošných detektorů. K získání stejné citlivosti postačí totiž rentgenový dalekohled s efektivní plochou objektivu rovnající se polovině druhé odmocniny efektivní plochy plošného počítače. Např. objektiv s efektivní plochou pouhých 50 cm^2 (odpovídá to průměru zhruba 20 cm) má v kombinaci s malým ohniskovým detektorem stejnou citlivost jako velkoplošný počítač s efektivní plochou $10\,000 \text{ cm}^2$. Použijeme-li v ohnisku proporcionální či polovodičový detektor, můžeme amplitudovou analýzou získávat i hrubá energetická spektra rentgenových zdrojů. Objektivy rentgenových dalekohledů 1. generace mají pouze jednu funkční plochu; téměř výlučně to bývá paraboloid. Vzhledem k požadavku malých dopadových úhlů se však v rentgenové astronomii používá část paraboloidu daleko od ohniska. Proto má takový objektiv aberace a nelze jím získat lepší úhlové rozlišení než asi $1'$.

Rentgenové dalekohledy 2. generace mají jako optický člen dokonalý objektiv bez výrazných aberací, který musí sestávat nejméně ze dvou funkčních ploch. Nejčastěji to bývá kombinace paraboloid/hyperboloid, lze však použít i kombinaci paraboloid/elip-



Obr. 2. Rentgenový zrcadlový objektiv typu paraboloid/hyperboloid.

soid. Za použití dnešní špičkové optické techniky při výrobě objektivu lze získat úhlové rozlišení až $1''$. Aby bylo plně využito, nevystačíme však v ohnisku s jednoduchým detektorem, jako tomu bylo u dalekohledů 1. generace, ale nutno volit složitější zařízení pro záznam a přenos obrazu. Nejčastěji to je zobrazující proporcionální počítač (oproti normálnímu má více anodových drátů, takže dává prostorové rozlišení) nebo kanálková destička (skládá se z velkého množství kanálkových násobičů) s luminoforem. Kanálková destička převádí rentgenový obraz na obraz elektronový, který je luminoforem přeměněn na obraz vizuální. Ten je pak televizní technikou přenášen k Zemi. Rentgenový film lze užít jen tehdy, jestliže je zaručen návrat na zemský povrch, tedy hlavně při pilotovaných letech.

2. Sluneční rentgenová astronomie

Sluneční část rentgenové astronomie se rozvíjí již téměř 30 let. Velký krok vpřed udělala zejména v posledních letech. Protože je Slunce poměrně silným zdrojem rentgenového záření, nesnažíme se u přístrojového vybavení o dosažení co největší účinné plochy, ale spíše o dosažení vysokého úhlového rozlišení. V počátcích sluneční rentgenové astronomie šlo především o měření celkového toku záření z celého slunečního disku za použití jednoduchých detektorů; teprve později došlo k získání prvních rentgenových snímků Slunce dírkovými komorami a později i rentgenovými dalekohledy 2. generace. I když má měření celkového toku slunečního rentgenového záření i nadále svůj význam při studiu slunečních erupcí a při prognózách sluneční aktivity, budoucnost bude patřit převážně výkonným rentgenovým teleskopům.

Zatím nejdokonalejší materiál z oblasti sluneční rentgenové astronomie představují výsledky získané rentgenovým dalekohledem na palubě pilotované orbitální stanice Skylab. Přístrojem o průměru 31 cm o ohniskové vzdálenosti 213 cm se podařilo získat na 35 000 snímků Slunce v oboru délky vlny 0,2–6 nm s úhlovým rozlišením 2". Záběry byly pořizovány na film a astronauty dopraveny k vyhodnocení na zemský povrch. Na měření celkového toku slunečního záření se podíleli i naši odborníci – detektory naší výroby startovaly na družicích Interkosmos 1, 4, 7, 11 a 16.

Rentgenové záření Slunce pochází jednak z nejvyšší vrstvy sluneční atmosféry – koróny, jednak ze slunečních erupcí. Ukázalo se, že sluneční koróna má v rentgenovém oboru velmi členitou strukturu, která je z převážné části způsobována magnetickým polem nutícím koronální plazmu formovat se podle jeho siločar. Většina těchto siločar je uzavřených (tj. vychází a končí na slunečním povrchu), a plazma je tedy rozdělena v uzavřených smyčkovitých strukturách o rozměrech od několika tisíc do několika set tisíc km. Celkový rentgenový zářivý tok klidného Slunce činí přibližně $6 \cdot 10^{20}$ W a při velkých erupcích může stoupnout až na 10^{25} W. Připomeňme, že celkově – tj. na všech vlnových délkách – vyzařuje Slunce $4 \cdot 10^{26}$ W.

Na rentgenovém Slunci (Slunci, jak je pozorujeme v rentgenovém oboru) rozlišujeme pět hlavních skupin útvarů, a to koronální díry, velké struktury, aktivní oblasti, jasné body a erupce. Rentgenová emise sluneční koróny je převážně kvazitermálního charakteru; proto více září oblasti s vyšší teplotou.

Nejjasnějšími oblastmi na rentgenovém Slunci jsou horké koronální struktury v aktivních oblastech – stručně jim budeme říkat aktivní oblasti. Září v nich horká a hustá plazma překrývající místa se silným magnetickým polem (10^{-2} T i více). Teplota v nich dosahuje $2,5 \cdot 10^6$ K, elektronová hustota $7 \cdot 10^{15}$ m⁻³. Rentgenový zářivý tok průměrné aktivní oblasti je asi $8 \cdot 10^{18}$ W; celkový příspěvek všech aktivních oblastí na Slunci k jeho rentgenové luminozitě pak asi $8 \cdot 10^{19}$ W. Charakteristická plocha jedné aktivní oblasti činí $2 \cdot 10^{15}$ m².

Velké struktury zakrývají značnou část rentgenového Slunce mimo aktivní oblasti. Jejich korelace s rozložením fotosférických magnetických polí ukázala, že jejich smyčky spojují oblasti opačných magnetických polarit. Velké struktury patrně souvisejí se zaniklými aktivními oblastmi, jejichž magnetická pole byla „rozmazána“ během něko-

lika slunečních otáček. Jejich charakteristická plocha činí $5 \cdot 10^{18} \text{ m}^2$, teplota $1,6 \cdot 10^6 \text{ K}$, elektronová hustota $8 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-3}$ a celkový rentgenový zářivý tok $5 \cdot 10^{20} \text{ W}$.

Koronálními dírami nazýváme ta místa sluneční koróny, která zdánlivě v rentgenovém oboru nezáří a na snímcích jsou tedy tmavá. Ve skutečnosti rentgenová emise vzniká i tam, je ale o 1 až 3 řády slabší než emise z okolních struktur. Zatímco např. aktivní oblasti září převážně ve vlnových délkách kratších než 4 nm, je tomu u koronálních děr právě naopak a lze je tedy v emisi pozorovat jen ve velmi měkkém rentgenovém či ultrafialovém záření. Vzhledem k mnohem větším rozměrům (charakteristická plocha $5 \cdot 10^{17} \text{ m}^2$) je celková rentgenová emise z koronální díry srovnatelná s emisí aktivní oblasti. Na rozdíl od aktivních oblastí a velkých struktur, které představují konfigurace uzavřených smyček siločar magnetického pole, souvisí koronální díry s oblastmi, v nichž magnetické pole ze slunečního povrchu diverguje. Je pravděpodobné, že právě díky této divergenci jsou právě koronální díry nejmohutnějším zdrojem slunečního větru. Teplota v koronálních dírách je proti ostatním útvarům na rentgenovém Slunci velmi nízká – $1,3 \cdot 10^6 \text{ K}$, stejně tak i elektronová hustota – $2,2 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-3}$. Rentgenový zářivý tok průměrné koronální díry činí $3 \cdot 10^{18} \text{ W}$.

Pozoruhodným jevem na rentgenovém obrazu Slunce jsou jasné body – místa zvýšené emise, neshodující se se žádnou z aktivních oblastí. Ve srovnání s ostatními útvary mají jen malou charakteristickou plochu – $5 \cdot 10^{13} \text{ m}^2$ a normálně jich lze na slunečním disku najít asi 100. Jsou rozloženy téměř spojitě, výjimkou je jen jejich nepřítomnost v aktivních oblastech – je to však způsobeno pozorovacím efektem, protože v aktivních oblastech jejich emise splývá s celkovou emisí oblasti. Za předpokladu, že skutečná hustota jasných bodů v oblasti koronálních děr (kde je jejich pozorování nejsnazší) je reprezentativní pro celý sluneční kotouč, je na slunečním povrchu v libovolném okamžiku okolo 500 těchto bodů; přitom však celkem zabírají pouze asi 1 % plochy. Životnost jasných bodů bývá jen asi 8 hodin; někdy však může dosáhnout až 2 dní. Asi u jedné desetiny jasných bodů byly pozorovány změny povrchové jasnosti až o řád v rozpětí několika minut. Podobnost struktury s aktivními oblastmi a souvislost s oblastmi bipolárních magnetických polí naznačují, že jasné body by mohly být jakýmsi miniaturními aktivními oblastmi; proti tomu však zase svědčí jejich spojitě rozložení po slunečním disku. Teplota jasných bodů dosahuje $1,6 \cdot 10^6 \text{ K}$, elektronová hustota $3,8 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-3}$ a rentgenový zářivý tok průměrného jasného bodu činí $1 \cdot 10^{16} \text{ W}$ (při 500 bodech na Slunci je to celkem $5 \cdot 10^{18} \text{ W}$).

Erupce představují prudký vzrůst slunečního rentgenového záření. Zatímco u všech ostatních rentgenových struktur se teplota pohybuje mezi $1,3 \cdot 10^6 \text{ K}$ a $2,5 \cdot 10^6 \text{ K}$, dosahuje u erupcí 10^7 K , rovněž elektronová hustota docílí rekordní hodnoty 10^{17} m^{-3} . Buď je materiál v koróně při erupci vysoce stlačen, nebo se na erupci podílí chromosférická hmota. Druhá možnost je vzhledem k poměrně velkým rozměrům eruptivních oblastí (charakteristický rozměr $2 \cdot 10^7 \text{ m}$) pravděpodobnější. Rentgenový zářivý tok průměrné erupce činí $2 \cdot 10^{20} \text{ W}$. Záření erupcí může mít kvazitermální nebo netermální charakter; kvazitermální záření je obvykle měkké a časově delší než záření netermální.

Sluneční rentgenová astronomie má – jak víme – souvislost se stelární rentgenovou astronomií. Díky rostoucí citlivosti přístrojů můžeme dnes např. studovat rentgenovou

emisi korón blízkých hvězd, což nám může pomoci při poznání fyzikálních procesů probíhajících v koróně našeho Slunce a naopak. Fyzikální zákony pro vznik rentgenového záření zůstávají stejné, ať jde o Slunce nebo o hvězdy – ostatně i naše Slunce je hvězdou a každá z hvězd je pro své okolí Sluncem.

3. Stelární rentgenová astronomie

První hvězdný zdroj rentgenového záření byl objeven teprve v roce 1962 a ještě v roce 1970 před startem první ryze rentgenové stelární družice SAS-1 (Uhuru) jsme znali pouze 35 zdrojů kosmického rentgenového záření; později jejich počet prudce vzrostl a v době psaní tohoto příspěvku bylo již zaregistrováno okolo 400 zdrojů. Vzhledem k tomu, že v současné době pracuje na okolozemské oběžné dráze celá řada družic věnovaných rentgenové astronomii, je zcela zřejmé, že tento rychlý vzrůst potrvá i v příštích letech.

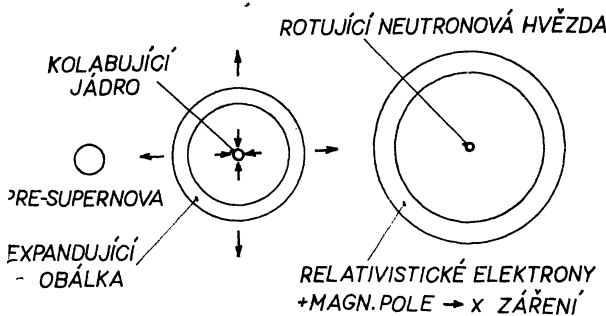
Nejprve několik slov k označování rentgenových zdrojů. V počátcích rentgenové astronomie, kdy byl počet známých zdrojů nepatrný, se začalo používat označení sestávajícího ze zkratky souhvězdí, písmene X a pořadového čísla zdroje v tomto souhvězdí. Např. Cyg X-1 značí první objevený rentgenový zdroj v souhvězdí Labutě. Dnes toto značení přetrvává jen u neznámějších zdrojů a normálně se zdroje označují podle vzoru katalogu 3U, který vyšel v roce 1974 a shrnoval zatím zpracované výsledky družice SAS-1. Tam pak značení odpovídá poloze zdroje na nebeské sféře – např. 3U 1653 + 35 je zdroj s rektascenzí $16^{\text{h}}53^{\text{m}}$ a deklinací $+35^{\circ}$. Zdroje objevené po roce 1974 (3U katalog obsahoval údaje o 161 objektech) se označují zcela analogicky, jen na počátku místo zkratky 3U stojí písmeno nebo několik písmen symbolizujících družici nebo skupinu rentgenových astronomů, kteří zdroj objevili. Nejčastěji to je A (symbolizuje britskou družici Ariel 5) nebo MX (zdroje objevené skupinou na Massachusettském technologickém institutu). V poslední době se objevila ještě jedna novinka – pokud je k počáteční zkratce ještě připojeno písmeno B, jde o vybuchující rentgenový zdroj (z anglického burster).

Kosmické rentgenové zdroje dělíme do 2 hlavních skupin: na zdroje galaktické a mimogalaktické. Podíl galaktických zdrojů na celkovém počtu je odhadován na 60%; je jich tedy známo více než zdrojů mimogalaktických. Galaktické zdroje leží v pásu podél galaktického rovníku a mají rentgenové zářivé toky mezi 10^{29} W a 10^{31} W; mimogalaktické zdroje se ke galaktickému rovníku nekumulují a mají vesměs vyšší zářivý tok – od 10^{32} W do 10^{38} W.

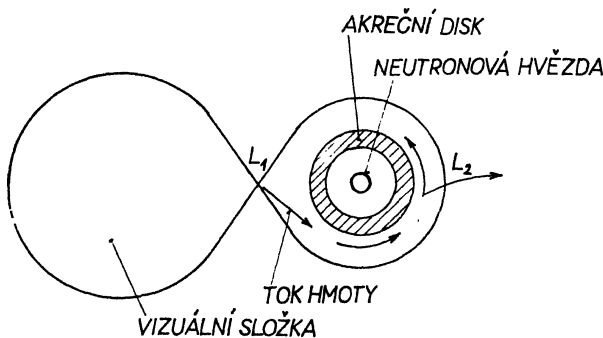
Jak se ukázalo, nejsou kosmické rentgenové zdroje neměnné a nelze se tedy spokojit s jediným jejich zmapováním; naopak pozorování je třeba provádět soustavně. Dnes totiž víme, že nejméně 74 zdrojů je proměnných dlouhodobě (tj. dny a více) a nejméně 40 zdrojů krátkodobě (minuty a méně).

Mimořádný význam má dnes identifikace rentgenových zdrojů s vizuálními, s rádiovými nebo s infračervenými objekty na obloze. Až donedávna nebyly polohy většiny zdrojů známy příliš přesně, a tak byla tato identifikace komplikovanou záležitostí. Přesto však se zatím podařilo 164 zdrojů bezpečně ztotožnit a získat tak unikátní možnost pozorovat tyto objekty simultánně v několika spektrálních oborech současně. Byla

navržena celá řada dalších identifikací; ty však zatím nelze pokládat za zcela prokázané. Identifikace rentgenových zdrojů nám také velmi názorně říká, které objekty září v rentgenové oblasti spektra. Ve skupině galaktických zdrojů bylo dosud bezpečně identifikováno 78 objektů, z toho 17 s dvojhvězdami, 12 s pozůstatky supernov, 5 s kulovými hvězdokupami, 2 s eruptivními hvězdami, 10 s proměnnými hvězdami jiných typů, 3 s normálními hvězdami ve sluneční blízkosti a 6 s novami. Velký význam mají rentgenové zdroje ve dvojhvězdách, kterým říkáme binární nebo kompaktní X-zdroje. S velkou pravděpodobností můžeme totiž říci, že tyto objekty tvoří největší skupinu galaktických zdrojů. V nízkých galaktických šířkách leží totiž nejméně 50 objektů, které jsou proměnné s periodami řádově dny a s jedinou výjimkou sdružují všechny takové neidentifikované rentgenové zdroje jasnější, než je mez pro zjištění proměnnosti. Téměř určitě to jsou další galaktické zdroje binárního charakteru. Rentgenová emise v těchto objektech vzniká dopadem (akrecí) hmoty přetékající z jedné složky dvojhvězdy na druhou (složkou hmotu přijímající může být neutronová hvězda, černá díra či bílý trpaslík). Přetékající hmota se kolem degenerované složky formuje do disku, dosahuje vysoké



Obr. 3. Model vzniku rentgenového záření synchrotronovým mechanismem v pozůstatku supernovy.



Obr. 4. Model binárního rentgenového zdroje s akrečním mechanismem.

teploty a září v rentgenové oblasti. Rentgenová astronomie nám tak poskytuje unikátní možnost pozorovat objekty jinak výzkumu nepřístupné; takovými objekty jsou právě černé díry či neutronové hvězdy. Binární rentgenové zdroje (přesněji řečeno jejich optické složky) se ve vizuálním oboru za určitých podmínek projevují jako proměnné hvězdy. Umožňuje to výzkum vlastností rentgenových zdrojů i nenáročným pozorová-

ním ve vizuálním oboru. Z chování optického protějšku – proměnné hvězdy na archivních deskách v minulých desetiletích lze usuzovat na chování rentgenového zdroje v minulosti. Ve skupině mimogalaktických rentgenových zdrojů bylo dosud jistě identifikováno 86 objektů, z toho 32 s galaktickými kupami, 5 s rádiovými galaxiemi, 2 s normálními galaxiemi, 14 se Seyfertovými galaxiemi a 3 s kvasary.

Věnovat se podrobněji všem druhům rentgenových zdrojů není v rámci možnosti článku do časopisu. Podívejme se proto blíže alespoň na nejzajímavější objevy, které v posledních letech – spíše však v posledních měsících – upoutaly pozornost astronomického světa. Významnou měrou k nim přispěly nové rentgenové družice SAS-3, ANS a Ariel 5 vypuštěné na okolozemskou oběžnou dráhu v letech 1974 a 1975. Jde o ztotožnění rentgenových zdrojů s kulovými hvězdokupami, objev vybuchujících rentgenových zdrojů, pozorování celé řady silných přechodných zdrojů a ztotožnění několika z nich s klasickou vizuální novou.

S kulovými hvězdokupami – které tvoří kulové haló kolem naší Galaxie a jsou věkem 10 až 15 miliard let jejími nejstaršími útvary – bylo doposud bezpečně identifikováno 5 rentgenových zdrojů; některé další identifikace lze pokládat za velmi pravděpodobné. Kulové hvězdokupy nejsou v rentgenovém oboru konstantní, ale mění intenzitu v rozmezí 1 : 2 až 1 : 5 v periodách řádově týdny a měsíce. Od kulové hvězdokupy NGC 6624 byly navíc zjištěny velmi intenzivní rentgenové záblesky se specifickým průběhem – tok rentgenového záření se během méně než 0,5 s zvýší zhruba třicetkrát; pokles pak je pozvolnější a trvá 10 s. Rentgenovou emisí kulových hvězdokup způsobuje možná akrece hmoty na obří černou díru v jádře, jejíž hmotnost je stotisíckrát až tisíckrát větší než hmotnost Slunce. Jiné teorie předpokládají větší množství malých relativistických objektů v hvězdokupě.

Rentgenové zdroje ve hvězdokupách souvisejí pravděpodobně s nově objevenou kategorií vybuchujících rentgenových zdrojů. Známe jich dnes již 26 a jejich vlastnosti (především krátkodobé opakující se záblesky) je zcela odlišují od ostatních typů. Zatím nejpresnější údaje máme k dispozici o skupině pěti těchto objektů v oblasti souhvězdí Štíra a Střelce. U čtyř z nich se rentgenové výbuchy opakují se středním intervalem 0,18, 0,20, 0,55 a 1,46 dne; pátý zdroj má mezi pulsy střední interval pouhou 1 minutu. Výbuchy jsou nepravidelné (což vylučuje zákrytový nebo rotační mechanismus jejich vzniku) a v některých obdobích nejsou přítomny vůbec. Dosud byly zveřejněny dvě hypotézy vysvětlující chování vybuchujících zdrojů. První z nich předpokládá nestabilitu v plazmě v magnetosféře neutronové hvězdy – složky dvojhvězdného systému; vlastní rentgenová emise pak vzniká akrečním mechanismem jako u normálních binárních zdrojů. Druhá hypotéza vysvětluje vybuchující zdroje dopady hmoty na obří černou díru v jádře kulové hvězdokupy a spojuje tedy obě skupiny rentgenových zdrojů v jeden celek. Pro druhou hypotézu svědčí skutečnost, že se s velkou pravděpodobností podařilo 3 z 26 vybuchujících zdrojů identifikovat s kulovými hvězdokupami a ostatní buď leží poblíž galaktického centra (a může tedy jít o neviditelné kulové hvězdokupy), anebo jejich poloha není pro identifikaci ještě dostatečně přesně známa.

Další velmi významnou skupinu rentgenových zdrojů představují přechodné zdroje. Jejich chování v rentgenovém oboru připomíná chování klasických nov ve viditelném světle; proto se často nazývají X-novami. Dnes jich známe již 20, z toho 14 jich bylo

objeveno z palub nových rentgenových družic po roce 1974. Od krátkého vzplanutí v trvání kratším než 1 hodina se přes skupinu krátkodobých přechodných zdrojů (v trvání řádově 10 dní) dostáváme až ke skupině dlouhodobých přechodných zdrojů zářících po 100 dní i více. Zajímavé je, že v celé řadě případů se přechodné rentgenové zdroje vůbec staly v daný čas jedněmi z nejjasnějších objektů rentgenového nebe. Vyhodnocení dat z rentgenových družic trvá vždy nějakou dobu a tak než se zpráva o objevu nového přechodného zdroje dostane na Zemi do rukou astronomům, může být na zachycení vzestupu jasnosti případného optického protějšku X-novy již pozdě. Zde pak přijdou ke slovu archivy snímků hvězdné oblohy, které existují a jsou za příznivého počasí denně doplňovány na některých hvězdárnách. Tak bylo možné např. po objevu silného přechodného zdroje A 0620-00 (který se v srpnu 1975 stal vůbec nejjasnějším kosmickým rentgenovým zdrojem) najít na archivních deskách vzestup jasnosti i jeho optického protějšku – novy Monocerotis 1975. I některé „normální“ rentgenové zdroje, jako např. Cyg X-1 a Aql X-1, vykazují někdy výrazné přechody v trvání dní až měsíců. Jejich jasnost v rentgenovém oboru se přitom mění až dvacetkrát. Nelze vyloučit, že binární zdroje a přechodné zdroje spolu úzce souvisejí a jsou fyzikálně příbuzné.

4. Závěr

Dosažené výsledky v oblasti rentgenové astronomie jak stelární, tak i sluneční přesvědčivě dokazují velký význam, jaký má tento nový obor astronomie v současné době. Je to rovněž nejlepší záruka dalšího rozvoje rentgenové astronomie v příštích letech.

Důležitá je návaznost a koordinovanost výzkumů mezi astronomií rentgenovou a klasickou. Zatímco u sluneční rentgenové astronomie to bylo samozřejmé od počátku, neměly v počátku rentgenové stelární astronomie mapy nebe v oboru rentgenovém a vizuálním téměř nic společného. To však je již za námi; 164 ztotožněných rentgenových zdrojů je toho tím nejlepším důkazem. A až budou vyhodnoceny údaje z dnes pracujících družic, které jsou schopny určit polohu zdroje mnohem přesněji než jejich předchůdkyně, sblíží se rentgenová astronomie s klasickou vizuální nepochybně ještě více. Koordinovaný výzkum identifikovaných rentgenových zdrojů v rentgenovém, vizuálním, popř. i v rádiovém a ultrafialovém oboru se tak stane jedním z nejdůležitějších úkolů moderní astrofyziky.

V příštích letech se do vesmíru bude dostávat stále více rentgenových dalekohledů, zejména pro stelární výzkumy. V daný okamžik totiž může rentgenový dalekohled zkoumat jen jediný zdroj – a těch nyní známe již 400 a jejich počet i nadále rychle vzrůstá. Stejně tak soustavná prohlídka celé oblohy a soustavné sledování Slunce v rentgenovém oboru mohou nemalou měrou přispět k pochopení velmi mnoha fyzikálních procesů probíhajících ve vesmíru, a to i těch, které by nebylo možno zkoumat metodami klasické astronomie. Věříme proto, že budoucnost rentgenové astronomie bude ještě bohatší, než jaká byla její minulost a jaká je její současnost.