

**České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní**

**Czech Technical University in Prague
Fakulty of Mechanical Engineering**

RNDr. René Hudec, CSc.

X-Ray telescopes: A Window into the Universe

**Rentgenové dalekohledy: okno do
vesmíru**

Summary

The achievements in astrophysics over the past decades are closely related to the opening of the new observing windows using X-rays and relevant X-ray telescopes and X-ray lenses. In this talk the various type of astronomical X-ray telescopes will be presented and discussed together with laboratory applications, with emphasis on grazing incidence telescopes and on works done by the author and his collaborators in the Czech Republic. Numerous X-ray mirrors have been designed and developed, including those flown in space. Various technologies have been developed and tested. The recent focus is on development and tests of novel technologies suitable for future large light but precise X-ray mirrors for large space X-ray telescopes such as XEUS of ESA or Constellation X by NASA as well as on developments of novel wide-field X-ray telescopes of Lobster-Eye type. Pictures taken by past and recent astronomical telescopes will be shown and discussed in order to show the importance of these telescopes in recent and future astrophysics.

Souhrn

Pokrok astrofyziky minulých desetiletí byl do značné míry podmíněn otevřením nového pozorovacího okna do vesmíru v oboru rentgenového záření a s tím souvisejícím vývojem rentgenové optiky a rentgenových dalekohledů. V této přednášce projednám různé typy astronomické rentgenové optiky a rentgenových dalekohledů, včetně laboratorních aplikací, s důrazem na optiku a dalekohledy tečného dopadu a na práce autora a jeho spolupracovníků v České republice. Byly navrženy a vyvinuty četné rentgenové objektivy a některé byly použity ve vesmíru. Byly vyvinuty a testovány různé technologie. Současné práce jsou soustředěny na vývoj a testy inovovaných technologií vhodných pro budoucí velké, lehké a přesné rentgenové dalekohledy, jako jsou projekty ESA XEUS a Constellation X NASA, a na vývoj nové širokoúhlé rentgenové optiky typu račí oko. V přednášce budou prezentovány a diskutovány obrázky pořízené minulými a současnými rentgenovými dalekohledy s cílem doložit vědecký význam rentgenových teleskopů při studiu a pochopení vesmíru.

Klíčová slova:

Záření rentgenové, Optika rentgenová, Optika tečného odrazu, Dalekohledy rentgenové

Keywords:

X-rays, X-ray optics, grazing incidence optics, X-ray telescopes

ISBN:

Obsah

1. Úvod	6
2. Rentgenová optika – hlavní součást rentgenových dalekohledů	6
2.1. Nejčastěji používané reflektivní rentgenové objektivy	7
2.1.1. Wolterova optika	7
2.1.2. Kuželová aproximace Wolterovy optiky	7
2.1.3. Kuželová, elipsoidální a paraboloidální optika	7
2.1.4. Kirkpatrick-Baezova optika	8
2.1.5. Optika normálního dopadu	8
2.1.6. Optika typu račí oko	8
3. Rentgenové dalekohledy – okno do vesmíru	8
4. Historie astronomických rentgenových dalekohledů tečného dopadu v ČR	9
4.1. První kroky	9
4.2. Použité technologie	10
5. Současné aktivity a plány do budoucna	11
5.1. Teleskopy typu račí oko (velmi širokouhlá rentgenová optika)	11
5.2. Laboratorní rentgenová optika a rentgenové mikroskopy	13
5.3. Kosmický dalekohled XEUS	13
5.4. Constellation X	15
6. Rentgenové dalekohledy s multivrstvy	15
7. Závěr	15
Poděkování	16
Citace literatury	16
Životopis autora	19

1. Úvod

Vývoj rentgenových dalekohledů s důrazem na replikované objektivy tečného dopadu má u nás dlouholetou tradici. Návrh našich rentgenových objektivů proběhl již koncem 60. let a první z nich spatřil světlo světa před přibližně 35 lety v roce 1970. Naše rentgenové objektivy byly zatím použity v 8 kosmických experimentech (Hudec et al., 1999). Dnes je těžiště prací ve vývoji inovované rentgenové optiky pro budoucí kosmické projekty, zejména jde o soustavy se širokým zorným polem a o inovační ultralehkou rentgenovou optiku pro budoucí velké kosmické rentgenové teleskopy.

Zobrazující rentgenové teleskopy dosahují podstatně lepšího poměru signál/šum než experimenty bez optiky. Tento fakt je podstatný při snahách o zachycení co nejslabších zdrojů, což je při současném trendu v astrofyzice velmi důležité. Použití rentgenové optiky navíc umožňuje zobrazování, přesnou lokalizaci, fotometrii, spektroskopii, studia proměnnosti a určování fyzikálních parametrů oblastí emitujících rentgenovou emisi (teplota, elektronová hustota ap.). Rentgenová optika představuje přirozenou a klíčovou součást řady kosmických projektů, jak jsou např. družicové observatoře EXOSAT, ROSAT, Einstein, Fobos, AXAF-Chandra, XMM-Newton, ABRIXAS, BeppoSAX, ASCA ap. Řadu aplikací nalézá rentgenová optika též v laboratoři, například ve fyzice plasmy, laserové plasmy, biologii, krystalografii ap.

2. Rentgenová optika – hlavní součást rentgenových dalekohledů

Pod rentgenovou optikou jsou často chápány fyzikálně i technicky odlišné systémy a prvky. Nebude proto na škodu si připomenout aspoň základní dělení typů rentgenové optiky:

- rentgenová optika difraktivní (Fresnelovy čočky, dírkové kamery) - ve vesmíru nalézá jen malé uplatnění s ohledem na malé apertury
- rentgenová optika refraktivní: velmi omezená aplikace, zejména ve vesmíru
- rentgenová optika reflektivní, založena na totálním odrazu (optika tečného dopadu)
- rentgenová optika reflektivní, založena na normálním dopadu a využití multivrstev

Tato přednáška je zaměřena na rentgenové dalekohledy s optikou reflektivní tečného dopadu, alternativní typy rentgenové optiky jsou v ČR studovány jinými autory (např. Hrdý et al. 2001).

2.1. Nejčastěji používané reflektivní rentgenové objektivy pro rentgenové dalekohledy

2.1.1. Wolterova optika

Wolterova optika má zejména v kosmu široké a časté použití (ROSAT, EXOSAT, Saljut 7, Fobos, XMM - Einstein, AXAF - Chandra, BeppoSAX ...). Tato optika je založena na dvojité reflexi na dvou površích - je to podmínka pro vysoce kvalitní zobrazení, vyplývající z Abbeho sinové podmínky. V závislosti na kombinaci a orientaci odrazových ploch existuje několik verzí (tzv. Wolterovy systémy I, II, III), avšak nejčastěji je používaná optika typu Wolter I (paraboloid + hyperboloid). Pro laboratorní aplikace se používá modifikace pro zobrazení z obrazové roviny v konečné vzdálenosti - jde o nahrazení paraboly elipsou. Této modifikaci se říká Wolterův mikroskop.

2.1.2 Kuželová aproximace Wolterovy optiky

Wolterovo uspořádání lze aproximovat na výrobu méně pracnými kuželovými profily. Taková zrcadla mají horší kvalitu zobrazení, avšak dosahují v řadě případů větší sběrné plochy zejména proto, že jejich vrstvy mohou být vesměs tenčí. Kuželové systémy často představují optiku s vysokou sběrnou plochou, zejména pokud je o soustavy vytvářené ohýbáním plochých folií (tzv. foliové teleskopy). Příkladem je dánský teleskop SODART, již přes 15 let marně čekající na vypuštění ruského satelitu Rentgen-Spektr-Gama.

2.1.3 Kuželová, elipsoidální a paraboloidální optika

Jde o rentgenová zrcadla jen s jedním odrazem nalézající uplatnění většinou v laboratoři jako kolimační, fokusující nebo zobrazující systémy.

2.1.4 Kirkpatrick-Baezova (KB) optika

Tato konfigurace nalézá většinou uplatnění v experimentech nevyžadujících velkou sběrnou plochu (sluneční kosmické experimenty, laboratoř). V současnosti však existují návrhy na aplikaci velkých KB modulů též v kosmických stelárních experimentech.

2.1.5 Optika normálního dopadu

Tato optika vyžaduje aplikaci multivrstev na povrchu odražejících ploch, umožňující reflexi rentgenového záření za normálních úhlů. Použití multivrstev je ovšem spojeno s úzkým pracovním spektrálním oborem. V minulosti byla používána zejména v kosmických slunečních experimentech (TEREK Phobos, TEREK KORONAS...) a v laboratorních aplikacích.

2.1.6 Optika typu račí oko

Tato optika byla navržena v 70. letech pro zobrazení s velmi velkým zorným polem, avšak dosud nedošlo k její aplikaci v kosmickém experimentu. Dnes již však existují první prototypy a to jak pro Schmidtovo (Schmidt, 1995), tak i pro alternativní Angelovo (Angel, 1998) uspořádání a kromě astronomické aplikace (Hudec et al. 2006c, Sveda et al. 2006a) se zvažuje i aplikace v laboratoři, například ve fyzice plazmatu (Švéda et al., 2006b).

3. Rentgenové dalekohledy - nové okno do vesmíru

Mezi vesmírné objekty, které pozorují kosmické rentgenové dalekohledy, patří neutronové hvězdy, kandidáti na černé díry, pozůstatky supernov, kvazary, aktivní galaktická jádra, a horký plyn v galaxiích a jejich kupách. Rentgenové teleskopy hrají významnou roli při řešení celé řady problémů současné fyziky, astronomie, astrofyziky a kosmologie, například

- chování hmoty v extrémních fyzikálních podmínkách, zejména vysoké teploty a tlaku (např. v neutronových hvězdách a černých dírách)
- podstata přenosu energie ve hvězdách
- mechanismus urychlování nabitých částic na velmi vysoké energie
- jaderné reakce ve hvězdách
- rozdělení tmavé hmoty ve vesmíru
- vývoj a konec života hmotných hvězd
- rychlost expanze vesmíru

- vývoj velkých struktur ve vesmíru (galaktických kup a superkup)

Ukázky a další vesmírné objekty dokumentující význam rentgenových teleskopů předvedu v habilitační přednášce doplněné diskusí, proč astronomové potřebují větší a přesnější astronomické rentgenové dalekohledy, podmíněných vývojem nových technologií.

Vesmír v oboru rentgenového záření je navíc, ve srovnání s vesmírem tak, jak ho vidíme ve viditelném světle, velmi proměnný. Na rentgenové obloze pulsuje objekty, jejichž svítivost se mění až stonásobně, a jsou na ní i objekty přechodné, které září jen jednou a někdy jen na velmi krátkou dobu. Proto jsou pro další chápání vesmírných objektů tak cenné i širokoúhlé dalekohledy, v rentgenovém oboru teleskopy typu račí oko, jejichž vývoj je naší specialitou.

4. Historie astronomických rentgenových dalekohledů v ČR

4.1 První kroky

Počátky českého vývoje rentgenových dalekohledů jsou spojeny s kosmickým programem INTERKOSMOS, provozovaným do roku 1989. Veškeré rentgenové zobrazující teleskopy na sovětských kosmických tělesech byly vybaveny naší rentgenovou optikou (výjimkou byla zrcadla normálního dopadu ve speciálním kanálu rentgenového teleskopu TEREK na Fobosu a KORONASu). Později začaly i některé laboratorní aplikace (Pina et al., 1999). V téměř všech případech šlo o replikované objektivy tečného dopadu různých geometrií, typů a uspořádání (Hudec et al., 1999). Pokusme se stručně shrnout zásadní kroky ve vývoji naší rentgenové optiky a rentgenových dalekohledů.

- 1969 první studie
- 1970 první český rentgenový objektiv (Wolter 1, 50 mm)
- 1971 Wolter 1, 80 mm
- 1976 Wolter 1, 115 mm
- 1979 naše rentgenová optika poprvé ve vesmíru (dva teleskopy s objektivy Wolter 50 mm, výšková raketa Vertikal 9)
- 1980 výšková raketa Vertikal 11 (2 teleskopy s objektivy Wolter 50 mm)
- 1981 první velký Wolterův objektiv (240 mm)

- 1981 orbitální stanice Saljut 7, hvězdný rentgenový teleskop RT-4M (Wolter 240 mm, dvojitý složený objektiv)
- 1985 aplikace pro plazmovou fyziku, EH (mikroskopický objektiv elipsoid-hyperboloid) 17 mm, PP (objektiv paraboloid-paraboloid) 20 mm.
- 1987 první vysoce kvalitní rentgenové folie pro foliový rtg teleskop (SODART)
- Fobos 1 sonda k Marsu, rentgenový teleskop TEREK, Wolter 80 mm
- 1989 rentgenový objektiv pro KORONAS I, Wolter 80 mm
- 1990 první rentgenový mikroobjektiv (apertura pod 1 mm)
- 1993 spolupráce s SAO, USA, širokouhlá rtg optika
- 1996 první zkušební modul račí oko, Schmidtova geometrie
- 1997 první zkušební modul račí oko, Angelova geometrie
- 2003 první prototypy inovační technologie GTF (termální formování skla)
- 2004 první prototypy inovační technologie formování křemíkových desek

Celkově bylo u nás navrženo, vyvinuto a vyhotoveno přes 50 rentgenových objektivů, z nichž se 8 dostalo do vesmíru jako součást rentgenových teleskopů na palubě 4 různých kosmických těles, a velké množství testovacích technologických vzorků.

4.2 Použité technologie

České rentgenové objektivy byly vyrobeny většinou různými obměnami replikačních technologií. V posledních letech se přidaly inovační technologie s těžištěm na formování skla a křemíkových desek. V roce 1970 jsme začali používat naši první masivní replikační technologii. Byla založena na silnostěnné galvanoplastice leštěných skleněných matic, síla stěny takto vyráběných objektivů byla 5 až 10 mm masivního niklu. Autory této první technologie byli Dr Ivan Šolc a Ing. Vilém Pražák, autory dalších technologií pak autor tohoto článku společně s řadou spolupracovníků (Dr. L. Svátek, Dr. A. Inneman, Doc. Ing. L. Pína a další). Vývoj prvních našich rentgenových objektivů byl inicializován Dr. B. Valníčkem. V roce 1978 jsme již pod vedením autora tohoto článku začali studovat odlišnou replikační technologii založenou na epoxydové replikaci skleněných matic pokrytých napařenou zlatou vrstvou. Od roku 1980 jsme pracovali na galvanoplastické technologii kombinující vnitřní galvanoplastickou vrstvu

s vnějším epoxydovým pláštěm. Od roku 1981 je tato technika dále modifikována aplikací různých forem uhlíkového vlákna. V roce 1982 byly poprvé vyvinuty velmi tenkostěnné galvanoplastické objektivy vhodné k použití v mnohanásobně složených soustavách. Od roku 1983 se zabýváme replikací rovinných matic, zejména s cílem vývoje rentgenových reflexních fólií pro fóliové rentgenové teleskopy (SODART, RENTGEN SPEKTR GAMA) a pro rentgenové optické prvky typu račí oko. V roce 1990 byly vyvinuty první mikroobjektivy s aperturami 1 mm a méně (Pina et al., 1999). V roce 1993 byly vyrobeny první vzorky rovinných zrcadel odrazivých z obou stran pro širokoúhlé soustavy račí oko Schmidtova typu. V roce 1998 se zdařila první replikace prototypu rentgenového objektivu račí oko Angelova typu. Po roce 2000 se přidaly inovační technologie potřebné pro velké kosmické teleskopy s těžištěm na formování skla a křemíkových desek (Hudec et al., 2006b). Ty mají šanci nalézt uplatnění u projektů velkých kosmických rentgenových dalekohledů, jako jsou např. XEUS Evropské kosmické agentury ESA a Constellation X Amerického národního úřadu pro letectví a vesmír NASA. Ale i galvanoplastická replikační technologie byla dále vyvinuta pro potřeby např. velmi přesné replikace integrálních ohniskových systémů optických a IR teleskopů (Schmoll, 2006).

5. Současné aktivity a plány do budoucna

5.1. Teleskopy typu račí oko (velmi širokoúhlá rentgenová optika)

Široce používané Wolterovy dalekohledy mají velmi omezené zorné pole (řádu 1 stupně i méně) a jsou tedy vhodné pro pointovaná pozorování určitých objektů, ale nehodí se pro monitorování a přehlídky oblohy.

Širokoúhlé rentgenové dalekohledy byly navrženy v 70. letech nezávisle Schmidtem (ortogonální uspořádání rovinných reflektorů, Schmidt 1995) a Angelem (soubor kanálků čtvercového průřezu, Angel 1998), avšak nebyly až donedávna zkonstruovány. S tímto druhem rentgenové optiky lze přitom dosáhnout unikátně velkých zorných polí, až 180 stupňů. Výroba soustav typu račí oko je však obtížná. Právě to způsobilo zpoždění mezi teoretickým návrhem račího oka a jeho reálným použitím. Určité řešení je nabízeno replikačním přístupem, alternativou je použití tenkých rovinných skel, popřípadě kanálkových destiček (Inneman et al., 1999). Relativně nedávno jsme dokončili první prototypy rentgenových teleskopů typu račí oko (Hudec et al., 2001a). Střední prototyp Schmidtovy geometrie je tvořen

modulem s dvěma navzájem kolmými řadami skleněných desek odrazivých z obou stran (36 a 42 desek o rozměru 100 x 80 mm). Destičky jsou jen 0.3 mm silné, pokryté zlatem. Zorné pole uvedeného modulu je 6.5 stupně (Inneman et al., 1999). Sestava tvořená větším počtem identických modulů by poskytla mnohem větší zorné pole. Řada miniprototypů založená na skleněných zlacených destičkách rozměru 23 x 23 mm, 0.1 mm silných, o rozestupu 0.3 mm, umožňuje podrobné laboratorní testy a zlepšení úhlového rozlišení až na 1 úhlovou minutu. Sestaveny byly i mikrosystémy (destičky 3 x 3 mm, tloušťka 30 mikronů) a makrosystémy (desky 300 x 300 mm, tloušťka 1,2 mm).

Pro alternativní Angelovo uspořádání (Angel, 1998) je zapotřebí sestavit systém velkého množství malých čtvercových kanálků (průřezu přibližně 1 x 1 mm nebo méně při délce několika desítek mm). To je ještě mnohem náročnější než konstrukce Schmidtova systému. Výsledky naší práce však naznačují, že požadavek Angelovy rentgenové optiky může být vyřešen modifikovanou replikační technologií (Hudec et al. 2000). Zatím jsme zkonstruovali několik Angelových prototypů, a to lineární modul s 47 kanálky průřezu 2.5 x 2.5 mm, 120 mm dlouhými, s ohniskem 1.3 m, dále modul tvaru L s 2 x 18 kanálky, a konečně dvojdimenzionální modul s 5 x 5 kanálky stejného rozměru (Inneman et al., 2000).

Rentgenové teleskopy račí oko nabývají na vědeckém významu zejména po objevu rentgenových dosvitů gama záblesků (GRB) v roce 1997. Odhadovaná četnost je asi 1 denně, avšak s ohledem na předpokládané směřování rentgenové emise do většího prostorového úhlu ve srovnání s emisí gama lze očekávat četnost vyšší. Citlivost teleskopů typu račí oko je pro detekci rentgenových dosvitů dostačující. Rovněž dosahované úhlové rozlišení 1 úhlové minuty znamená podstatné zlepšení - téměř o dva řády - vůči stavu dosahovaného přístroji pro detekci gama záblesků v gama oboru. Je tedy zřejmé, že rentgenové teleskopy typu račí oko mohou podstatnou měrou přispět ke studiu GRB a související statistice (Hudec et al., 2006a). Dalšími objekty pro studium těmito teleskopy jsou rentgenové záblesky (XRF), exploze supernov, vysoce energetické binární zdroje, aktivní galaktická jádra (AGN - active galactic nuclei), blazary a další objekty.

V současné době je v jednání návrh našich rentgenových teleskopů typu račí oko pro čínsko-francouzskou vědeckou družici a pro čínskou rentgenovou družici HXMT. Jsme zapojeni i do mezinárodního projektu LOBSTER RSG.

5.2 Laboratorní rentgenová optika a rentgenové mikroskopy

Pro replikovanou reflektivní rentgenovou optiku existuje kromě astrofyziky celá řada aplikací například ve fyzice plazmatu, jaderné syntéze, biologii, krystalografii ap., s různými geometriemi, s aperturami pod 20 mm a v některých případech dokonce pod 1 mm (rentgenové mikroobjektivy). Jako příklad lze uvést například mikroobjektivy, systémy parabola-parabola, elipsa-hyperbola, Wolterovy objektivy a rentgenové mikroskopy (Pina et al, 2000).

5.3 Kosmický dalekohled XEUS

Projekt Evropské kosmické agentury (ESA) XEUS by se měl stát největším projektem evropské kosmické astrofyziky a současně i největším kosmickým dalekohledem v historii se startem po roce 2016. Půjde o rentgenový dalekohled o čtvercové apertuře 6.4 x 6.4 metrů a ohniskové vzdálenosti 50 metrů (Parmar et al., 2006). Předpokládá se životnost 10 až 25 let. V případě XEUSu máme šanci opravdu unikátní, a to je se podílet přímo na tom nejhlavnějším, totiž optickém systému teleskopu. Jak jsme se k něčemu takovému vůbec dostali? Použitý materiál obřího rentgenového objektivu musí být extrémně lehký, jinak by měl systém obrovskou váhu při uvedené apertuře naplněné statisíci tenkých zrcadlových slupek. A navíc – optika musí zobrazovat s rozlišením pouhé 2 obloukové vteřiny, jinak by se vzdálené slabé objekty (dalekohled bude mít tak vysokou citlivost, že na čtverečním stupni uvidí okolo 5 000 objektů) navzájem slily.

Během let jsme u nás odzkoušeli řadu netradičních a často nových technologií které se zdají mít uplatnění v budoucích projektech. Navíc jsme našli nové partnery ovládající unikátní technologie pro alternativní výrobu ultralehkých kosmických zrcadel jako je třeba formování tenkých skel (Friedrich et al., 2005), kovová skla, lehké keramické materiály či skelný uhlík (Hudec et al., 2001b, Marsch et al., 1997). V poslední době se zaměřujeme na vývoj dvou inovačních technologií v současnosti pokládaných pro XEUS jako nejvíce slibné. Jde o tepelné formování tenkých skel a formování křemíkových desek do přesných optických tvarů (Hudec et al., 2006b). Výsledky českého interdisciplinárního týmu zahrnujícího odborníky z Astronomického ústavu AV ČR, FJFI ČVUT, VŠCHT, FS ČVUT a firem Reflex a ON Semiconductor Czech Republic jsou

celosvětově uznávané. Současná představa ESA je, že by optický systém teleskopu XEUS mělo tvořit asi 640 000 křemíkových desek zformovaných do kuželové aproximace rentgenového objektivu typu Wolter 1. Půjde o první aplikaci křemíkových desek v kosmickém dalekohledu. Jakkoli je tato cesta slibná, je třeba ještě vyřešit řadu souvisejících problémů. Křemíkové desky jsou dnes masově vyráběné pro potřeby polovodičového průmyslu a pozitivem pro jejich použití v kosmické rentgenové optice je jejich nízká specifická hmotnost při vysoce lesklém povrchu mikrodrsnosti řádu pouze 0.1 nm a vysoké homogenitě tloušťky řádu pouze 1 mikrometru při typické tloušťce okolo 0.7 mm. Jejich ohyb do požadovaných optických tvarů je však velmi obtížný.

Přizvání k spoluúčasti na projektu ESA XEUS je významné především v širším kontextu, protože představuje účast na vývoji unikátních a inovovaných technologií, z nichž celá řada jistě nalezne i další aplikace, a slibná je i možnost získání přímých zakázek a kontraktů pro české ústavy i firmy. Tým, který v České republice okolo projektu ESA XEUS a vývoje inovačních technologií pro budoucí velké kosmické rentgenové dalekohledy obecně vzniká, je poměrně rozsáhlý a výjimečně interdisciplinární. Kromě Astronomického ústavu AV ČR (skupina Astrofyziky vysokých energií) se do projektu zapojují i Ústav fyziky plazmatu AV ČR (lehká keramika, plazmatický nástřík), Ústav struktury hornin AV ČR (skleněný uhlík), Vývojová optická dílna AV ČR (sklo), Vysoká škola chemicko-technologická (sklo, lehká keramika, lithium, amorfní kovy), Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT (rentgenové technologie), Ústav experimentální fyziky SAV (amorfní kovy), Fakulta strojní ČVUT (mechanické studie), firma ON Semiconductor Czech Republic (křemíkové desky), hi-tech firma Reflex (formování skla a křemíku, systémy račí oko) a dalších subjekty.

5.4 Constellation X

Neméně ambiciózní je i velký projekt amerického Národního úřadu pro letectví a vesmír NASA Constellation X, v jehož rámci jsou připravovány rentgenové družice vybavené citlivou rentgenovou optikou složenou z tenkých tepelně formovaných skel. Tento vývoj probíhá v Goddardově kosmickém středisku GSFC NASA, jehož dva pracovníci k nám přijeli

v listopadu 2006 se seznámit s vývojem našich technologií a jejich možnou aplikací v projektu Constellation X.

6. Rentgenové dalekohledy s multivrstvami

Klasická rentgenové dalekohledy tečného dopadu jsou multispektrální a pracují v oblasti od viditelného světla až po energie několika, výjimečně až okolo 10 keV. Budoucí astrofyzikální aplikace často vyžadují rozsah až do oblasti tvrdého rentgenového záření řádu desítek keV. Rozšířit energetický rozsah lze jednak snížením dopadového úhlu, jednak (významněji) aplikací multivrstev na odrazivé plochy (Jensen et al. 1994). Tuto technologii jsme též studovali a vyvinuli a změřili příslušné vzorky. Dokonce se nám podařilo vyvinout celosvětově unikátní technologii replikace multivrstev, díky níž lze multivrstvy nanést i dovnitř jinak nepřístupných dutin. Výzkumy potenciálně důležité pro další vylepšování kvality těchto i dalších odrazivých povrchů jsou prováděny v ČR dalšími autory (např. Holý et al., 2001, Pacherová et al., 1993).

7. Závěr

Rentgenové dalekohledy otevřely nové pozorovací okno do vesmíru a přispěly tak k pochopení celé řady vesmírných objektů a v nich probíhajících fyzikálních procesů. Jejich klíčovou součástí je rentgenová optika tečného dopadu používána v kosmických dalekohledech z oboru rentgenové astrofyziky již více než 35 let. Přesto však jsou některé její nové typy stále ještě ve vývojové fázi. Požadavky na budoucí experimenty jsou navíc mnohem vyšší než tomu bylo v minulosti, což vede k potřebě nových a inovovaných technologií a přístupů. Požadavky na optiku budoucích kosmických rentgenových dalekohledů lze shrnout následujícím způsobem.

- optika s vysokou účinností-velmi tenkými a mnohanásobně skládanými objektivy
- objektivy se širokým zorným polem $\gg 1$ deg
- lepší kvalita povrchu (mikrodrsnost < 0.3 nm), úhlové rozlišení řádu úhlové vteřiny, nové technologie
- širší spektrální rozsah - multivrstvy, zobrazování v tvrdém rentgenovém oboru až do 100 keV

Rovněž budoucí laboratorní aplikace vyžadují vyšší zobrazovací kvalitu a vysoké úhlové rozlišení (rentgenové mikroskopy). Tyto potřeby vyžadují vývoj netradičních a nových technologií, zejména:

- superleštící technologie pro dosažení vynikající povrchové kvality, vysokého úhlového rozlišení a vysoké účinnosti
- replikaci multivrstev s cílem dosažení širšího energetického rozsahu (až do 100 keV)
- vývoj velmi velkých apertur (a tedy nových lehkých přesných technologií) s cílem dosažení vysoké detekční citlivosti
- optické soustavy s velmi širokým zorným polem s cílem širokoúhlého monitorování oblohy v rentgenovém oboru spektra

Poděkování

Vývoj nových typů rentgenových dalekohledů byl v minulosti podporován grantem GA ČR č. 106/99/1546. Centrum pokročilých rentgenových technologií, Reflex Praha, bylo v minulosti podporováno grantem MPO ČR FB-C3/29/00. Vývoj tenkých formovaných skel byl podpořen grantem MPO ČR FD-K3/052. Technologie replikace multivrstevnatých rentgenových zrcadel je podpořena grantem MPO FT-TA3/112. Do vývoje rentgenové optiky se zapojila řada kolegů a spolupracovníků z řady pracovišť, jimž patří velké poděkování. Vývoj tenké rentgenové optiky na základě formovaných křemíkových desek není podpořen grantem, zato však nadšením a nezištnou prací řady kolegů a kolegů, kterým patří veliké poděkování. Děkuji vedení i kolegům všech institucí, které se na vývoji rentgenové optiky podílely a podílejí, za jejich podporu, a vedení, představitelům a kolegům z ČVUT a FS ČVUT za jejich podporu této habilitační práce a umožnění přednesení této přednášky.

Citace literatury

Angel, J. R. P., ApJ, 233, 364-373, 1979.

Friedrich, P. et al. Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy II. Edited by Citterio, Oberto; O'Dell, Stephen L. Proceedings of the SPIE, Volume **5900**, 258-265, 2005.

Holý, V.; Stangl, J.; Springholz, G.; Pinczolits, M.; Bauer, G. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Volume 34, Issue 10A, A1-A5, 2001.

Hrdy, Jaromir; Artemiev, Nikolai; Freund, Andreas K.; Quintana, John P. *Proc. SPIE Vol. 4501, 88-98, X-Ray Mirrors, Crystals, and Multilayers*, Andreas K. Freund; Tetsuya Ishikawa; Ali M. Khounsary; Eds. 2001.

Hudec, René; Inneman, Adolf; Pina, Ladislav, *New Century of X-ray Astronomy, ASP Conference Proceedings Vol. 251*. Edited by H. Inoue and H. Kunieda, 542, 2001a.

Hudec, René; Pina, Ladislav; Inneman, Adolf; Brozek, Vlastimil; Chráska, Pavel; Zentko, Anton; Zentková, Mária, *New Century of X-ray Astronomy, ASP Conference Proceedings Vol. 251*. Edited by H. Inoue and H. Kunieda. ISBN: 1-58381-091-9. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2001b.

Hudec, Rene; Pina, Ladislav; Inneman, Adolf, *Proc. SPIE Vol. 3766, p. 62-71, X-Ray Optics, Instruments, and Missions II*, Richard B. Hoover; Arthur B. Walker; Eds., 1999.

Hudec, R.; Pina, L.; Švéda, L.; Inneman, A., in *Gamma-Ray Bursts in the Swift Era*. Edited by S.S. Holt, N. Gehrels, and J.A. Nousek. *AIP Conference Proceedings, Vol. 836*. Melville, NY: American Institute of Physics, 712-715, 2006a.

Hudec, R.; Pina, L.; Semencova, V.; Inneman, A.; Skulinova, M.; Sveda, L.; Mika, M.; Brozek, V.; Kacerovsky, R.; Prokop, J.; Sik, J., *Space Telescopes and Instrumentation II: Ultraviolet to Gamma Ray*. Edited by Turner, Martin J. L.; Hasinger, Günther. *Proceedings of the SPIE, Volume 6266*, 2006b.

Hudec, R.; Simon, V.; Sveda, L.; Pina, L.; Inneman, A., in *Populations of High Energy Sources in Galaxies Proceedings of the 230th Symposium of the International Astronomical Union*, Edited by E. J. A. Meurs; G. Fabbiano. Cambridge: Cambridge University Press, 39-40, 2006c.

Inneman, Adolf; Hudec, Rene; Pina, Ladislav; Gorenstein, Paul, Proc. SPIE Vol. 3766, 72-79, X-Ray Optics, Instruments, and Missions II, Richard B. Hoover; Arthur B. Walker; Eds., 1999.

Hudec, Rene; Pina, Ladislav; Inneman, Adolf V., Proc. SPIE Vol. 4012, p. 422-431, X-Ray Optics, Instruments, and Missions III, Joachim E. Truemper; Bernd Aschenbach; Eds., 2000.

Inneman, Adolf V.; Hudec, Rene; Pina, Ladislav, Proc. SPIE Vol. 4138, p. 94-104, X-Ray Optics, Instruments, and Missions IV, Richard B. Hoover; Arthur B. Walker; Eds., 2000.

Joensen K. et al., SPIE Vol. **2279**, 180, 1994.

← Naformátováno: Odrážky a číslování

Marsch H. et al., Introduction to Carbon Technologies, University of Alicante, ISBN :84-7098-317-4, 1997.

Pacherova, O.; Sourek, Z.; Kub, J., J. Phys. D: Appl. Phys., Volume 26, A173-A176, 1993.

Parmar A. et al., X-ray Observatory, Study preparation activities status report, ESA SCI-A/2006/054/NR, 2006.

Pina, Ladislav; Inneman, Adolf; Hudec, Rene; Arndt, Uli W., Proc. SPIE Vol. 3766, 299-307, X-Ray Optics, Instruments, and Missions II, Richard B. Hoover; Arthur B. Walker; Eds., 1999.

Pina, Ladislav; Inneman, Adolf V.; Hudec, Rene; Arndt, Ulrich W.; Loxley, Neil; Fraser, Graham; Taylor, Mark; Wall, John, Proc. SPIE Vol. 4144, 165-173, Advances in Laboratory-based X-Ray Sources and Optics, Carolyn A. MacDonald; Ali M. Khounsary; Eds. , 2000.

Schmidt, W. K. H., Nucl. Instr. Methods, 127, 285-292, 1975 .

Schmoll, J.; Robertson, D. J.; Dubbeldam, C. M.; Bortoletto, F.; Pina, L.; Hudec, R.; Prieto, E.; Norrie, C.; Ramsay-Howat, S., New Astronomy Reviews, Volume 50, Issue 4-5, 263-266, 2006.

Sveda, L.; Hudec, R.; Pina, L.; Inneman, A., *Il Nuovo Cimento C*, vol. 28, Issue 4, 829, 2006a.

Sveda, L.; Pina, L.; Inneman, A.; Semencova, V.; Marsik, J.; Hudec, R.; Bartnik, A.; Fiedorowicz, H.; Jarocki, R.; Kostecki, J.; Rakowski, R.; Szczurek, M., *Physica Scripta*, Issue T123, 131-134, 2006b.

Jméno autora: RNDr. René Hudec, CSc. Odborný životopis

Narozen 28.7.1951 v Praze.

Vzdělání

1966-1970 Střední průmyslová škola strojnická v Praze

1970-1975 Matematicko-fyzikální fakulta UK, obor fyzika, specializace astronomie a astrofyzika

1975-1976 stáž na ASÚ AV ČR Ondřejov

1976-1980 interní aspirantura na ASÚ AV ČR Ondřejov

Tituly, vědecké hodnosti

1978 RNDr na Karlově Univerzitě Praha

1980 CSc. na AV ČR Praha

2005 podána habilitační práce na ČVUT Praha, obor aplikovaná fyzika

Zaměstnání

1975-dosud na Astronomickém ústavu AV ČR v Ondřejově, nejprve jako stážista, od roku 1976 jako interní aspirant, od roku 1980 jako vědecký pracovník, od roku 1990 vedoucí pracovní skupiny Astrofyzika mezních směrů na ASÚ AV ČR v Ondřejově (od roku 2001 skupina Astrofyziky vysokých energií).

Odborné zaměření

Hlavními odbornými zájmy jsou astrofyzika vysokých energií, tedy záření rentgenového a gama, výzkum zábleskových zdrojů záření gama, kosmická astronomie a astrofyzika a rentgenová optika a rentgenové dalekohledy.

Členství, projekty a aktivity

Člen vědecké rady Vývojové optické dílny AV ČR v Turnově.

Diplomová práce na téma Rentgenové dalekohledy, disertační na téma vědecké analýzy dat ze slunečních rentgenových teleskopů. Podílel se na řadě kosmických astrofyzikálních experimentů (mj. rentgenové teleskopy na výškových raketách Vertikal 9 a 11, kosmické stanici Saljut 7-RT4M a kosmické sondě Fobos 1). Autor a spoluautor unikátních českých technologií v oblasti astrofyzikální a laboratorní rentgenové optiky a rentgenových dalekohledů a mikroskopů. V uplynulých 15 letech byl hlavním řešitelem řady grantů a projektů GA ČR, GA AV ČR, MŠMT, ESO a ESA.

Od roku 2001 je odpovědným řešitelem (za českou stranu) projektu družice Evropské kosmické agentury ESA INTEGRAL (podporované v rámci programu ESA PRODEX). V tomto projektu rovněž působí jako spolupříspěvník a člen konsorcia INTEGRAL Science and Data Centre ISDC (Mezinárodní středisko projektu INTEGRAL pro vědu a data) a jako spolupříspěvník palubního experimentu OMC (Optical Monitoring Camera, Optická monitorovací kamera). Od roku 2003 člen Mezinárodního týmu rentgenového teleskopu projektu ESA XEUS a koordinátor českého multidisciplinárního týmu vyvíjejícího inovační technologie pro rentgenovou optiku tohoto projektu (zahrnuje ASÚ AV ČR, ČVUT, VŠCHT, ON Semiconductor Czech Republic a Reflex).

Autor či spoluautor více než 250 původních vědeckých prací a sdělení publikovaných v mezinárodním odborném tisku. Vedoucí 14 diplomových prací a 6 disertací. Člen Mezinárodní astronomické unie IAU, Mezinárodní společnosti pro optické inženýrství SPIE a Americké společnosti pro rozvoj vědy AAAS. Rozsáhlá mezinárodní spolupráce, spolupráce s vysokými školami, zejména ČVUT (FJFI, FS, FEL) a VŠCHT. Pedagogická spolupráce s MFF UK a MU Brno (vedoucí diplomových prací, praxí, školitel). Aplikované výstupy v oblasti rentgenové optiky a rentgenových dalekohledů, podíl na vývoji inovačních technologií, interdisciplinární spolupráce s VŠ a průmyslem.