

Rentgenová astrofyzika¹

Miroslav Randa*, Pedagogická fakulta ZČU Plzeň

Druhou polovinu (5 milionů švédských korun) Nobelovy ceny za fyziku pro rok 2002 získal



Riccardo Giacconi (*1931 Janov, Itálie; prezident Sdružení univerzit, Washington, USA)

„za průkopnické příspěvky k astrofyzice, které vedly k objevu kosmických rentgenových zdrojů“.

OBJEV RENTGENOVÉHO ZÁŘENÍ

Část elektromagnetického záření s vlnovými délkami mezi 5 pm a 10 nm nese jméno německého fyzika **Wilhelma C. Röntgena** (1845 až 1923). Ten záření objevil při experimentech s vakuovými trubicemi 8. listopadu 1895. Již 28. prosince 1895 o svém objevu napsal článek „*Nový druh paprsků: předběžné oznámení*“ v časopise fyzikálně lékařské společnosti ve Würzburgu. Röntgen své paprsky nazýval „paprsky X“ jako narážku na jejich tehdy neznámou podstatu a teprve později, na základě návrhů jeho kolegů, se pro tyto paprsky vžil název rentgenové záření. Označení *X-ray* se však dodnes používá v USA, Velké Británii apod. Význam Röntgenova objevu se projevil také v udělení vůbec první Nobelovy ceny za fyziku v roce 1901.



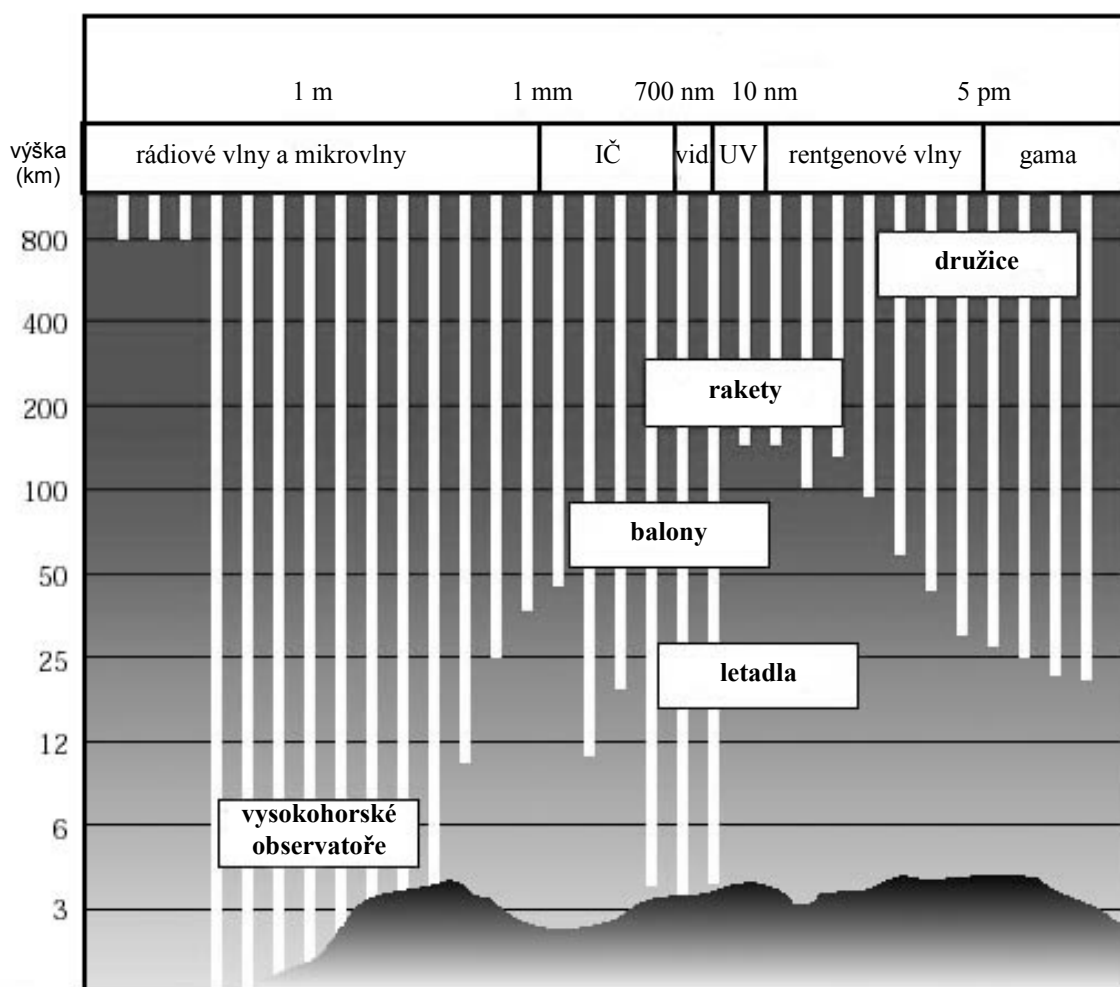
W. C. Röntgen působil na lékařské fakultě univerzity ve Würzburgu, a tak je celkem pochopitelné, že jeho objev našel okamžité uplatnění **v medicíně**; ostatně notoricky známý je rentgenový snímek ruky jeho manželky Berty, na níž jsou patrné kosti a prstýnky.

Po roce 1910 rentgenové záření pomohlo fyzikům sledovat a fotografovat **strukturu krystalů**. Klíčovou postavou v tomto oboru byl německý fyzik Max von Laue, který si představoval paprsky X jako elektromagnetické záření s ma-

¹ Článek volně navazuje na příspěvek Randa M.: *Neutrinová astronomie*. Školská fyzika **VIII**, č. 1 (2004), 5.
*randam@kof.zcu.cz

lou vlnovou délkou. Protože vlnová délka byla srovnatelná se vzdáleností atomů v krystalu, předpověděl difrakci záření při průchodu krystalovou mřížkou. Jeho myšlenku potvrdily experimenty W. Friedricha a P. Knippinga a po matematickém zdůvodnění předložil Laue v roce 1912 v Mnichově se svými pomocníky práci „*Interferenční jevy s rentgenovými paprsky*“. Založil tím strukturní rentgenovou analýzu a inicioval rozvoj fyziky pevných látek. Za svůj objev dostal v roce 1914 Nobelovu cenu za fyziku. Hned v následujícím roce získali Nobelovu cenu za další analýzu struktury krystalů s využitím rentgenového záření otec William Henry Bragg a jeho syn William Lawrence Bragg. Další Nobelovy ceny za využití rentgenového záření získali v roce 1917 Charles Barkla za objev charakteristického rentgenového záření prvků a Karl Manne Siegbahn za objevy v oblasti rentgenové spektroskopie.

POČÁTEK RENTGENOVÉ ASTRONOMIE



Využití rentgenového záření v astronomii přišlo mnohem později. Rentgenové záření, které tak snadno proniká lidskou tkání i atomovými obaly, je totiž téměř celé **pohlcováno zemskou atmosférou**. K detekci rentgenového záření o vlnové délce 400 pm bylo například nutné vystoupit až do výšky 80 km, kde mezi kosmickým zdrojem a detektorem zůstává již jen (co do hmotnosti) zhruba jedna miliontina vrstvy atmosféry. Trochu lepší situace je u rentgenového záření s větší energií (menší vlnovou délkou), jak je vidět na obrázku převzatém z [1]. Pro vlnové délky kolem 40 pm stačí proto vystoupit do výšky „jen“ zhruba 35 km.

První možnost zkoumat rentgenové záření tak umožnila teprve raketa V2 vyvinutá Němci během druhé světové války. V září 1949 vypustil tým pod vedením Herberta Friedmana rake-

tu s malým Geigerovým počítačem a zachytil **rentgenové záření Slunce**. Pro rozlišení vzdálených zdrojů rentgenového záření však byla zapotřebí mnohem lepší citlivost. Proto se i v dalších letech rentgenová astronomie orientovala zejména na průzkum slunečního rentgenového záření. Zajímavý experiment byl proveden v roce 1958 během úplného zatmění Slunce, kdy pozorování pomocí série vypuštěných raket prokázala, že zdrojem rentgenového záření jsou oblasti se slunečními skvrnami a horká sluneční koróna v okolí Slunce. V roce 1960 se podařilo pomocí dírkové komory pořídit rentgenovou fotografii Slunce, bohužel však díky rotaci rakety rozmazanou.

RICCARDO GIACCONI A JEHO PŘÍNOS K RENTGENOVÉ ASTRONOMII

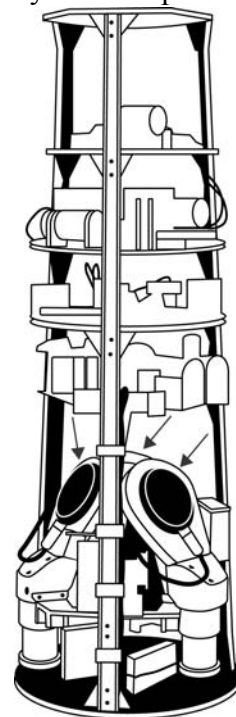
V září 1959 se do rentgenové astronomie zapojil (ve Spojených státech) tehdy 28letý Ital **Riccardo Giacconi**, a to pod vedením svého krajana Bruno Rossiho – významného fyzika zabývajícího se studiem kosmického záření na Massachusetts Institute of Technology (MIT) v Cambridge. O setkání později Giacconi napsal²:

„V září 1959 jsem se zúčastnil večírku v Rossiho domě a setkal se poprvé s Rossim. Rossi navrhl, že orientace na rentgenovou astronomii by mohla být velmi plodná, ne kvůli nějakým teoretickým předpovědím, ale protože v této oblasti nebylo dosud nic známo a byla tam možnost pro nové objevy.“

Hned první Giacconioho práce (se spoluautorstvím B. Rossiho a G. Clarka³) vzbudila velkou pozornost. Autoři v ní totiž vyšli z úspěšné konstrukce rentgenového mikroskopu a navrhli **možnost konstrukce rentgenového dalekohledu**. Dalekohled se měl skládat ze soustavy souosých paraboloidních segmentů, na nichž by se měly rentgenové paprsky šířící se podél osy postupně, téměř tečně, odrážet, až by dopadly do ohniska. Tuto konstrukci pak skutečně Giacconi se spolupracovníky v dalších letech úspěšně vyzkoušel.

Přes značnou nedůvěru vědců k možnostem odhalení rentgenového záření z jiných zdrojů než ze Slunce připravil Giacconi se svými spolupracovníky pokus o zachycení rentgenového záření z Měsíce (resp. slunečního rentgenového záření rozptýleného při dopadu na povrch Měsíce). Prostředkem byly tři Geigerovy počítače umístěné v přední části rakety Aerobee (viz obr. z [2], na němž jsou šipkami označeny polohy Geigerových detektorů). První dva starty se nepodařily, teprve třetí raketa vypuštěná 18. června 1962 se dostala do potřebné výšky a umožnila 6minutové měření. Rentgenové záření z Měsíce však nezachytila (poprvé bylo zachyceno až družicí ROSAT v roce 1990). Přesto byl experiment velice úspěšný: díky rotaci rakety byl totiž nečekaně **objeven silný rentgenový zdroj** v souhvězdí Štíra (**Sco X-1** – Sco je latinská zkratka souhvězdí, X označuje rentgenový zdroj a číslice udává pořadí objevu zdroje), z něhož do detektorů dopadalo každou sekundu zhruba 100 rentgenových fotonů. Pozdější výpočty ukázaly, že uvedený zdroj je řádově 1000krát intenzivnějším zdrojem rentgenového záření než Slunce. Kromě toho detektory odhalily rovněž spojité rentgenové záření pozadí. Zmíněné objevy [3] se staly začátkem éry rentgenové astrofyziky.

Prolomení obav z nemožnosti zachycení rentgenového záření ze zdrojů mimo sluneční soustavu znamenalo nejen zvýšení četnosti startů raket, ale díky novým typům kolimátorů ta-



² Tucker W., Giacconi R.: *The X-Ray Universe*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1985.

³ Giacconi R., Clark G., Rossi B.: *A Brief Review of Experimental and Theoretical Progress in X-Ray Astronomy*. ASE-TN-49, 1960.

ké **zlepšení rozlišovací schopnosti** detektorů až na několik úhlových minut. Geigerovy počítače byly nahrazeny proporcionálními detektory umožňujícími zachytit i slabší objekty. Během 60. let členové Giacconiho týmu objevili další bodové zdroje rentgenového záření (například významné zdroje v souhvězdí Labutě Cyg X-1, Cyg X-2 a Cyg X-3), ztotožnili (v roce 1966) objevený zdroj Sco X-1 se slabou hvězdou 13. hvězdné velikosti a ukázali, že dalšími, velmi intenzivními zdroji rentgenového záření jsou zbytky po výbuších supernov. Například objevený zdroj pulzů rentgenového záření v Krabí mlhovině (zde pozorovali výbuch supernovy čínští astronomové 4. července 1054) v rentgenové oblasti září 10^{10} krát silněji než Slunce a perioda pulzů je stejná jako perioda optických záblesků, tedy 33 ms. Celkem bylo v 60. letech objeveno téměř 50 rentgenových zdrojů, kromě uvedených ještě například obří eliptická galaxie M87 v centru kupy galaxií v Panně.

Kromě raket se stále používaly i **detektory umístěné na balonech**. Protože balony mohou vystoupit do nižších výšek, byly používány pro detekci rentgenového záření s větší energií (nad 20 keV). Výhodou balonů je naopak delší pobyt ve vhodných výškách, až do 100 hodin. Mezi nejvýznamnější výsledky balonových experimentů patří objev cyklotronových spektrálních čar s energiemi zhruba 40 keV ve spektru zdroje Her X-1, které umožnilo první přímé změření magnetické indukce hvězdy; v oblasti magnetických pólů byla změřena neobyčejně vysoká hodnota $5 \cdot 10^8$ T.

Paralelně s pokračujícími objevy dalších rentgenových zdrojů si Giacconi a jeho kolegové uvědomovali, že k dalšímu rozvoji rentgenové astronomie je nutné podstatně vylepšit **technické parametry detektorů**. Hlavním směrem výzkumu a experimentů byla snaha vytvořit sbíhavý svazek paprsků, což by podobně jako objev čočky v optickém oboru umožnilo dosáhnout většího úhlového rozlišení detektorů. Úplně **prvním zobrazujícím rentgenovým dalekohledem** byl detektor Giacconiho skupiny z října 1963 vypuštěný pomocí malé rakety, který se zaměřil na horké skvrny ve sluneční koróně.

PRINCIP RENTGENOVÝCH DALEKOHLEDŮ

Jak již bylo zmíněno, problém ve využití rentgenového záření souvisel s vytvořením sbíhavého svazku rentgenových paprsků a narážel tedy na problém, že se rentgenové záření neláme. **Komplexní index lomu** v rentgenové oblasti je roven

$$n = (1 - \delta) - \beta \cdot i, \quad (1)$$

kde veličiny β a δ nabývají malých kladných hodnot a závisejí na materiálu, kterým záření prochází. Veličina β popisuje absorpci rentgenového záření. Pro lom rentgenového záření je významná reálná část indexu lomu. Jak je ze vztahu (1) zjevné, je reálná část indexu lomu $n_r = 1 - \delta$ menší než 1, jen pro vakuum je rovna 1. Proto při dopadu rentgenového záření z vakua na nějaký materiál dochází k lomu od kolmice. Při dostatečně velkém úhlu dopadu proto již nemůže k lomu záření dojít a nastává totální odraz. Mezní úhel je stejně jako v optice dán vztahem

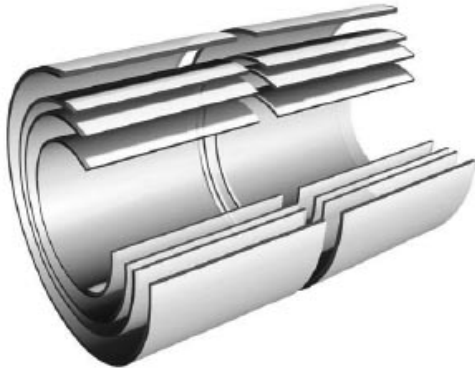
$$\sin \alpha_m = n_r = 1 - \delta. \quad (2)$$

Protože δ nabývá velmi malých hodnot, je mezní úhel větší než 80° , tj. k úplnému odrazu dochází jen při téměř **tečném dopadu** záření vůči povrchu příslušného materiálu.

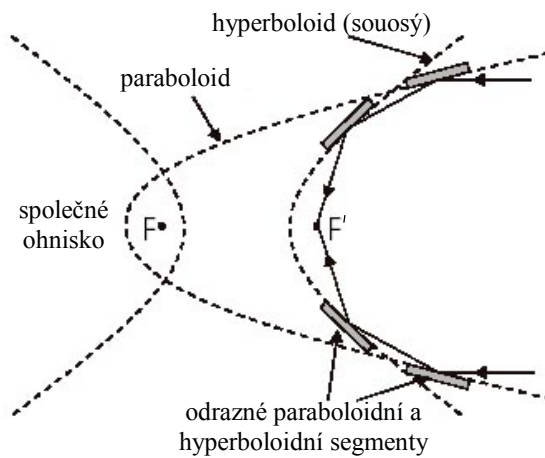
Nejlepší odrazivé vlastnosti mají látky s vysokou elektronovou hustotou. Proto se odrazné plochy pro dalekohledy potahují **tenkou vrstvičkou vhodného kovu**, nejběžněji jde o nikl, zlato, platinu či iridium. I malé nerovnosti narušují výrazně chod rentgenových paprsků vzhledem k jejich téměř tečnému dopadu; proto musí být povrch velice hladký (například u moderních rentgenových teleskopů musí být nerovnosti podle [10] menší než 0,04 nm!).

Uvedených vlastností rentgenového záření použili jako první P. Kirkpatrick a A. V. Baez v roce 1948 a o čtyři roky později ve vylepšené podobě Hans Wolter ke konstrukci **rentgenového mikroskopu**. Pro konstrukci rentgenových dalekohledů se většinou používá Wolterovo řešení.

Konkrétně **Wolterův typ I** tvoří paraboloidní segmenty (jako primární zrcadla) a hyperboloidní segmenty (jako sekundární zrcadla) tvaru souosých prstenců. Všechny segmenty mají také totožné ohnisko, jak je znázorněno na schematickém obrázku převzatém z [6]. Na obrázku jsou silně přečteny úhly mezi dopadajícími paprsky a odraznými plochami; tím není z obrázku patrné, že délka dalekohledu mezi segmenty a ohniskem, v němž vzniká obraz, je několik metrů. Svazek paprsků dopadá nejprve na



Wolterův typ I v dalekohledu Chandra

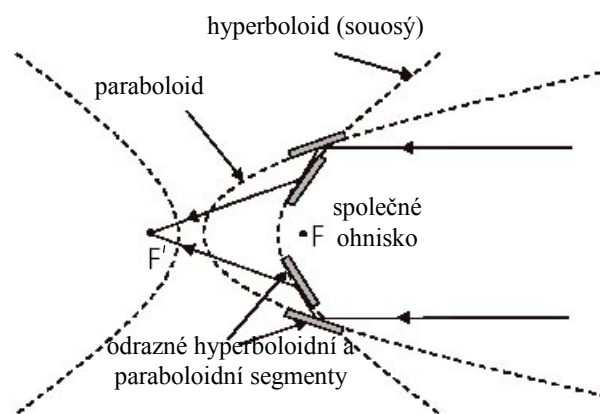


Wolterův typ I

paraboloidní, poté na hyperboloidní segmenty pod úhlem větším než mezní úhel a po úplném odrazu vytváří obraz v ohnisku hyperboloidu. Výhody tohoto typu jsou zejména relativně jednoduchá mechanická konstrukce, vynikající zobrazování objektů ležících na ose dalekohledu a možnost snadného zvýšení „světelnosti“ (sběrné plochy) dalekohledu několikanásobnou soustavou do sebe vnořených segmentů. Proto se tento typ využívá ke konstrukci

rentgenových dalekohledů nejčastěji. Byl použit například pro Einsteinovu rentgenovou observatoř, dalekohledy ROSAT, XMM-Newton a Chandra.

Wolterův typ II sestává rovněž z paraboloidních a hyperboloidních segmentů; rozdíl spočívá v tom, že paprsky se na hyperboloidních segmentech odrážejí zvnějšku a obraz vzniká ve vzdálenějším ohnisku hyperboloidu. Proto je u tohoto typu dalekohledu větší ohnisková vzdálenost. Zároveň paprsky vytvářejí v ohniskové rovině větší obraz. Výhodami tohoto typu je i dobré zobrazování objektů mimo optickou osu, možnost zvětšit světelnost dalekohledu prostým zvětšením vstupního otvoru. Nevýhodou je menší citlivost na rentgenové záření s vyššími energiemi a zejména nemožnost vnoření dalších segmentů.

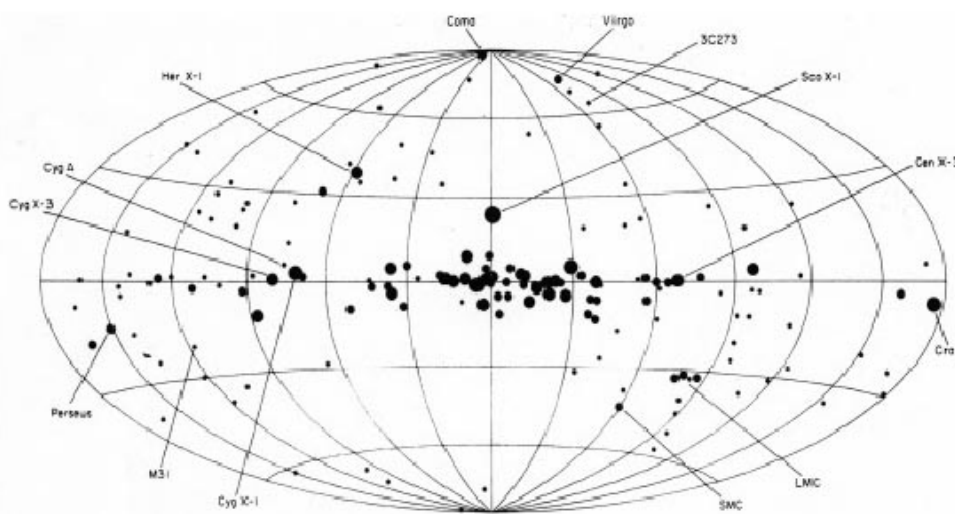


Wolterův typ II

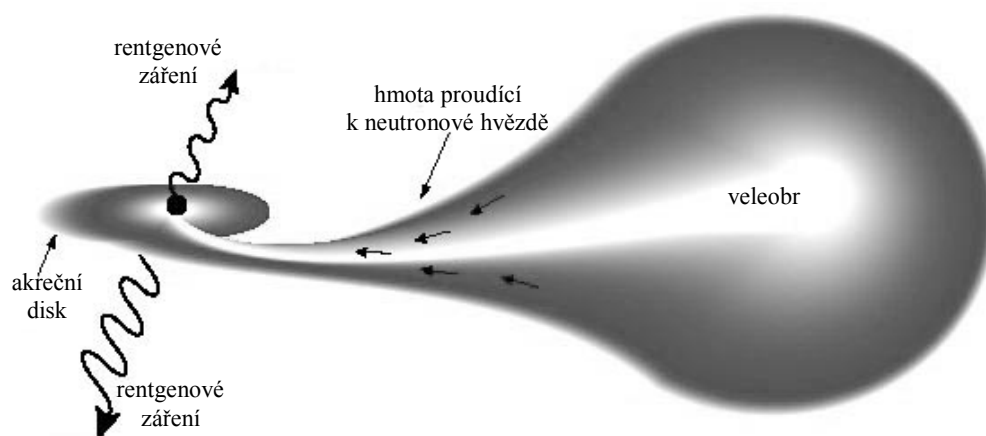
Existuje ještě **Wolterův typ III** složený z paraboloidních a elipsoidálních segmentů; ten se však pro rentgenové dalekohledy dosud nepoužil.

DRUŽICE UHURU

Významným mezníkem v rozvoji rentgenové astronomie se stalo **vypuštění první rentgenové družice Uhuru** (svahilské slovo *uhuru* znamená svoboda) 12. října 1970 z Keni. Družice (ještě bez použití rentgenového dalekohledu) byla vybavena dvěma sadami proporcionálních detektorů s citlivostí desetkrát lepší než byla u předchozích detektorů a s celkovou sběrnou plochou 840 cm^2 . Bylo tak možné objevit zdroje rentgenového záření až tisíckrát slabší než pulsar v Krabí mlhovině. Díky dlouhodobému pobytu na oběžné dráze družice poprvé zmapovala rentgenové zdroje po celé obloze, a tak se počet známých rentgenových zdrojů rychle rozrostl na 339, jak je patrné ze zprávy⁴ Giacconiho z roku 1972. Rozložení rentgenových zdrojů na obloze znázorňuje obrázek z [4], na němž jsou zdroje znázorněny různě velkými kotoučky podle své intenzity (v logaritmické stupnici). Z obrázku je patrná vyšší koncentrace rentgenových zdrojů v rovině Galaxie, a to zejména směrem ke středu Galaxie.



Na základě údajů z družice Uhuru publikovali Giacconi a jeho spolupracovníci velké množství původních prací. Kombinací pozorování v rentgenové a optické oblasti ukázali, že kromě zbytků po výbuších supernov tvoří velký počet objevených rentgenových zdrojů také **dvojhvězdy, kde jednou ze složek je neutronová hvězda**, případně černá díra. Takovým



⁴ Giacconi R., Murray S., Gursky H. a kol.: *The UHURU catalogue of X-ray sources*. Ap. J. **230** (1972), 540.

zdrojem je například Cen X-1 v souhvězdí Kentaura, kde rychle rotující neutronová hvězda obíhá společně s horkým veleobrem kolem společného hmotného středu. Hmota z vnějších vrstev veleobra je gravitačně přitahována do okolí neutronové hvězdy a urychlována do pohybu relativistickými rychlostmi ve spirále kolem hvězdy. Tím se tvoří v rovníkové rovině neutronové hvězdy tzv. akreční disk, v němž je hmota stlačována a zahřívána, a tak vyzařuje záření v rentgenovém oboru spektra. Celý proces je znázorněn na obrázku převzatém z [1]. Podobnými zdroji se ukázaly například také zdroje Sco X-1, Her X-1 a Cen X-3. Dalším překvapujícím objevem bylo zjištění, že intenzivními zdroji rentgenového záření mohou být i Seyfertovy galaxie či objekty ve vzdálených kupách galaxií.

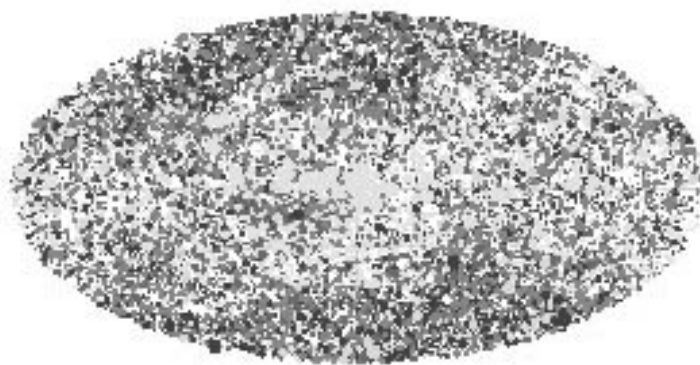
U zdroje **Cyg X-1** v souhvězdí Labutě byly zaznamenány velice rychlé a nepravidelné změny záření s typickým intervalem změn záření byl řádu 0,1 s. Změny záření byly navíc doprovázeny erupcemi trvajících několik milisekund. Při následném podrobném zkoumání a zpřesňování polohy objektu astronomové zjistili, že hmotnost kompaktního objektu je zhruba desetinásobkem hmotnosti Slunce. Přitom mezní hmotnost neutronové hvězdy je zhruba trojnásobek hmotnosti Slunce. Tak byla objevena **první černá díra**. Rychlé změny rentgenového záření byly pozorovány rovněž u kulové hvězdokupy NGC 6624 a u rádiové galaxie Cen A, což znamená, že rentgenové záření v obou případech vychází z velice malé oblasti ve středu hvězdokupy, resp. galaxie. Uvedené objekty se tak staly dalšími kandidáty na černé díry.

DALŠÍ RENTGENOVÉ DRUŽICE

Úspěch družice Uhuru podnítl zájem astronomů o další výpravy za rentgenovým zářením za hranice zemské atmosféry. V 70. letech vypustily další družice například Nizozemsko (družice ANS), Velká Británie (Ariel V) i USA (SAS-3, HEAO-1). Velkým mezníkem se stala družice HEAO-2 (High Energy Astronomy Observatory), po startu v listopadu 1978 přejmenovaná na **Einsteinovu rentgenovou observatoř** (Einstein X-Ray Observatory), jejímž ředitelem byl opět Giacconi. Jednalo se totiž o první družici s rentgenovým dalekohledem. I když „čočku“ dalekohledu tvořily jen 4 vnořené páry zrcadlicích segmentů se sběrnou plochou 350 cm^2 , vše kompenzovala skvělá rozlišovací schopnost několika úhlových vteřin. Také citlivost byla výjimečná; zhruba 1000krát lepší než citlivost družice Uhuru. Tím mohly být odhaleny i tak subtilní zdroje jako vzdálený kvasar, z něhož dopadal do dalekohledu každých 100 sekund pouhý jeden foton!

Einsteinova rentgenová observatoř za 2,5 roku objevila **více než 7 000 zdrojů**, a to zejména velmi slabých. Kromě vzdálených kvasarů tak objevila zdroje v kupách galaxií, zdroje v sousedních galaxiích (v galaxii M31 v Andromedě, ve Velkém i Malém Magellanově mračnu a dalších), objevila rentgenové výtrysky ze středů galaxií Cen A a M87 a ukázala, že mají stejný směr jako výtrysky pozorované v rádiové oblasti. Zajímavým výsledkem bylo zjištění, že normální hvězdy emitují z koróny silnější rentgenové záření, než bylo očekáváno podle stávajících modelů hvězd. Vzhledem k většímu spektrálnímu rozsahu družice (přibližně 0,25 až 5,5 nm) byla provedena podrobná zkoumání již známých rentgenových zdrojů. Například zbytky po výbuších supernov byly sledovány jak z hlediska detailní morfologické struktury tohoto typu mlhovin, tak i z hlediska porovnání záření v různých vlnových délkách. Tak bylo zjištěno, že se ve zbytcích po výbuších supernov nachází podstatně větší množství těžších prvků, naprosto v souladu s uznávanou teorií, že prvky těžší než železo vznikají právě při výbuších supernov.

V osmdesátých letech pracovaly ve vesmíru japonské družice Hakucho a Tenma, evropská EXOSAT, japonsko-britská Ginga, sovětsko-britsko-nizozemsko-německá Kvant a sovětská Granat (družice pracovala později jako ruská, a to až do roku 1999). Výrazný posun v rentgenové astronomii přinesla **družice ROSAT** (název je zkratkou z **R**oentgensatellit) vyvinutá německými astronomy ve spolupráci s Brity a Američany. Družice byla vypuštěna v červnu

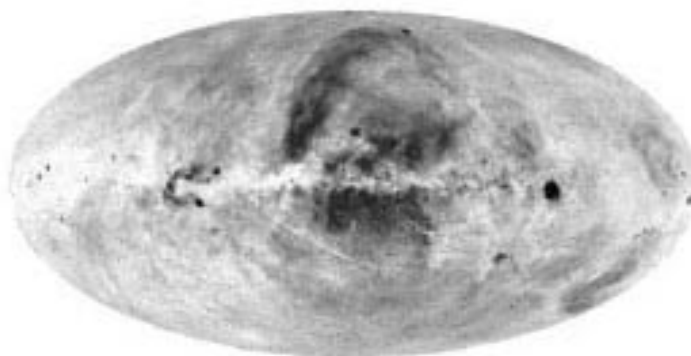


nejjasnější rentgenové zdroje objevené družicí ROSAT

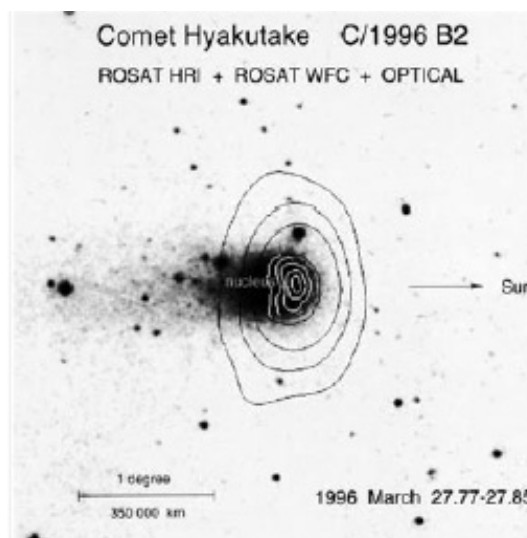
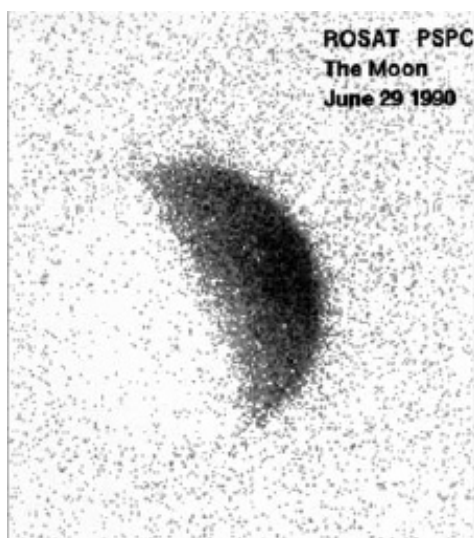
stanovila s přesností 25". Nejjasnějších 19 000 zdrojů je vyznačeno na obrázku nahoře převzatém z [5]. Vedle toho prozkoumala s rozlišením 12' difúzní rentgenové záření vyzařované horkým mezihvězdným plynem zahřátým výbuchy supernov (obr. vpravo).

Kromě tradičních zdrojů rentgenového záření družice poprvé vyfotografovala rentgenové záření Měsíce (přesněji rentgenové paprsky rozptýlené v důsledku Comptonova jevu tenkou povrchovou slupkou na Měsíci – v rentgenovém oboru se odráží pouhých 0,01 % záření) a rentgenové záření komety Hyakutake – viz obr. z [5], kde je rentgenové záření vyznačeno křivkami stejné intenzity (izofotami) na pozadí amatérského snímku komety ve viditelném spektru.

1990 a pracovala na oběžné dráze až do konce roku 1998. Její spektrální rozsah byl menší než u Einsteinovy rentgenové observatoře (0,1–3 nm) a jak je z rozsahu zjevné, družice sledovala jen zdroje měkkého rentgenového záření (do 2,4 keV). Během prvního půlroku však dokázala provést celoblohovou prohlídku zdrojů a objevila jich 80 000 (za celou dobu pobytu na oběžné dráze se počet objevených zdrojů zvýšil na téměř dvojnásobek). Polohu zdrojů



difúzní rentgenové záření objevené družicí ROSAT



Další družice s detektory rentgenového záření na palubě byly v devadesátých letech japonsko-americká ASCA (zdokonalená družice pro kosmologii a astrofyziku Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics) s velkými CCD-detektory pro detailní studium spekter

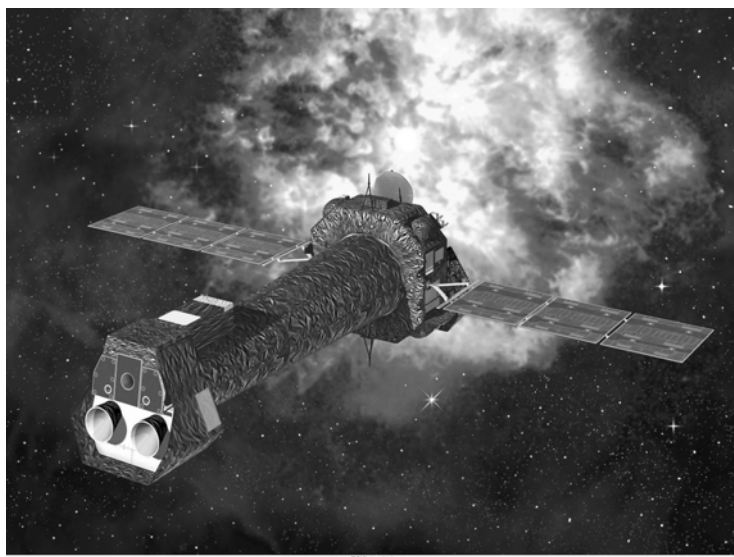
zbytků po výbuších supernov, italsko-nizozemská BeppoSAX s hlavním cílem studovat záblesky gama a americká RXTE (**R**ossi **X**-Ray **T**iming **E**xplorer).

XMM-NEWTON A CHANDRA

Zatím poslední kapitoly píší v posledních pěti letech rentgenové družice XMM-Newton (XMM znamená rentgenové mnohonásobné zrcadlo – **X**-ray **M**ulti **M**irror) a Chandra (pojmenována po indickém astronomu Subrahmanyana **Chandrasekharovi**). Kromě nich lze nalézt ve vesmíru detektory rentgenového záření na družicích sledujících rentgenový dosvit po gama záblescích Integral (evropská družice) a HETE-2 (průzkumník rentgenových protějšků gama záblesků s vysokou energií **H**igh **E**nergy **T**ransient **E**xplorer) zkonstruovaný ve spolupráci astronomických týmů USA, Japonska, Francie a Itálie.

Největší a nejvýkonnější **rentgenové dalekohledy** na družicích XMM-Newton a Chandra jsou Wolterova typu I a jsou spojeny s CCD-detektory a spektroskopy. Chandra má lepší rozlišovací schopnost (0,5", tj. asi 20krát lepší než XMM-Newton), naopak XMM-Newton má větší sběrnou plochu (4300 cm², tj. přibližně 4krát větší než Chandra).

Družice **XMM-Newton** je evropskou rentgenovou observatoří. Start na oběžnou dráhu se uskutečnil 10. prosince 1999 z Kourou ve Francouzské Guyaně pomocí rakety Ariane 5 (doplnění názvu na počest Isaaca Newtona proběhlo dva měsíce po startu). Družice je vybavena třemi rentgenovými dalekohledy, z nichž každý je složen z 58 velmi přesných, do sebe zasazených tenkých zrcadlicích segmentů o průměrech 30–70 cm a délce 60 cm. Tím se dosahuje bezkonkurenčně největší sběrné plochy. I další parametry jsou zajímavé: ohnisková vzdálenost činí 7,5 m; celková délka družice je 10 m a hmotnost 500 kg.



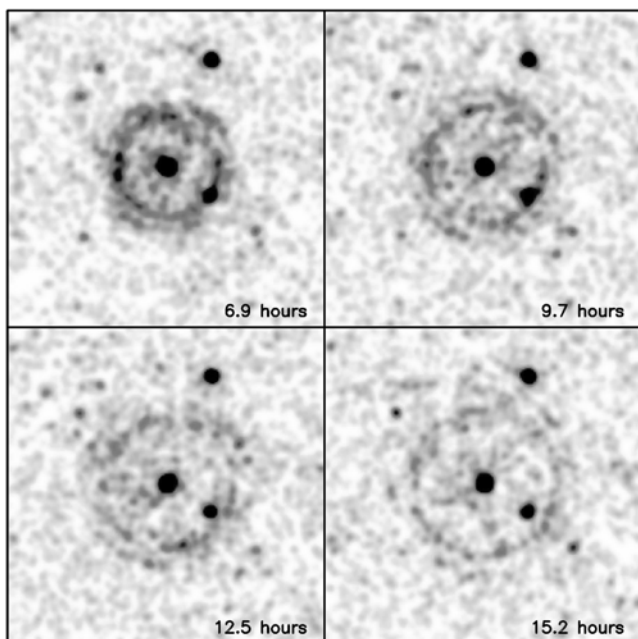
rentgenový dalekohled XMM-Newton

Vzhledem k hlavní přednosti observatoře, již je velká účinnost **spektroskopické analýzy** rentgenových zdrojů a sledování jejich **časových změn**, přinesla družice mnoho cenných objevů zejména v oblasti pozorování rentgenových dosvitů záblesků gama, centrálních oblastí hvězdokup a galaxií včetně naší Galaxie, sledování procesů v galaxiích s aktivními jádry, studium časového vývoje neutronových hvězd a černých děr obklopených akrečními disky, sledování průběhu rozpínání obálek po výbuších supernov a zastoupení těžkých prvků v obálkách.

Mezi zajímavá pozorování z poslední doby patří zkoumání **rentgenových prstenců** obklopujících místo, v němž byl začátkem prosince 2003 objeven záblesk gama. Evropská družice Integral detekovala v tomto místě **vzplanutí gama** (označené GRB 031203), které trvalo asi 30 sekund. Snímky pořízené pomocí družice XMM-Newton (obrázek je převzatý ze [7]) byly pořízeny několik hodin po vzplanutí a ukazují jednak slábnutí záření zdroje gama záblesku, jednak velmi rychlé zvětšování prstenců, odpovídající zdánlivému rozpínání rychlostí tisíckrát převyšující rychlost světla ve vakuu. Slovo „zdánlivé“ v předchozí větě je důležité: nepozorujeme ve skutečnosti obálku kolem vzdálené galaxie, která byla zdrojem záblesku, ale světelné echo vznikající v naší Galaxii rozptylem rentgenového záření ze vzdálené galaxie při proni-

kání vrstvy mezihvězdného prachu. Tedy podobný jev, jaký bychom mohli vidět, kdybychom silným reflektorem posvítili na mraky a rychle jím pohybovali. Při pozornějším pohledu je vidět dokonce dvojice rozpínajících se prstenců. První (větší) prstenec vzniká na prachové vrstvě ve vzdálenosti 2 900 světelných let, která je pravděpodobně součástí Gumové mlhoviny,

GRB 031203 XMM–Newton observation



ESA, S. Vaughan (University of Leicester)

druhý (menší) na vrstvě vzdálené 4 500 světelných let. Uvedené prstence nesou informace o celém časovém průběhu záblesku gama, ale přináší informace rovněž o struktuře a hustotě prachových vrstev v naší Galaxii. Jde o vůbec první pozorování prstenců kolem zdroje gama záblesku.

Druhá současná rentgenová družice ve vesmíru **Chandra** byla navržena již v roce 1976 (tehdy s pracovním názvem AXAF – Advanced X-ray Astrophysics Facility, neboli zdokonalený rentgenový astrofyzikální prostředek) nositelem Nobelovy ceny Riccardo Giacconim společně se současným ředitelem řídicího centra družice Harvey Tananbaumem. Na oběžnou dráhu ji vynesl 23.

července 1999 raketoplán Columbia. Dalekohled je složen ze 4 párů zrcadlicích segmentů o délce 80 cm a průměrech 60–120 cm; ohnisková vzdálenost je 10 m, hmotnost téměř 1 t. Je zajímavé, že Chandra je zhruba 10^8 krát citlivější než první rentgenový dalekohled z roku 1963. Tak velké zvýšení citlivosti v oblasti optických teleskopů trvalo téměř 400 let, od dalekohledu, kterým poprvé pozoroval oblohu Galileo (jeho dalekohled měl zhruba stejné parametry jako první rentgenový dalekohled) až po Hubbleův kosmický dalekohled.

Protože hlavní předností družice Chandra je skvělé **úhlové rozlišení**, zaměřuje se zejména na pozorování velmi vzdálených rentgenových zdrojů (kup galaxií) s ohledem na počátky jejich vývoje, pozorování kvasarů, galaxií s aktivními jádry a vznikajících galaxií, sledování výtrysků (jetů) ze supermasivních černých děr ve středech galaxií, hledání dalších černých děr ve vesmíru, rozpínajících se obálek po výbuších supernov, ale i na další zdroje rentgenového záření.

Mezi nejzajímavější novinky se jistě řadí **potvrzení nové kosmologické hypotézy o urychlování expanze vesmíru** [9]. Toto potvrzení vychází z pozorování rentgenového záření 26 kup galaxií vzdálených 1–8 miliard světelných let. Astronomové ze



rentgenový dalekohled Chandra

získaných dat určili pro každou kupu galaxií poměr hmotnosti horkého plynu (plynu vyzařujícího rentgenové záření) a hmotnosti skryté hmoty. Protože kupy galaxií jsou velmi rozsáhlé systémy, lze předpokládat, že obsahují stejné relativní množství horkého plynu i skryté hmoty. Na základě tohoto předpokladu z pozorování vychází, že rozpínání vesmíru se po Velkém třesku zpomalovalo zhruba 8 miliard let a od té doby se působením skryté energie stále zrychluje. Kombinací naměřených dat z Chandry a ze sondy WMAP (**W**ilkinson **M**icrowave **A**nisotropy **P**robe – Wilkinsonova sonda k měření anizotropie reliktního záření) vychází, že ve vesmíru se ve formě nám běžně známé hmoty (částice, atomy, molekuly, hvězdy) vyskytuje pouze asi 4 % hmoty. Dalších 21 % tvoří skrytou hmotu, která gravitačním působením působí proti rozpínání vesmíru. Celých 75 % hmoty je ve formě skryté energie, která naopak vesmír rozfoukává.

BUDOUCNOST RENTGENOVÉ ASTROFYZIKY

I když vědci předpokládají, že XMM-Newton i Chandra budou pracovat do konce desetiletí, již jsou připravovány další rentgenové teleskopy. 20. listopadu 2004 odstartovala americká družice **Swift** určená ke studiu gama záblesků ve třech oblastech spektra: v oblasti gama, rentgenového a optického záření. Již v roce 2005 by mělo být vypuštěno dvojče japonské družice **Astro-E** (první družice tohoto typu byla ztracena během startu) i italská družice **Agile**. V únoru 2007 by pak měla na oběžnou dráhu vzlétnout družice **GLAST** (velkoplošný kosmický dalekohled v oblasti záření gama – **G**amma-ray **L**arge **A**rea **S**pace **T**elescope), kterou vyvinuli odborníci z USA, Francie, Německa, Japonska, Itálie a Švédska, a zkoumat, jakým mechanismem jsou v okolí černých děr urychlovány částice prakticky na rychlost světla.

Na další desetiletí pak mají rentgenoví astronomové skutečně velmi ambiciózní cíle. NASA chystá mise **MAXIM** (**M**icro**A**rcsecond **X**-ray **I**maging **M**ission) s úhlovým rozlišením 10^{-4} úhlových vteřin, kterou by měl následovat soubor rentgenových dalekohledů **Constellation-X** s dalším obrovským zlepšením parametrů. Perspektivním cílem je dosažení úhlového rozlišení 10^{-7} úhlových vteřin a zároveň obrovské sběrné plochy 50–150 m², což umožní sledovat detaily prvních černých děr a galaxií ve vesmíru. Evropská kosmická agentura ESA pak připravuje na rok 2010 družici **XEUS** (**X**-ray **E**xploring **U**niverse **S**pectroscopy) se sběrnou plochou 6 m².

LITERATURA

- [1] <<http://www.slac.stanford.edu/pubs/beamline/25/2/25-2-tucker.pdf>> Tucker W. H.: *The X-Ray Universe* (anglicky).
- [2] <<http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/public.html>> *The Nobel Prize in Physics 2002 – Information for the Public* (anglicky).
- [3] Giacconi R., Gursky H., Paolini F. R., Rossi B. B.: *Evidence for x Rays From Sources Outside the Solar System*. Physical Review Letters, Volume 9 (1962) 439.
- [4] <<http://www.nobel.se/physics/laureates/2002/phyadv02.pdf>> *X-Ray Astronomy* (anglicky).
- [5] Trümper J.: *X-Ray Astronomy*. Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics, Nature Publishing Group 2001.
- [6] Reid P. B.: *X-Ray Telescopes*. Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics, Nature Publishing Group 2001.
- [7] <<http://xmm.vilspa.esa.es/>> *XMM-Newton* (anglicky).
- [8] <<http://chandra.harvard.edu/>> *The Chandra X-ray Observatory Center* (anglicky).
- [9] Randa M.: *Astronomické novinky 19*. Školská fyzika **VIII**, č. 2 (2004), 65.
- [10] Elvis M.: *Chandra X-ray Observatory*. Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics, Nature Publishing Group 2002.