

ZOBRAZOVACÍ VLASTNOSTI RENTGENOVÉ OPTIKY RAČÍ OKO - SROVNÁNÍ TEORIE A EXPERIMENTU

L. Švéda^{1,2}; V. Tichý³; J. Maršík⁴; J. Jakůbek⁵; V. Semencová⁴; R. Hudec⁶; M. Hromčík³; L. Pína^{1,4}

- 1) ČVUT, FJFI, KFE, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8
- 2) Elya Solutions s.r.o., Pobřežní 95/74, 186 00 Praha 8
- 3) ČVUT, FEL, Katedra řídicí techniky, Karlovo náměstí 13, 121 35 Praha 2
- 4) Rigaku Innovative Technologies Europe s.r.o., Novodvorská 994, 142 21 Praha 4
- 5) ČVUT, ÚTEF, Horská 3a/22, 128 00 Praha 2
- 6) Astronomický ústav AV ČR v.v.i., Fričova 298, 251 65 Ondřejov

Abstrakt

Širokoúhlá rentgenová optika typu račí oko je vhodným kandidátem na optický systém pro celoblohový monitor (All Sky Monitor) v oboru rentgenové astronomie. Pro korektní funkci systému je však třeba vzít v úvahu řadu vad této optiky. V tomto příspěvku se zabýváme srovnáním prvních systematických experimentů, které se této problematice týkají, s jejich počítačovou simulací. Konkrétně popisujeme dva případy. Jednak se jedná o systematický posun polohy zdroje vůči ideální poloze, který je způsoben principem fungování optiky, a který dosahuje teoreticky až 0.8 mm (RMS). A dále se jedná o změnu detekovaného spektra zdroje způsobenou reflektivitou optiky závislou na energii fotonů.

1 Motivace

Račí oko [1] je zobrazující rentgenová optika se širokým zorným polem. Tato vlastnost je unikátní mezi ostatními rentgenovými optikami, které dosahují zorného pole typicky 0.5 stupně a menší. Na rozdíl od nich může optika typu račí oko dosáhnout principiálně neomezeného zorného pole, v praxi se však používají moduly s například 6 x 6 stupni velkým zorným polem.

Výše zmíněná vlastnost předurčuje račí oko jako ideální optický systém pro rentgenovou astronomii, speciálně pro jednu její část a tou jsou celoblohové monitory (tzv. All Sky Monitors) [2]. Astronomické objekty, které září v rentgenové oblasti spektra jsou většinou bodovými zdroji s velmi proměnlivým výkonem. Typicky se jedná o výbuchy supernov, gama záblesky (Gamma Ray Bursts), aktivní galaktická jádra (Active Galactic Nuclei), nebo o rentgenové dvojhvězdy. Výkon takového zdroje se může měnit o mnoho řádů v průběhu několika minut či hodin. Velká část těchto zdrojů (vyjma rentgenových dvojhvězd) se navíc nachází vně naší Galaxie, a tedy jsou po obloze rozmístěny relativně rovnoměrně.

Aby bylo možné tyto zdroje dlouhodobě monitorovat (tedy získat solidní statistiku) nebo vůbec nalézt (objevují se na náhodných pozicích – výbuchy), je třeba monitorovat velkou část oblohy. V současné době jsou používány zejména systémy založené na principu kódované masky (Coded Mask Systems) [3]. Tyto systémy jsou však nefokusující, čehož důsledkem je nízká citlivost. Jinými slovy je možné pozorovat pouze jasné objekty

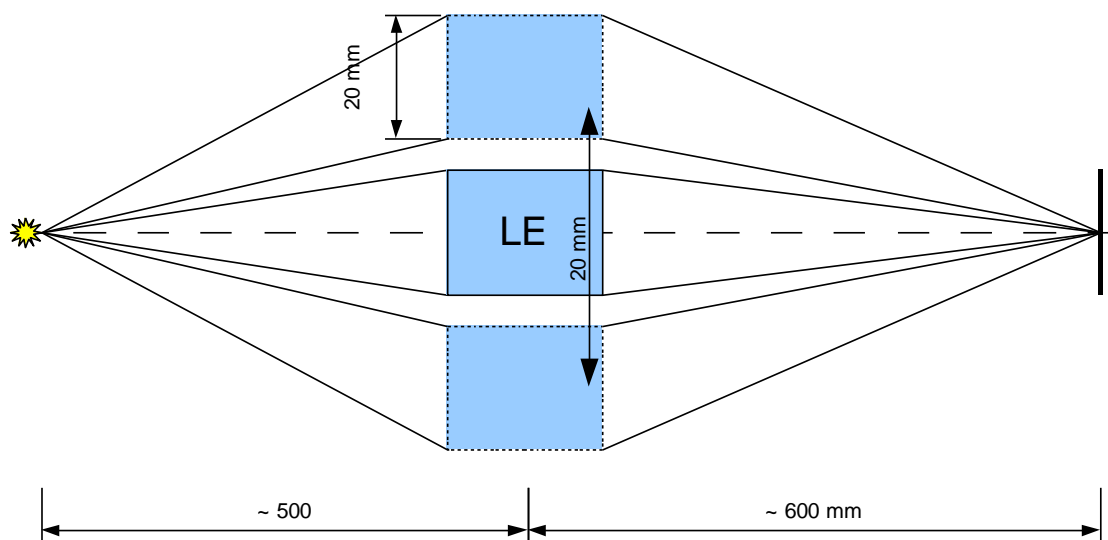
Račí oko umožňuje zvýšit o několik řádů (většinou se uvádí 2 řády) citlivost celoblohových monitorů při zachování velkého pokrytí oblohy. Ukazuje se však [4], že pro korektní použití optiky typu račí oko je třeba aplikovat řadu korekcí a to jednak geometrických a jednak spektrálních, bez kterých by račí oko ve skenovacím módu bylo „napůl slepé“.

V následujícím textu jsou demonstrovány experimentálně i teoreticky některé z obrazových vad vyžadujících korekce.

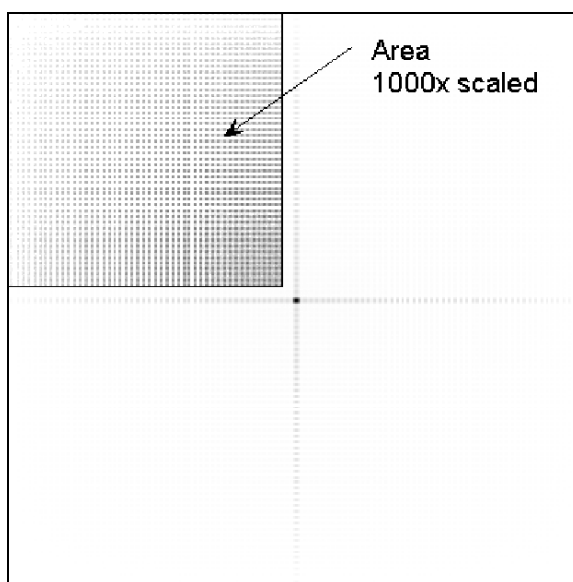
2 Srovnání simulace a experimentu

V následujících řádcích jsou srovnávány výsledky experimentu [5] s počítačovou simulací tohoto experimentu. Schéma experimentu ukazuje Obrázek 1. Pro měření byly použity:

- Rentgenový zdroj Bede Microsource pracující na 40 kV, 2 mA, velikost spotu cca 50-100 μm , emitující převážně na $\text{CuK}\alpha$ čáře (8keV).
- Račí oko zobrazující z bodu do bodu, efektivní rozměry zrcadel cca 20x20x0.1 mm, rozestup zrcadel 0.3 mm, pozlacený povrch. Vzdálenost detektoru do středu optiky byla cca 612 mm, vzdálenost detektoru a zdroje byla 1100 mm.
- Detektor Medipix2 (pro měření systematických posuvů) a Timepix (pro měření spekter), 256x256 pixelů, každý pixel 55x55 μm^2 .



Obrázek 1: Schéma experimentu. Místo pohybu zdroje bylo pohybováno optikou, zatímco poloha zdroje a detektoru byla fixní. Za těchto podmínek by teoreticky měla poloha zdroje zůstat konstantní, reálná optika však způsobuje drobné změny v poloze zdroje na detektoru.



Obrázek 2: Typický tvar zobrazeného bodového zdroje. Sestává z centrálního píku (jeden odraz od horizontálních zrcadel a jeden odraz od vertikálních), kříže kolem píku (pouze jeden odraz, a to buďto od horizontálních zrcadel – horizontální kříž, nebo od vertikálních – vertikální kříž) a pozadí (fotony prochází optikou bez jakékoli interakce).

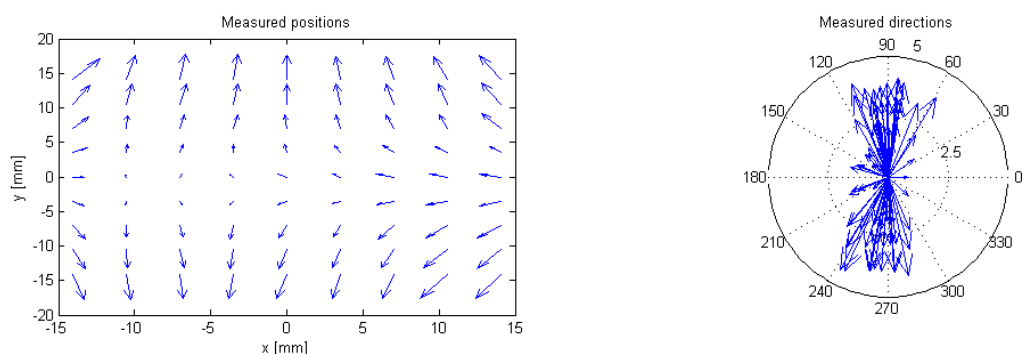
2.1 Systematický posuv

Základní problém, který budeme řešit, je, že račí oko, které se dá vyrobit, je lineární optický systém, avšak není systémem invariantním vůči posunu.

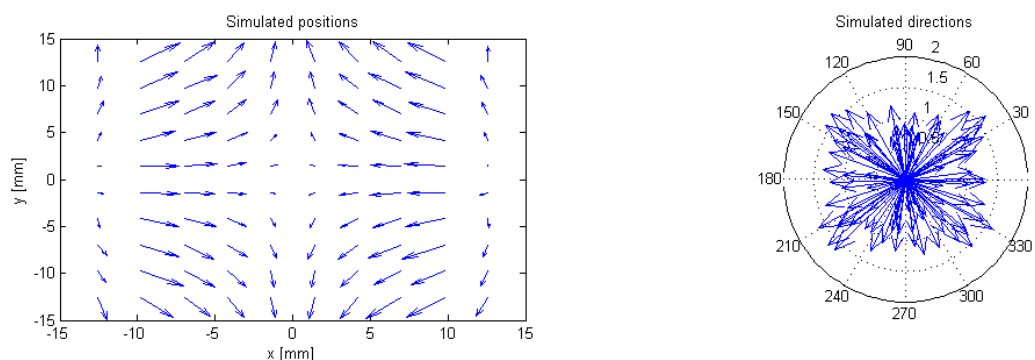
Tzv. Point Spread Function (PSF), tedy to, jak optika zobrazí bodový zdroj, je u račího oka velmi specifická. Bodový zdroj se zobrazí jako centrální pík (odraz od vertikálních i od horizontálních zrcadel), který je symetricky obklopen méně jasným křížem (odraz buďto od vertikálních nebo od horizontálních zrcadel) a dále nalezneme na většině plochy přímý průsvit optikou (viz. Obrázek 2). To však platí pouze na optické ose. Posuneme-li zdroj mimo optickou osu, dojde k posunutí píku a jeho částečné deformaci a dále ke změně tvaru kříže (přestane být symetrický vůči píku).

Posunutí píku na detektoru však ve skutečnosti není lineárně úměrné posunutí zdroje a to kvůli konečným rozměrům zrcadel a jejich uspořádání. Vytvoříme-li pravouhloú síť bodových zdrojů a zobrazíme-li je račím okem, dostaneme síť obrazů těchto zdrojů, které jsou však systematicky posunuty vůči ideálnímu stavu. Tento posun musí být začleněn do vyhodnocovacího procesu celoblohového monitoru, jinak dochází k významnému znehodnocení rekonstruovaných dat [4].

Obrázek 3 ukazuje takovéto systematické posuvy pro provedený experiment (data z [5], zpracováno stejnou metodou jako simulovaná data). Velikost systematických posuvů v jednom směru je až cca 2.6 mm (RMS), zatímco ve druhém je jen 0.8 mm (RMS). Při počítačové simulaci téže optiky s použitím kódu XAnn3D získáme výsledky, které ukazuje Obrázek 4. Systematické posuvy mají velmi podobný charakter, i když samozřejmě nejsou stejné, skutečná optika má různé deformace. Avšak délka posuvů je přibližně 0.8 mm v obou směrech (RMS).



Obrázek 3: Systematické posuvy (rozdíl mezi očekávanou a změřenou polohou) získané v průběhu experimentu. Šipky na levém obrázku jsou škálovány, šipky na pravém obrázku ukazují rozložení směrů a velikostí. Všechny délkové hodnoty jsou v milimetrech.



Obrázek 4: Simulace experimentu (viz. Obrázek 3) získaná pomocí raytracovacího software XAnn3D.

Zatímco charakter posuvů odpovídá simulaci (s přihlédnutím k možnosti deformací zrcadel a nebodového zdroje v experimentu), délka posuvů (délka šipek) je výrazně jiná v jednom ze směrů.

V experimentu bylo račí oko posouváno ve dvou kolmých směrech, zatímco zdroj i detektor zůstával na místě. V ideálním případě by se pík na detektoru měl pohybovat jen minimálně, což se skutečně v jednom ze směrů dělo. V druhém směru však pík cestoval výrazně více, téměř po celé šířce

detektoru. Takovéto chování lze očekávat, pokud nebude detektor ve správné vzdálenosti od račího oka. Při podrobnějším studiu tvaru změřeného píku lze skutečně konstatovat, že pík se jevil relativně rozostřený a to zejména v jednom směru. Zejména markantní byl tento efekt při posunu zdroje daleko mimo optickou osu. To je rovněž důvod, proč nebyl systém správně zaostřen. Ostření totiž probíhalo v konfiguraci, kdy se zdroj i detektor nacházeli na optické ose račího oka, kde tento efekt není natolik markantní.

Nabízí se otázka, proč měření vypadá tak, jako by systém nebyl zaostřen pouze v jednom směru. K zodpovězení této otázky si je třeba uvědomit, jak vypadá račí oko použité v experimentu. Račí oko fokusující z bodu do bodu se typicky vyrábí tak, že jednu sadu zrcadel tvoří zcela rovnoběžná pozlacená sklička, a sadu druhou, na tu první kolmo postavenou, tvoří již nerovnoběžná a správný úhel svírající zrcadla. Zatímco rovnoběžná sada není příliš citlivá na správnou vzájemnou polohu zdroje, optiky a detektoru, a je schopná fokusovat pro různé ohniskové vzdálenosti, je sada nerovnoběžná schopna správně fungovat (a to zejména pro mimoosové body) pouze při správně nastavené ohniskové vzdálenosti.

2.2 Změna spektra

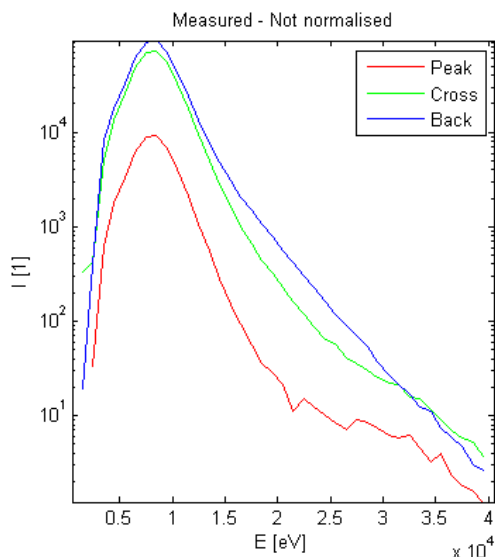
Protože je velikost reflektivity rentgenového záření na libovolném rentgenovém zrcadle velmi závislá nejen na úhlu dopadu ale i na energii dopadajících fotonů, funguje každé rentgenové zrcadlo jako spektrální filtr. Ověření změny spektra při použití račího oka je proto důležité pro korektní vyhodnocení spekter získaných v rámci astronomických aplikací.

Reflektivita typicky klesá s rostoucí energií fotonů při daném úhlu odrazu. Lze proto očekávat, že spektrum změřené v píku bude měkčí (dva po sobě jdoucí odrazy), než spektrum změřené v kříži (jediný odraz) a to bude opět měkčí než spektrum změřené v pozadí (žádný odraz, odpovídá spektru zdroje).

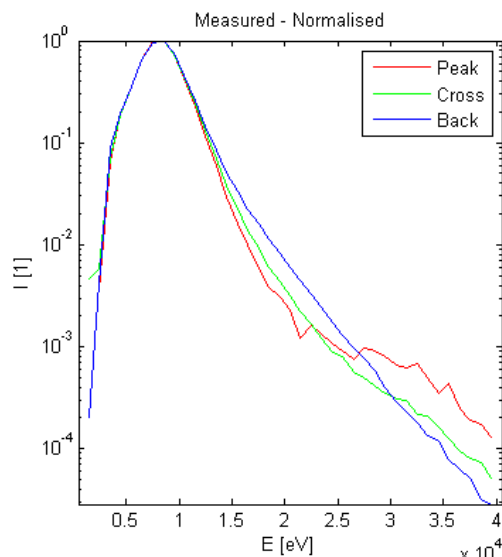
Potřebná měření bylo možno provést pouze díky unikátním vlastnostem detektoru Timepix [5]. Výsledná data ukazuje Obrázek 5 a Obrázek 6. Je třeba podotknout, že spektrální rozlišení detektoru je podstatně horší, než je šířka $\text{CuK}\alpha$ čáry použité v experimentu, proto spektrum vypadá spíše jako kontinuum než jako čárové spektrum. Pro potřeby experimentu je to však zcela dostačující.

Obrázek 5 ukazuje, že množství fotonů detekovaných v kříži a v pozadí je velmi dobře srovnatelné, zatímco množství fotonů v píku je cca 10% této hodnoty, což přibližně odpovídá typickým hodnotám získávaným v simulacích. Dále, Obrázek 6 jasně demonstrovuje, že spektrum píku je skutečně měkčí než spektrum kříže a spektrum kříže je zase měkčí než spektrum pozadí (zdroje). Nejlépe je to vidět na pořadí čar v rozsahu energií 15-22 keV. Podezřelou se jeví část grafu nad cca 25 keV, kde spektrum v píku kříží spektrum samotného zdroje a podobně je to i se spektrem v kříži.

Za normálních okolností lze totiž očekávat, že vysoké energie by neměly být do této oblasti vůbec odrazeny, neboť reflektivita pro tyto energie je velmi nízká. A pokud by byl například pík tvořen pouze odraženými fotony, nemělo by jejich spektrum za žádných okolností křížit spektrum zdroje. Při vysokých energiích však spektrum píku tvoří převážně fotony, které projdou bez jakéhokoli odrazu nebo pouze z odražených od několika málo nejbližších zrcadel. Ačkoli je jejich množství malé, je výrazně větší než množství ostatních odražených fotonů s touto energií. Lze tedy předpokládat, že zmíněný efekt mají na svědomí právě tyto fotony, které nehrají prakticky žádnou roli při malých energiích.



Obrázek 5: Spektra změřená v píku (červená), kříži (zelená) a pozadí (modrá). Spektra jsou opravená o citlivost detektoru.



Obrázek 6: Změřená spektra (viz. Obrázek 5), avšak normalizovaná na jednotkovou maximální výšku.

Abychom ověřili nastíněnou teorii, provedli jsme opět simulaci celého experimentu pomocí raytracovacího software. Jako spektrum zdroje jsme použili spektrum změřené detektorem Timepix v pozadí. Není to sice skutečné spektrum zdroje, neboť je rozšířeno spektrální odezvou detektoru, avšak protože budeme srovnávat měření s experimentem, není to na škodu. V následující simulaci není započítána absorpce záření ve vzduchu (což se dále ukáže jako základní problém).

Výsledky simulace zobrazuje Obrázek 7. Byly provedeny simulace dvě, jedna s beamstopem, který znemožnil většině přímých fotonů do prostoru píku dopadnout (a zbyly tak pouze odražené), a bez beamstopu, který odpovídal reálnému experimentu. Opět je vidět měknutí spektra za píkem ve srovnání se zdrojem. Přibližné poměry výšek jednotlivých spekter rovněž odpovídají (není ukázáno na grafu, ten je normovaný na jedničku). Velikost použitého beamstopu byla menší, než velikost plochy pokládané za pík (ta byla zvolena tak, aby odpovídala experimentu, kde byl pík větší než v simulaci kvůli rozmazání). I když však zvolí rozměr píku menší než velikost beamstopu, není efekt křížení (viz. Obrázek 6) pozorovatelný, respektive jde vzhledem k změřenému jen o velmi nepatrný náznak. Vysvětlení efektu je tedy třeba hledat jinde.

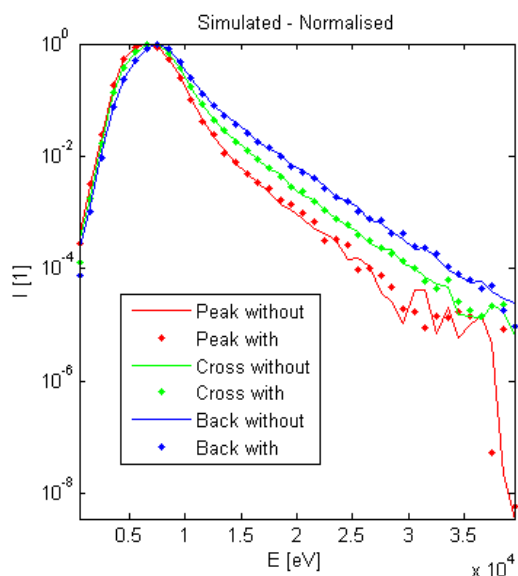
Zdá se, že při započítání různé absorpce rentgenového záření ve vzduchu lze dosáhnout principiální shody s experimentem. Příslušnou simulaci však není možné provést se stávající verzí software XAnn3D. Tato vlastnost je v současné době začleňována dodavatelem software a simulace bude opakována.

Mezitím jsme však pro zjištění toho, jak se celý systém se započtením absorpce chová, provedli následující aproximaci:

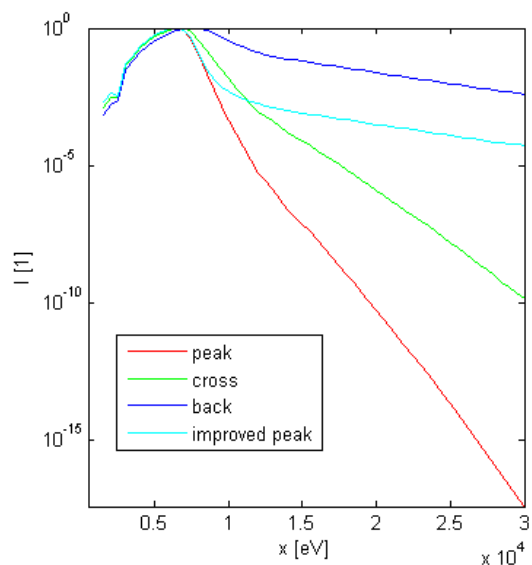
- Zjistili jsme si transmissi záření v závislosti na energii fotonů pro cca 500 mm úsek vzduchu.
- Zjistili jsme si reflektivitu pro typický úhel dopadu v račím oku.
- Ze změřeného spektra jsme potom s použitím transmise odhadli skutečné (po cca 1000 mm vzduchu).
- Spektrum v kříži jsme odhadli pomocí skutečného spektra, transmise jedné reflexe a opětovné transmise.
- Spektrum v píku jsme odhadli pomocí skutečného spektra, transmise, dvojí reflexe a opětovné transmise.

- Vylepšené spektrum v píku jsme pak odhadli jako součet detekovaného spektra zdroje a detekovaného spektra v píku v poměru odpovídajícím ploše račího oka (z této plochy je odraženo záření) a ploše píku (tedy ploše odpovídající přímo prošlým fotonům).

Výsledkem je sice pouze kvalitativní náhled (viz. Obrázek 8), který však ukazuje křížení spektra píku se spektrem kříže. Tento odhad nám dává návod na to jakým způsobem hodláme vést další virtuální experimenty s vylepšeným raytracingovým softwarem.



Obrázek 7: Simulovaná spektra v píku (červená), v kříži (zelená) a v pozadí (modrá) získaná ze simulace. Čárou jsou vyznačeny výsledky bez beamstopu, body výsledky s beamstopem. Data nejsou korigována na citlivost detektoru.



Obrázek 8: Kvalitativní náhled normovaných spekter se započtením absorpce záření ve vzduchu. Původní spektrum píku (červená) se díky fotonům procházejícím bez jakékoli reflektivity mění sklon a vzniká azurová křivka, která protíná spektrum kříže (zelená), který sám by se počal stáčet při vyšších energiích.

3 Závěr

Data získaná při první systematictější experimentální analýze vad zobrazení optiky typu račí oko byla podrobena srovnání s experimentem. Závislost rozdílu skutečné a očekávané polohy bodového zdroje v závislosti na poloze na detektoru vyšla v experimentu reálném i virtuálním velmi podobně v jednom směru (cca 0.8 mm RMS), zatímco ve druhém směru byl experiment mnohem horší (až 2.6 mm proti 0.8 mm RMS), což lze vysvětlit nedostatečně dobrým polohováním detektoru a zdroje do fokálních oblastí optiky. Dále bylo ověřeno, že se optika mění spektrum zdroje podle předpovědi pro nižší energie (8-12 keV) chová podle předpovědi, pro vyšší energie resp. celé spektrum se ukazuje jako důležité pro shodu experimentu s výpočtem započítat absorpci ve vzduchu, což je předmětem aktuálních snah.

4 Poděkování

Děkujeme za podporu Ministerstvu školství, mládeže a tělovýchovy České republiky, výzkumnému záměru číslo MSM6840770022 s názvem „Laserové systémy, záření a moderní optické aplikace“. Dále děkujeme Ústavu Technické a Experimentální Fyziky za zapůjčení detektorů Medipix2 a Timepix a dále Rigaku Innovative Technology Europe s.r.o. za poskytnutí optiky typu račí oko. Tato práce vznikla v rámci spolupráce Medipix2.

Reference

- [1] R. Hudec, et al., *Astronomical lobster eye telescopes*, Proc. of SPIE, vol. 5488, pp. 449-459, (2000)
- [2] L. Šveda, et al., *Lobster X-ray All Sky Monitor---Novel experiment for monitoring GRBs and XRFs*, Il Nuovo Cimento C, vol. 28, Issue 4, p.829, (2005)
- [3] L. Bassani, G. di Cocco: *Imaging in High--Energy Astronomy*, Kluwer Academic Publishers, 177-182, ISBN 0-7923-3788-3 (1995)
- [4] L. Švéda, *Multi--Foil X--Ray Optical Systems and Image Analysis in High--Temperature Plasma Physics*. ČVUT, Praha, ČR, disertační práce, 2006
- [5] V. Tichý, et al., *Capabilities of Medipix2 and Timepix Devices as Detectors for Lobster Eye X-Ray Optics*. to be published in Conf. Proc. ESA CNES ICSO 2008

Libor Švéda

svedal@troja.fifi.cvut.cz, libor.sveda@elya.cz

Vladimír Tichý

tichyv1@fel.cvut.cz