

Jak se pozorují černé díry? - část 2.
Základy rentgenové astronomie



Jiří Svoboda

Astronomický ústav Akademie věd ČR

Vybrané kapitoly z astrofyziky, Astronomický ústav UK, prosinec 2013

Osnova přednáškového cyklu

- Úvodní přednáška
 - popularizační přednáška z Týdne vědy a techniky
 - jak a kde pozorujeme černé díry ve vesmíru?
 - metody detekce černých děr – současné i budoucí
- Rentgenová astronomie
 - proces redukce dat a spektrální analýza
 - astrofyzikální modely pro rentgenová spektra
- Otevřené problémy současné astrofyziky akrečních disků okolo černých děr
- Závěr, diskuze, sepisování návrhu na pozorování,...

Co si pamatujeme z minulé přednášky?

- akreční disky okolo černých děr jsou zahřáté na vysoké teploty (10^7 K u stelárních, 10^4 K u supermasivních černých děr)
 - fotony termálního záření se rozptylují v horké koróně, která je tvořena relativistickými elektrony
 - fotony získávají energii inverzním Comptonovým rozptylem
 - výsledkem je tvrdé mocnné spektrum
- => akreující černé díry jsou silné rentgenové zdroje
- zemská atmosféra je nepropustná pro rentgenové záření
 - rentgenová astronomie pomocí družicových laboratoří

Program dnešní přednášky

- rentgenová astronomie
 - základní pojmy & jednotky
 - astrofyzikální zdroje rentgenového záření
- rentgenové dalekohledy
 - typy detektorů
 - kalibrace & instrumentální problémy (pile-up)
- získání a zpracování rentgenových dat
 - archívy dat - HEASARC (NASA's High Energy Astrophysics Science Archive Research Center), XMM-Newton archív,...
 - redukce dat & příprava spekter
- rentgenová spektrální analýza

Rentgenové záření

- 1895 Wilhelm Conrad Röntgen objevuje paprsky X
 - 1901 Nobelova cena (vůbec první udělená NC)
- velmi energetické záření, které vzniká při interakcích urychlených elektronů
- široké využití:
 - v medicíně díky prostupnosti tkáněmi (zlomeniny, zuby)
 - v chemii díky silným ionizačním vlastnostem
 - analytická fluorescenční spektroskopie
 - v astronomii – ke studiu velmi horkého vesmíru
- zvoleno za nejvýznamnější lidský objev návštěvníky vědeckého muzea v Londýně

Typické jednotky pro RTG spektrum

- frekvence: kiloelektronvolt (keV)
 - $1 \text{ eV} \approx 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - $E = h \cdot f$ (Planckova konstanta: $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)
 - $1 \text{ keV} \approx 2.418 \times 10^{17} \text{ Hz}$
- vlnová délka: angström
 - $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$
 - $\lambda = c/f$ (rychlost světla: $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 - $1 \text{ keV} = 12.4 \text{ Å}$
- online nástroj pro převod jednotek:
 - <http://heasarc.nasa.gov/cgi-bin/Tools/energyconv/energyConv.pl>

Astrofyzikální procesy vedoucí k emisi rentgenového záření

- brzdné záření (bremsstrahlung)
 - vyzáření na úkor kinetické energie nabitých částic
- synchrotronové záření
 - záření urychlených elektronů v magnetickém poli
- termální záření
 - pro teploty převyšující miliony stupňů
- inverzní Comptonův rozptyl
 - rozptyl světla na relativistických elektronech

Astrofyzikální procesy vedoucí k emisi rentgenového záření

- brzdné záření (bremsstrahlung)
 - vyzáření na úkor kinetické energie nabitých částic
- synchrotronové záření
 - záření urychlených elektronů v magnetickém poli
- termální záření
 - pro teploty převyšující miliony stupňů
- inverzní Comptonův rozptyl
 - rozptyl světla na relativistických elektronech

široko-pásmové kontinuum

Astrofyzikální procesy vedoucí k emisi rentgenového záření

- brzdné záření (bremsstrahlung)
 - vyzáření na úkor kinetické energie nabitých částic
- synchrotronové záření
 - záření urychlených elektronů v magnetickém poli
- termální záření
 - pro teploty převyšující miliony stupňů
- inverzní Comptonův rozptyl
 - rozptyl světla na relativistických elektronech
- "odraz" vysoko-energetického záření, fluorescence

široko-pásmové kontinuum

Astrofyzikální zdroje rentgenového záření

- rentgenové dvojhvězdy
 - akreující černé díry
 - neutronové hvězdy
 - akreující bílí trpaslíci (super-soft sources)
- aktivní galaxie
 - Seyfertovy galaxie a kvasary
 - kupy galaxií
- zbytky po výbuších supernov (supernova remnants)
- hvězdy, komety, mezihvězdná hmota

Rentgenové detektory

- v rentgenové astronomii jde o **každý foton!**
 - detekce toku záření o velikosti 1 fotonu/cm²/s v energetickém rozsahu 1-10 keV znamená rentgenově jasný zdroj
- existují různé druhy detektorů
 - vhodnost jednotlivých detektorů závisí na tom, co potřebujeme přesně změřit

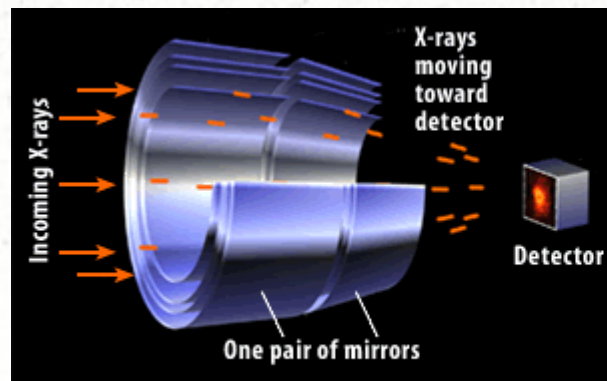
<i>potřebujeme přesně zaznamenat:</i>	<i>detektor musí mít výborné:</i>
astrometrickou pozici zdroje	úhlové rozlišení
energii zachyceného fotonu	spektrální rozlišení
čas příletu fotonu	časové rozlišení

Ideální detektor

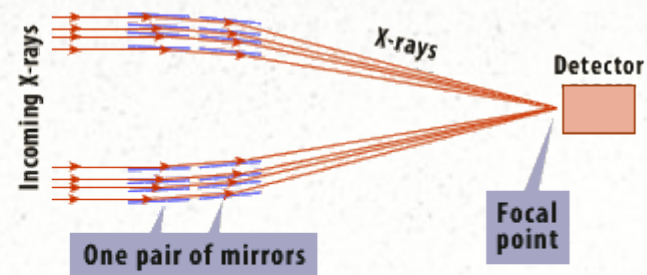
- aby měl detektor výborné úhlové, spektrální i časové rozlišení, musí mít:
 - velmi velkou sběrnou plochu
 - bez dostatečného signálu není možné studovat slabé zdroje, vnitřní strukturu plošných zdrojů ani velmi rychlou časovou proměnnost
 - velkou spektrální citlivost s vysokou kvantovou účinností
 - velmi přesné měření času (pro CCD rychlý odečítací cyklus)
 - výbornou fokusaci pro přesná astrometrická měření

Ideální detektor

- aby měl detektor výborné úhlové, spektrální i časové rozlišení, musí mít:
 - velmi velkou sběrnou plochu
 - bez dostatečného signálu není možné studovat slabé zdroje, vnitřní strukturu plošných zdrojů ani velmi rychlou časovou proměnnost
 - velkou spektrální citlivost s vysokou kvantovou účinností
 - velmi přesné měření času (pro CCD rychlý odečítací cyklus)
 - výbornou fokusaci pro přesná astrometrická měření



Courtesy Chandra mission website:
<http://chandra.harvard.edu>



Chandra's mirrors are positioned so they're almost parallel to the entering X-rays. The mirrors look like open cylinders, or barrels. The X-rays skip across the mirrors much like stones skip across the surface of a pond.

Ideální detektor

- aby měl detektor výborné úhlové, spektrální i časové rozlišení, musí mít:
 - velmi velkou sběrnou plochu
 - bez dostatečného signálu není možné studovat slabé zdroje, vnitřní strukturu plošných zdrojů ani velmi rychlou časovou proměnnost
 - velkou spektrální citlivost s vysokou kvantovou účinností
 - velmi přesné měření času (pro CCD rychlý odečítací cyklus)
 - výbornou fokusaci pro přesná astrometrická měření
- další praktické vlastnosti ideálního detektoru:
 - kosmické částice a rentgenové pozadí jsou dokonale odstíněny
 - přístroj je levný, lehký a pracuje efektivně s minimálním výkonem
- takový detektor neexistuje

Interakce rtg záření s materiálem

- rentgenové záření interaguje s elektrony v atomových obalech
 - atomy s vysokým atomovým číslem Z mají velkou elektronovou hustotu a proto blokují průchod rtg záření
- základní typy interakcí rtg fotonu s materiálem:
 - **fotoelektrická absorpce** (rtg foton zcela pohlcen, energie je předána elektronu)
 - **Comptonův rozptyl** (rtg foton předá jen část energie)
 - Rayleighův rozptyl (rtg foton změní směr, ale energii neztratí)

Interakce rtg záření s materiálem

- rentgenové záření interaguje s elektrony v atomových obalech
 - atomy s vysokým atomovým číslem Z mají velkou elektronovou hustotu a proto blokují průchod rtg záření
- základní typy interakcí rtg fotonu s materiálem:
 - **fotoelektrická absorpce** (rtg foton zcela pohlcen, energie je předána elektronu)
 - **Comptonův rozptyl** (rtg foton předá jen část energie)
 - Rayleighův rozptyl (rtg foton změní směr, ale energii neztratí)
- který jev nastane, závisí na:
 - energii fotonu
 - vazbové energii elektronu
 - vzájemném úhlu srážky

?

Ke kterému z uvedených procesů dochází v rentgenových detektorech?

Fotoelektrický jev

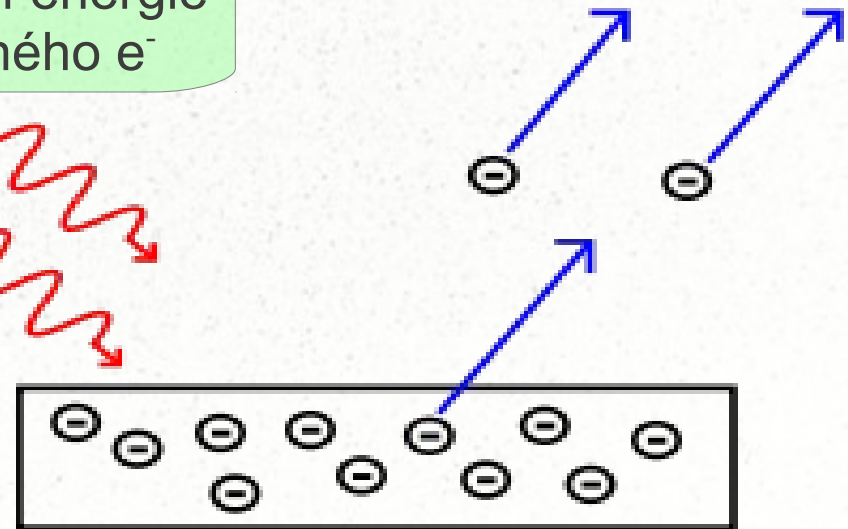
- experimentálně popsán Heinrichem Hertzem (1887)
- kvantové vysvětlení podáno Albertem Einsteinem (1905)
 - 1921 Nobelova cena za fyziku

- $h \cdot f = h \cdot f_0 + E_{\max}$

energie fotonu

minimální
energie potřebná
k vyražení e^-

maximální energie
vyraženého e^-



Základní princip rtg dalekohledu

1) nejprve je třeba dostat rentgenové fotony k detektoru

- fokusace speciálními zrcadly, které odráží a směřují rentgenové paprsky do ohniska

2) je třeba zachytit co nejvíce rtg fotonů

- fotoelektrická absorpce, při které dojde
 - k uvolnění elektronů, které se pomocí napětí přivedou na elektrody – tzv. **ionizační detektory**
 - k uvolnění tepla – tzv. **kalorimetry**

3) u každé události (tzv. event) je třeba zaznamenat:

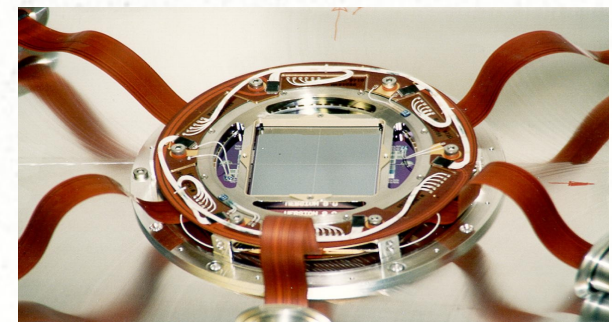
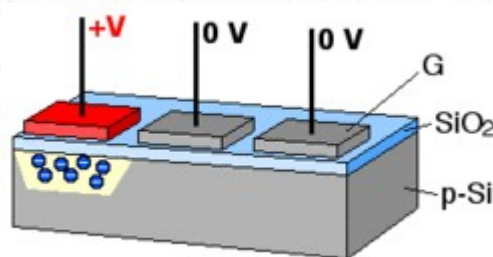
- pozici na detektoru
- čas události
- velikost uvolněné energie (elektrický náboj, záření, teplo)

Základní typy detektorů

- **plynové scintilátory**
 - průchod rtg fotonu v komoře je doprovázen zábleskem
- **ionizační – různé typy:**
 - proportional counters (čítače)
 - microchannel plates (velké rtg fotonásobiče)
 - silikonové čipy (CCD)
- **kalorimetry**
 - detektor je třeba chladit na teplotu blízkou 0 K
 - excitované e^- se vrací do původního stavu avšak s energetickými ztrátami v podobě uvolněného tepla

CCD

- CCD = charge coupled devices
- vynalezeny 1969 Georgem Elwoodem Smithem a Willardem Boylem v Bellových laboratořích
 - Nobelova cena za fyziku 2009
- široké využití v astronomii od infračervené oblasti až po rentgenovou
 - CCD detektory přítomny téměř na všech významných současných rentgenových observatořích (XMM-Newton, Chandra, Suzaku, Swift)
- princip činnosti:

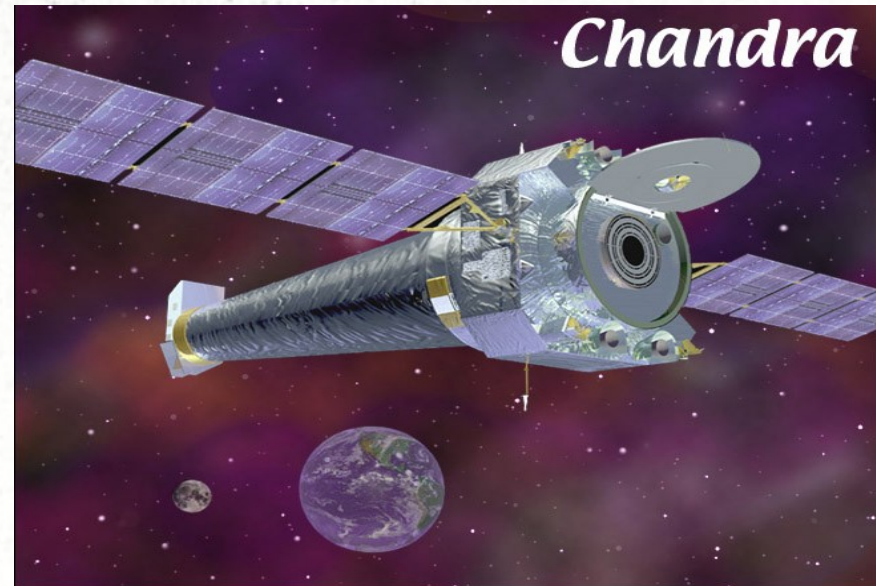


Rentgenové dalekohledy

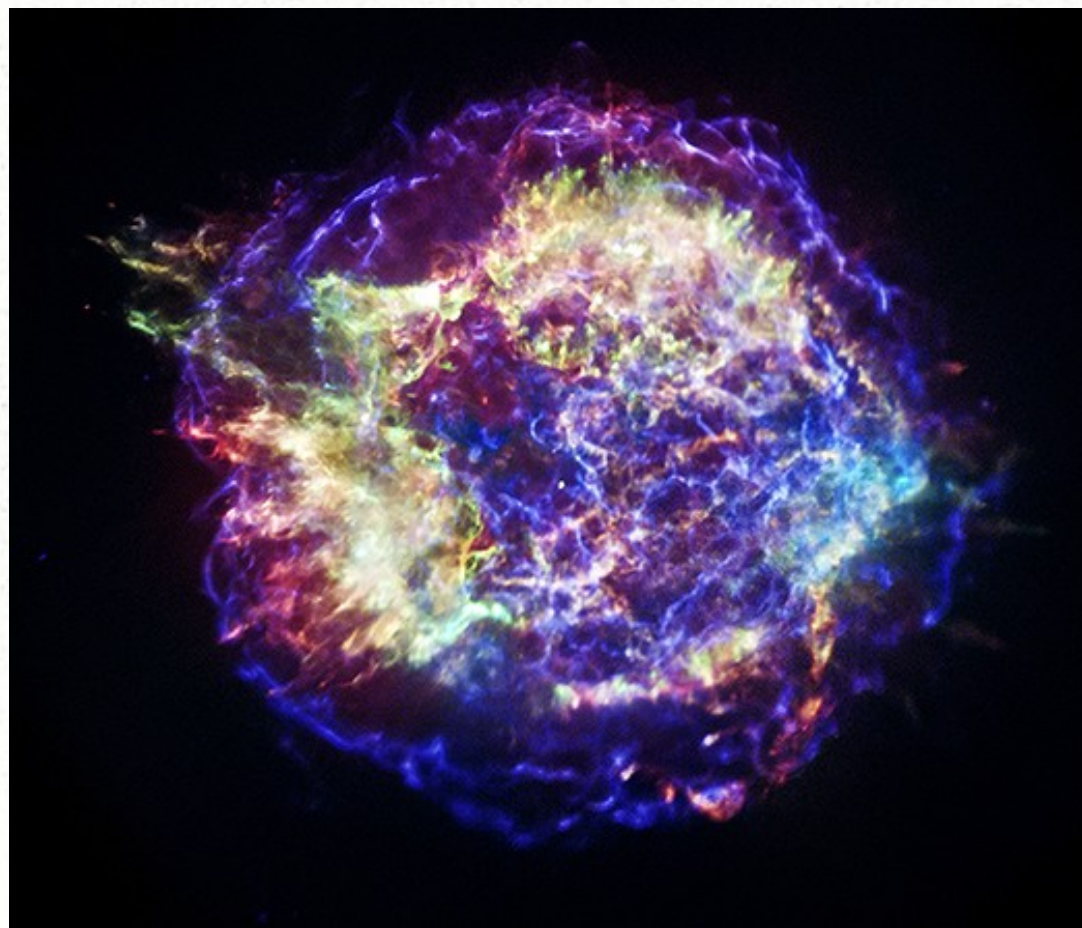
- monitorovací
 - snaží se posbírat co nejvíce rentgenových fotonů za krátký časový interval, aby mohly nasnímat co nejširší oblast na obloze
 - Uhuru, ROSAT, RXTE, MAXI
- zaměřené na citlivá pozorování jednotlivých zdrojů
 - vysoké prostorové rozlišení – Chandra, Astro-H (2015)
 - vysoké spektrální rozlišení – Chandra, XMM, Suzaku
 - vysoký poměr signálu k šumu (lepší statistika)
 - velká propustnost – XMM, Chandra, Suzaku
 - velká sběrná plocha – XMM (v budoucnu Loft?)

Chandra

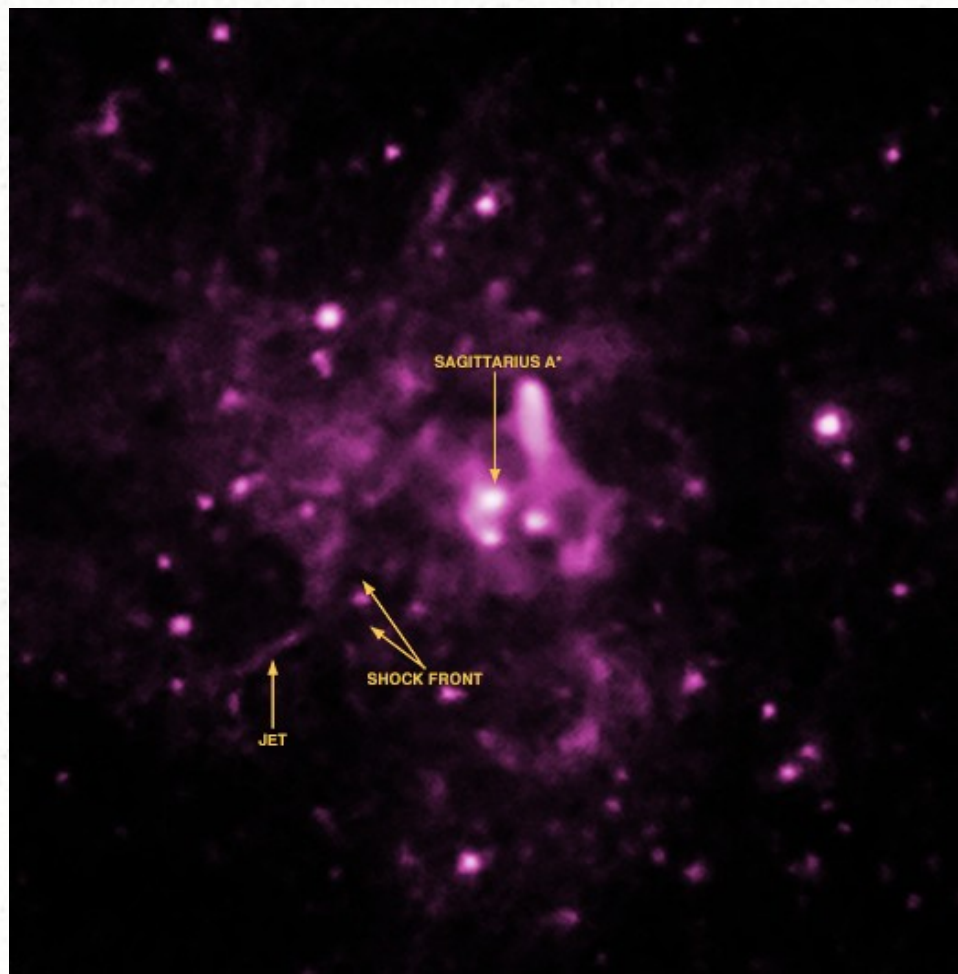
- rentgenová laboratoř NASA, vypuštěna 1999
- má několik detektorů
 - CCD čipy (ACIS), microchannel plates (HRC)
 - mřížkové spektroskopy (HETG, LETG)



Obrázky s Chandrou – Cas A



*Obrázky s Chandrou – Sgr A**



XMM-Newton

- rentgenová laboratoř ESA, vypuštěna 1999



Image courtesy of D. Fisher

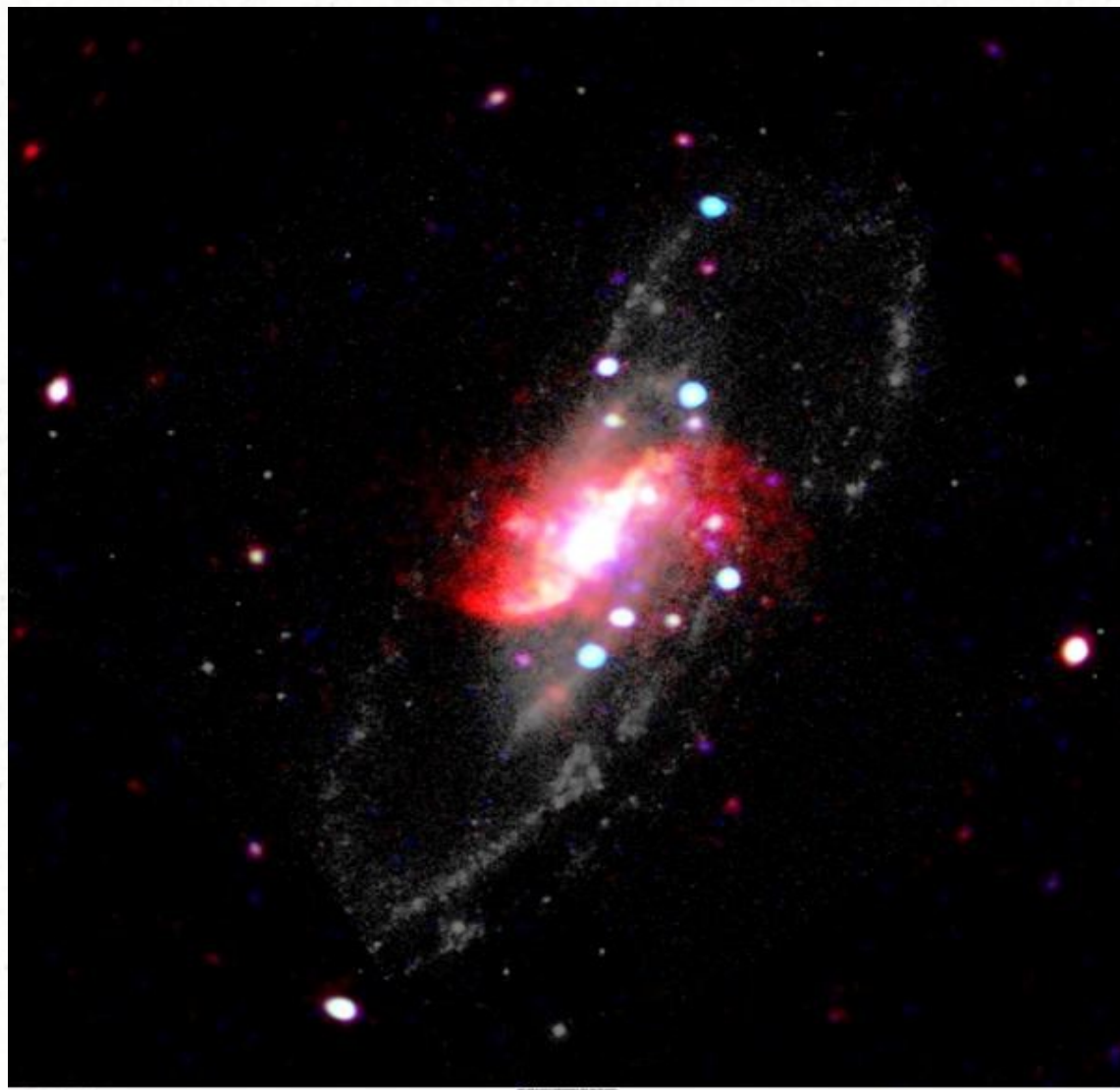
XMM-Newton preparation

European Space Agency

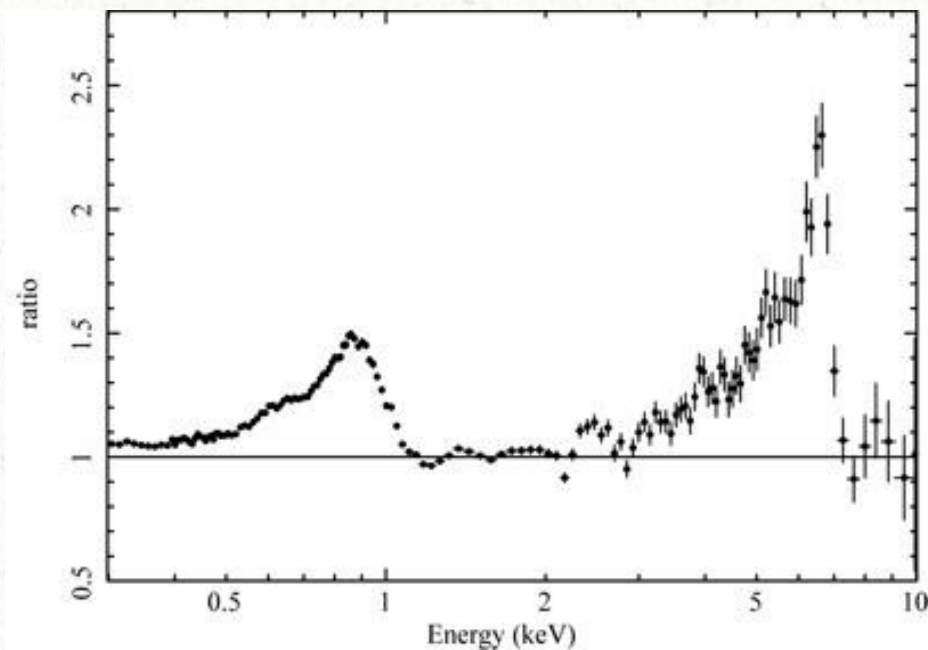


- obsahuje:
- 3 CCD kamery
 - 2 mřížkové spektroskopy
 - optický monitor

Obrázky s XMM-Newton



Spektra s XMM-Newton



1H0707-495 Broad Iron Lines

Image courtesy of Courtesy of

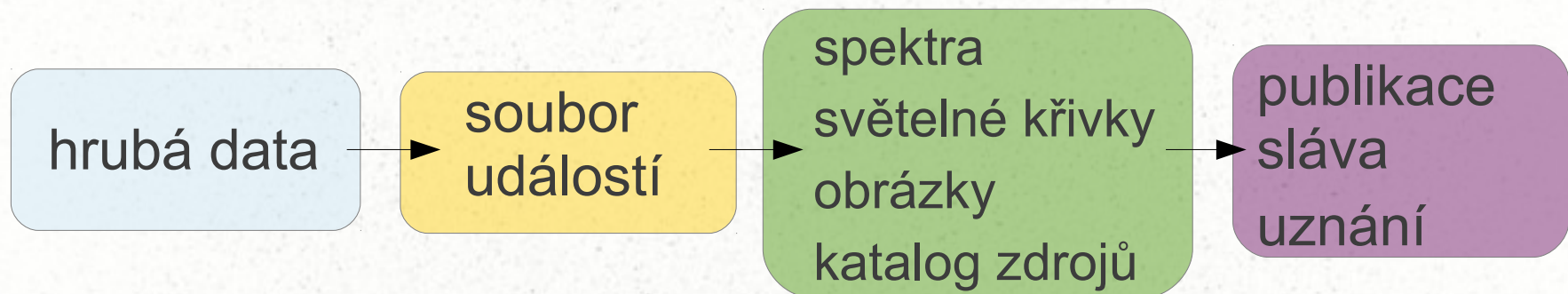
A. Fabian

European Space Agency



Redukce dat – obecné schéma

- proces, jak ze souboru událostí získat obrázky, spektra, světelné křivky
- schéma redukce dat:



- tři hlavní problémy při redukci rentgenových dat:
 - kalibrace
 - kalibrace
 - kalibrace

Kalibrace rtg detektoru

- kalibrace detektoru probíhá ve dvou stupních
 - v pozemských laboratořích při výrobě detektoru
 - na oběžné dráze (kontinuální proces)
- proč je problematická?
 - nikdy není dokonalá! (v současnosti typicky $< 5\%$)
 - vlastnosti detektoru se s časem vyvíjí!
 - CCD jsou narušovány kosmickým zářením, u plynových detektorů dochází k pozvolnému úniku plynu
 - neexistuje dokonale stálý kalibrační zdroj!
 - např. astrofyzikální zdroje - Krabí mlhovina, 3C 273
- pokud máte tu smůlu, že dosáhnete vysokého poměru signálu k šumu, systematické chyby začnou dominovat

Tvary detekce rtg fotonu u CCD

- u CCD detektorů mohou nastat různé případy při zaregistrování události
 - zvláštní tvary jsou typicky způsobeny kosmickým zářením

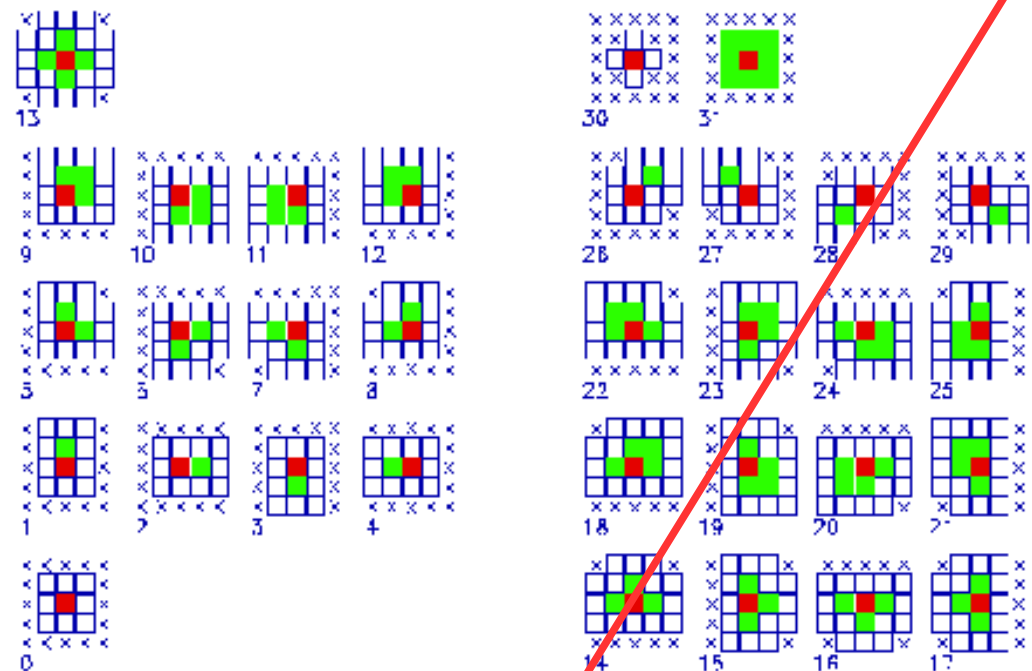
quadruples

triples

doubles

singles

Imaging pattern table used in ground calibration and in flight



Pile-up

- instrumentální problém CCD čipů při expozici jasných zdrojů, kdy více fotonů dopadne do blízkých pixelů a není tak možné určit jejich původní energie

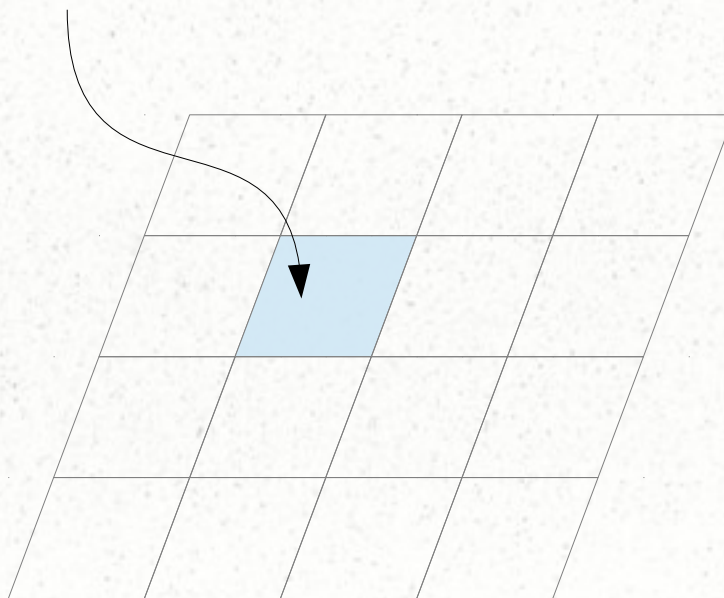
Pile-up

- instrumentální problém CCD čipů při expozici jasných zdrojů



Pile-up

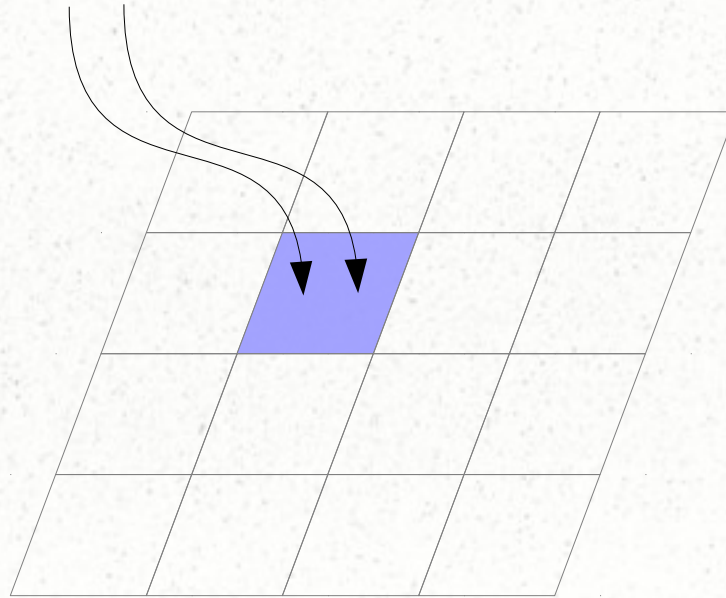
- instrumentální problém CCD čipů při expozici jasných zdrojů



Pile-up

- instrumentální problém CCD čipů při expozici jasných zdrojů

pile-up nastane, když v rámci jednoho vyčítacího cyklu přiletí do blízkého pixelu jiný foton

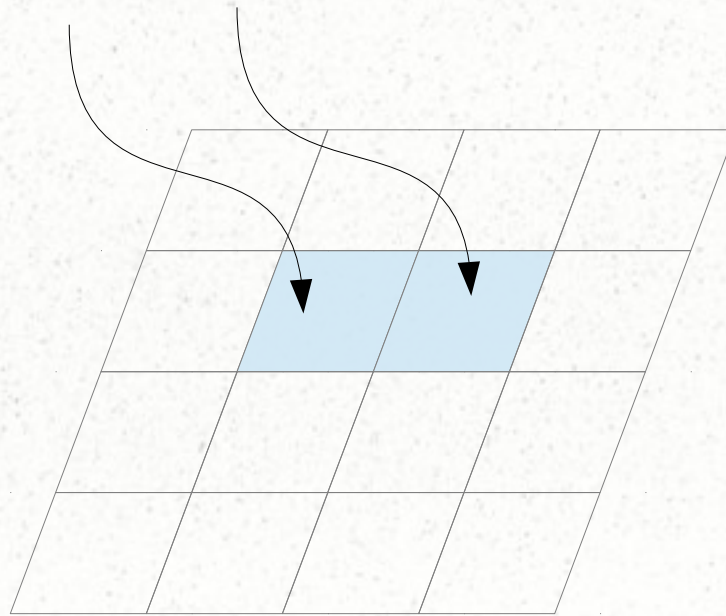


2 "single" události budou zaregistrovány jako 1 "single"

Pile-up

- instrumentální problém CCD čipů při expozici jasných zdrojů

pile-up nastane, když v rámci jednoho vyčítacího cyklu přiletí do blízkého pixelu jiný foton

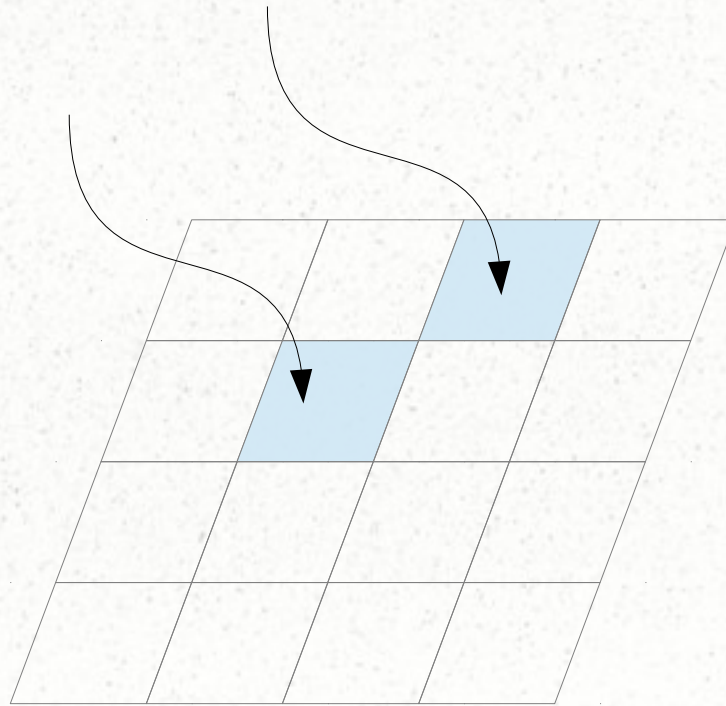


2 "single" události budou zaregistrovány jako 1 "double"

Pile-up

- instrumentální problém CCD čipů při expozici jasných zdrojů

pile-up nastane, když v rámci jednoho vyčítacího cyklu přiletí do blízkého pixelu jiný foton



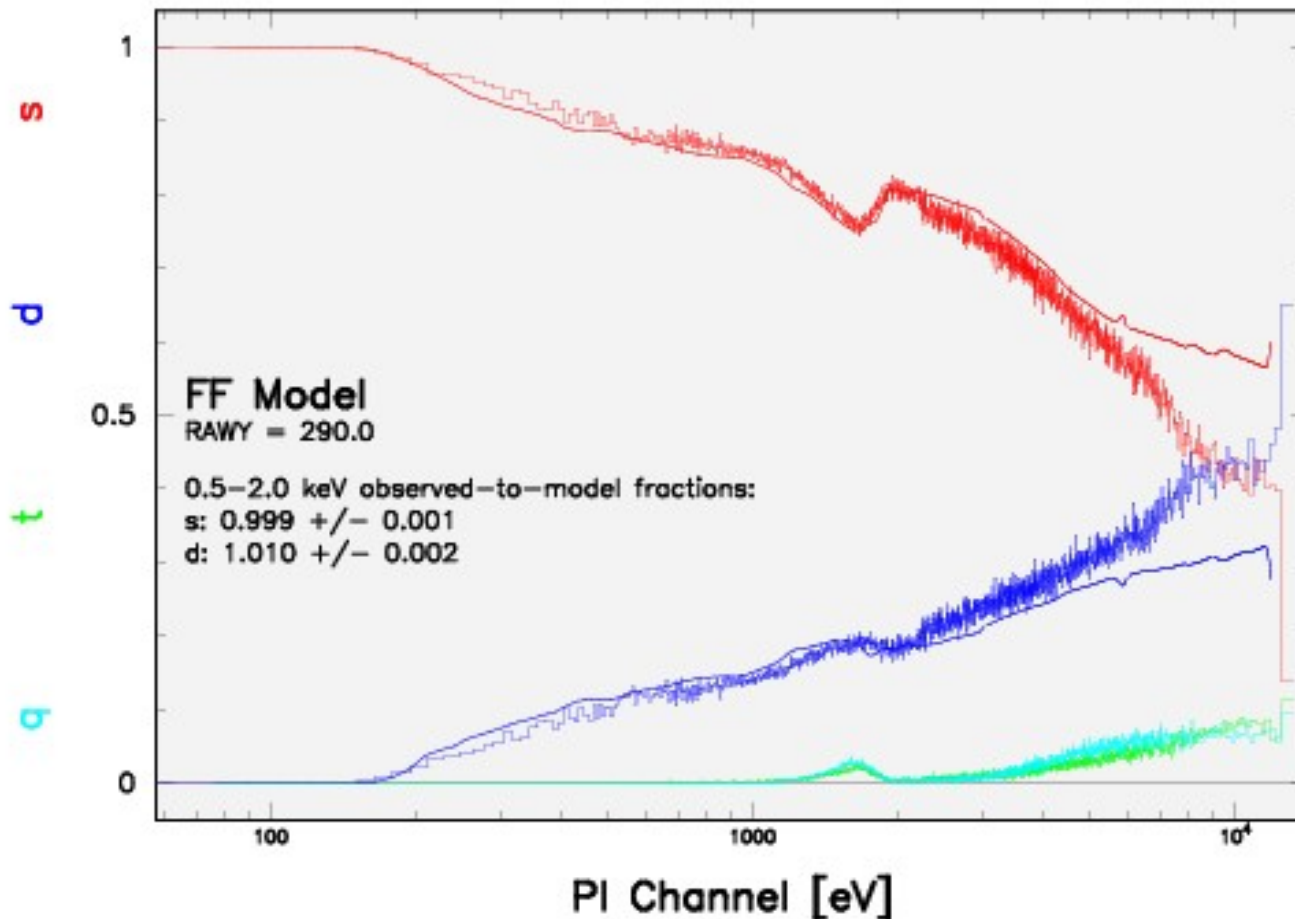
2 "single" události budou odstraněny (konfigurace neodpovídá rtg fotonu)

Pile-up

- instrumentální problém CCD čipů při expozici jasných zdrojů
- způsobí, že se dva či více fotonů zaregistrují jako jeden velmi silný
 - může dojít k překročení horního limitu pro energii fotonu nebo se dvě události zaregistrují jako nerentgenové
 - => ztráta určitých fotonů
 - ovlivní sklon spektra (ale třeba i červené křídlo čáry železa)

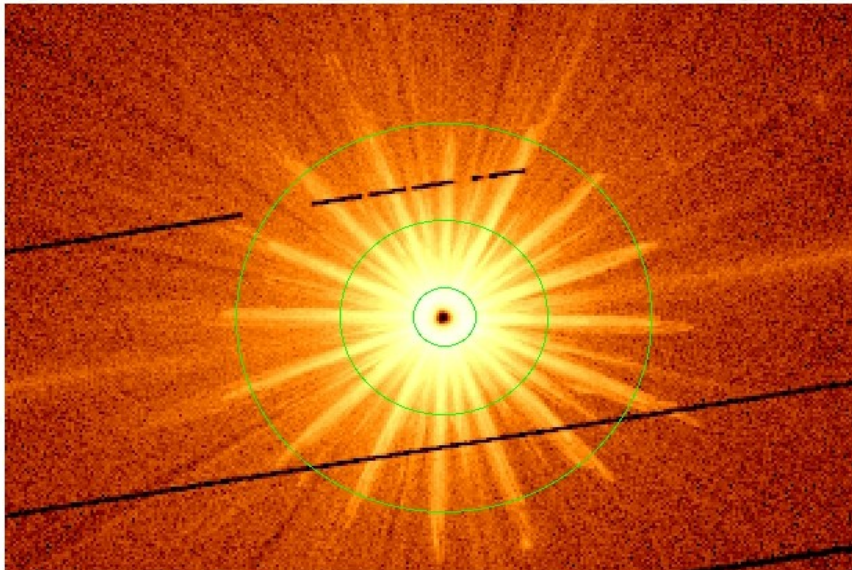
Pile-up - identifikace

- podle poměru tzv. single vs. double events:



Pile-up – prevence a řešení

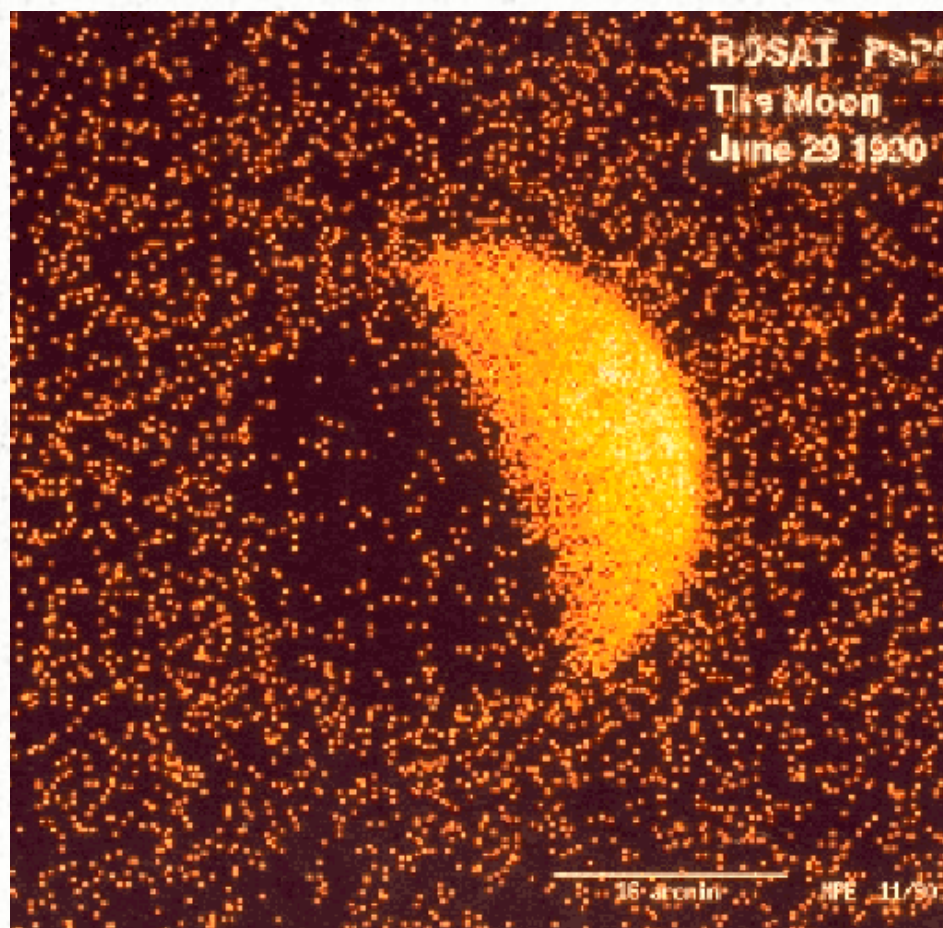
- dá se předejít výběrem módu s rychlým odečítacím cyklem
 - při návrhu pozorování je vždy třeba uvést předpokládaný tok záření a zdůvodnit výběr pozorovacího módu
- dá se částečně eliminovat



- odstraněním centrální části PSF (point spread function)

pile-up je také možné modelovat/simulovat, ale obecně platí, že prevence je vždy lepší!

Kosmické rentgenové pozadí



Kosmické rentgenové pozadí

- nad 3 keV je isotropní => extragalaktický původ
- hlavním přispěvatelem jsou zřejmě aktivní galaxie
 - studiem vlastností rentgenového pozadí je možné studovat vlastnosti aktivních galaxií, například poměrné zastoupení galaxií typu 1 (neabs.) a 2 (absorbované)
- většinou potřebujeme pozadí odečíst, abychom odstranili kontaminaci rentgenového záření zkoumaného zdroje
 - **odečtení** kosmického pozadí z místa, kde nepřispívá náš zdroj (možné pouze u zobrazovacích detektorů s dostatečně velkým zorným polem)
 - **modelování** kosmického rentgenového pozadí
- kromě kosmického pozadí existuje i tzv. **nerentgenové pozadí** (kosmické částice), kontaminace ze Slunce, Země, vlastního detektoru

Získání napozorovaných dat

- dva způsoby, jak se dostat k observačním datům
 - napsat vlastní návrh pozorování
 - stáhnout archivní data
 - každá mise má jinou politiku zveřejňování dat, obecně jsou napozorovaná data po nějaké době přístupná veřejnosti
- archiv všech rentgenových pozorování
 - HEASARC (High Energy Astrophysics Science Archive Research Center) – viz <http://heasarc.nasa.gov/>
- archiv jednotlivých rentgenových misí
 - XMM-Newton: <http://nxsa.esac.esa.int>
 - Chandra: <http://cxc.harvard.edu/ciao/>

Vyhledávání v archívu

- vyhledávání podle kritérií:
 - identifikační číslo pozorování
 - jednoznačné - nezapomínejte je psát do publikací!
 - jméno zdroje
 - typicky má jeden zdroj mnoho různých jmen (a ne všechna jsou v Simbadu)
 - souřadnice zdroje
 - uvádí se spolu s maximální odchylkou
 - např. XMM-Newton uvádí astrometrickou odchylku pro rentgenová pozorování 3"
 - mnoho dalších možností
 - u nového archívu XMM-Newton například i podle klíčových slov v abstraktu pozorovacího návrhu

Informace v pozorovacích archívech

- kdy používat centrální a kdy specifický archív?
 - centrální, když chceme znát informace o všech pozorování nějakého zdroje
 - specifický, když hledáme konkrétní pozorování
- v archívu je mnoho důležitých informací o pozorování
 - observační módy detektorů, délka expozice, kvalita, ..., jméno navrhovatele, odkaz na publikace
- data ke stáhnutí
 - **hrubá data** (raw data) – je třeba vlastní redukce
 - **hotové produkty** (pipeline products) – vytvořené automatickou redukcí

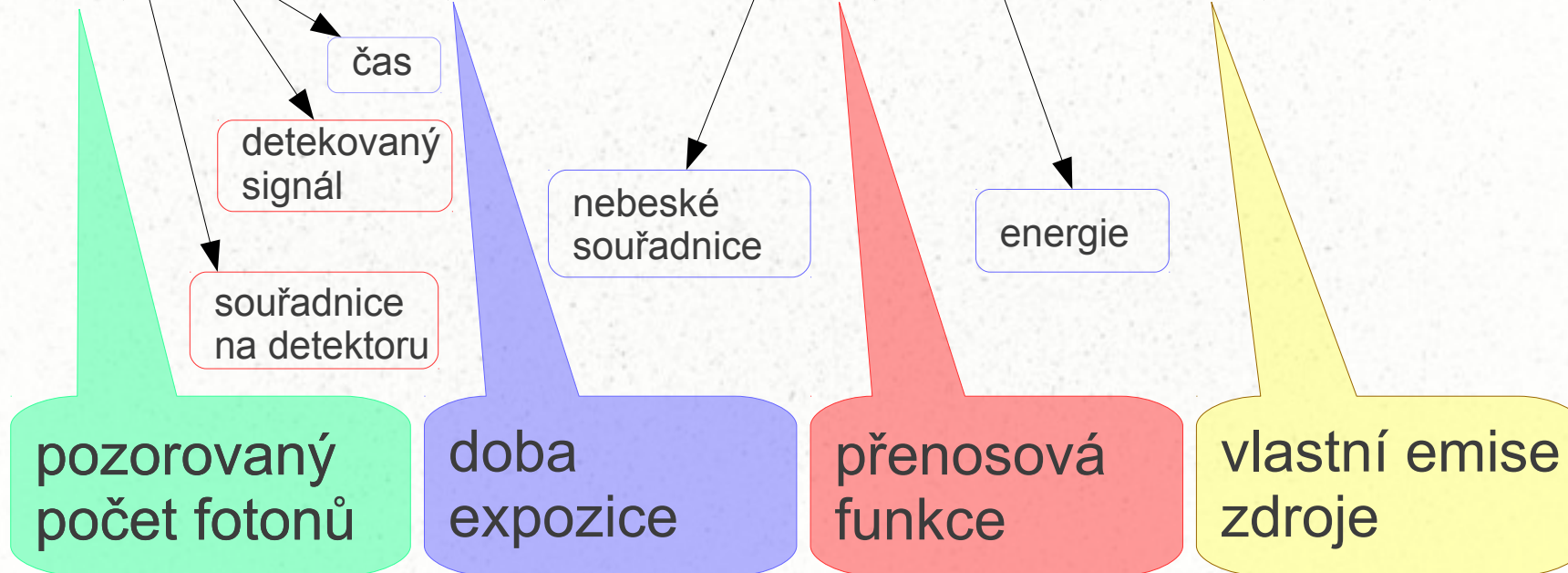
Získání vědeckých produktů z dat

- události (events) obsahují 4D informaci (2D pozice na detektoru, čas, energie)
- vědecké produkty se získají následnou projekcí:
 - zintegrováním času a prostorových informací získáme **spektrum** (v jednotkách počet fotonů na bin)
 - zintegrováním času a energie získáme **obrázek** (v jednotkách počet fotonů na pixel)
 - zintegrováním energie a prostorových informací získáme **světelnou křivku** (v jednotkách počet fotonů na časový bin)
- **kalibrace** je nezbytná k převedení získaných vědeckých produktů na skutečné fyzikální vlastnosti pozorovaných zdrojů

Rentgenová spektrální analýza

- spektrální rovnice:

$$C(d, I, t) = T(d, t) \int dE \int dr R(d, I, E, r, t) \times S(E, r, t)$$

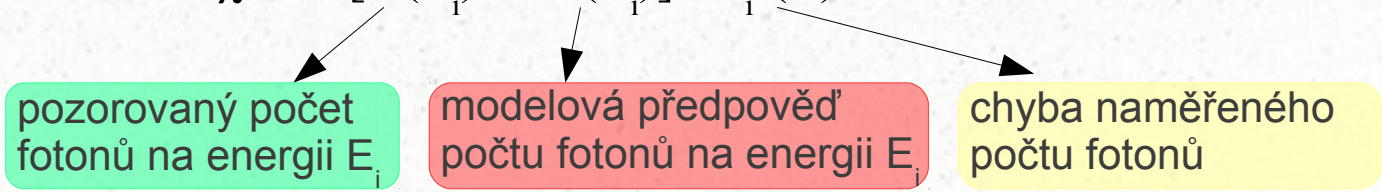
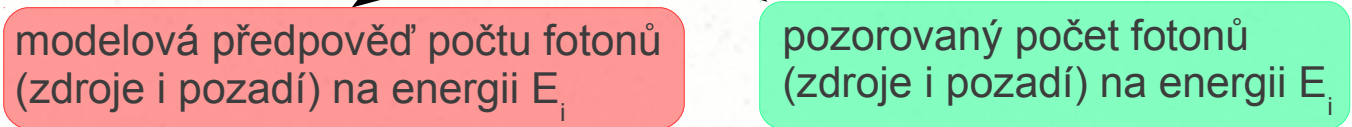


Není-li přenosová funkce diagonální (zpravidla nebývá), není možné rovnici invertovat!!!

Postup při spektrální analýze

- převedení pozorovaného spektra na původní spektrum (před vstupem do detektoru) není jednoznačné
 - proto se používá tzv. "forward-folding approach":
 - 1) *zadefinuji/vyberu si nějaký astrofyzikální model*
 - 2) *spočítám spektrum s daným modelem*
 - 3) *nechám jej projít skrz matici odezvy detektoru (přenosová funkce)*
 - 4) *porovnáám s pozorovaným spektrem*
 - 5) *aplikuji statistické metody k určení kvality fitu*
 - 6) *totéž mohu opakovat s jiným modelem*
 - 7) *na základě statistického testu porovnáám, který model lépe odpovídá pozorovaným datům*

Statistické metody

- při procesu fitování nás zajímá kvalita fitu
 - tj. statistický test, který nám řekne, zda a jak dobře daný model popisuje pozorovaná data
- používají se dvě základní statistické metody:
 - "chí – kvadrát" (Gauss, metoda nejmenších čtverců)
 - $\chi^2 = \sum [C(E_i) - M(E_i)]^2 / \sigma_i^2(E)$ 
 - C statistika (Cash, 1976)
 - $C = 2 \sum [m(E_i) - S(E_i) \times \log(m(E_i)) + \log(S(E_i))]$ 

Kvalita fitu

- redukovaný "chí – kvadrát":

$$- \chi_{\text{red}}^2 = \chi^2 / \textcircled{v}$$

počet stupňů volnosti

= počet binů a volných parametrů modelu

- mohou nastat tři možnosti:

- $\chi_{\text{red}}^2 \approx 1$ vynikající kvalita fitu
- $\chi_{\text{red}}^2 \gg 1$ nízká kvalita fitu
- $\chi_{\text{red}}^2 < 1$?

Kvalita fitu

- redukovaný "chí – kvadrát":

$$- \chi_{\text{red}}^2 = \chi^2 / \textcircled{v}$$

počet stupňů volnosti

= počet binů a volných parametrů modelu

- mohou nastat tři možnosti:

- $\chi_{\text{red}}^2 \approx 1$ vynikající kvalita fitu

- $\chi_{\text{red}}^2 \gg 1$ nízká kvalita fitu

- $\chi_{\text{red}}^2 < 1$ **máme nadhodnocené chyby!**

- u C-statistiky obdobně můžeme porovnat hodnotu "C" s počtem stupňů volnosti

Postup spektrální analýzy schématicky

- jak to probíhá v praxi:

