

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Multispektrální studium aktivních galaktických jader

Pavel Hála

Brno 2011

Děkuji Filipu Hrochovi za vysvětlení matematického pozadí statistických metod užívaných při analýze dat a také za velmi přínosnou kritiku práce.

This research has made use of data obtained from the LAT Data Server, provided by NASA Goddard Space Flight Center.

This research has made use of the Fermi Science Tools for LAT data analysis, created by NASA Goddard Space Flight Center.

This research has made use of the HEASoft software for astrophysical data analysis, created by NASA Goddard Space Flight Center.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Brně dne 1.5.2011

Pavel Hála

Abstrakt:

Tématem práce je studium aktivních galaktických jader v širokém oboru spektra v gamma oblasti. Hlavním cílem práce je využití dat z družice Fermi. Motivací byla technická vyspělost přístrojů nesených touto družicí a revoluční dopad na astrofyziku vysokých energií. Zpracování těchto dat se ukázalo jako netriviální a velká část práce se tedy věnuje popisu použitých postupů zpracování a vyhodnocení těchto dat. Po vytvoření automatických analytických procesů a nalezení optimálních postupů jsem provedl aplikaci na několik zajímavých AGN, především blazarů a vyhodnotil výsledky vědecké analýzy.

Klíčová slova: AGN, Fermi, GLAST, spektrální analýza, gamma

Abstract:

The topic of this thesis is the study of active galactic nuclei in a wide range of spectrum in the gamma region. The main goal is to utilise Fermi observatory data. My motivation is the technical sophistication of instruments carried by Fermi and revolutionary impact on high-energy astrophysics. The processing of these data proved to be non-trivial (mainly due to the unavailability of more detailed instructions) and much work has been focused on a description of the procedure for preparation and evaluation of these data. After I had created automated analytical procedures I applied these to some interesting sources (AGN and blazars) and made conclusion about the results of scientific analysis.

Keywords: AGN, Fermi, GLAST, spectral analysis, gamma rays

Obsah

1	Úvod	6
1.1	Struktura práce	6
1.2	Přehled použitých zkratk a akronymů	7
2	Teoretická část	8
2.1	Družice Fermi	8
2.1.1	LAT	9
2.1.2	GBM	10
2.2	Kalibrace dat a vědecká analýza	12
2.2.1	Popis základních principů	12
2.2.2	Struktura dat	13
2.2.3	IRF	14
2.2.4	Účinnost	15
2.2.5	Citlivost	16
2.2.6	Hyperkrychle a expoziční mapa	17
2.2.7	Modely	19
2.2.8	Likelihood metoda	21
2.2.9	Test Statistics	22
2.3	Průběh vědecké analýzy	24
3	Praktická část	26
3.1	Úvod	26
3.2	Preprocessing, postprocessing a automatizace	27
3.2.1	Popis řešení	27
3.2.2	Struktura skriptu	27
3.2.3	Konstrukce CTS modelů a spekter	29
3.2.4	Postup provedení kompletní analýzy	31
3.2.5	Výsledky analýzy	33
3.3	Výpočetní náročnost	39
3.3.1	Paralelizace	39

3.4	Ověření postupů	41
3.4.1	Srovnání s jinými pracemi	41
3.4.2	Srovnání aperturní a PSF fotometrie	42
4	Výsledky	44
4.1	Volba objektů	44
4.2	3C 454.3	45
4.2.1	Porovnání modelů a výsledné spektrum	46
4.2.2	Časová analýza	51
4.2.3	Neobvyklá zjasnění	54
4.3	Mrk 421	58
4.3.1	Porovnání modelů a výsledné spektrum	58
4.3.2	Časová analýza	62
4.4	QSO J1512-0906	66
4.4.1	Porovnání modelů a výsledné spektrum	66
4.4.2	Časová analýza	70
4.5	OJ 287	73
4.5.1	Porovnání modelů a výsledné spektrum	74
4.5.2	Časová analýza	77
5	Závěr	79
5.1	Diskuze výsledků	79
5.2	Přínos práce	79
5.3	Budoucí možnosti	80
A	Zdrojový kód skriptu	81
	Zdroje	91

Kapitola 1

Úvod

1.1 Struktura práce

Práce je rozdělena na tři hlavní části. Teoretická část (kapitola 2) je tvořena třemi sekcemi. První sekce kapitoly 2 se zaměřuje na popis družice Fermi a přístrojů které nese. Znalost jejich konstrukce je nezbytná pro plné pochopení procesu získávání a především kalibrace vědeckých dat. V následující sekci se věnuji samotné kalibraci. A v poslední sekci teoretické části je zjednodušený průvodce zpracováním dat, resp pouze kalibrací a vědeckou analýzou.

V praktické části se věnuji již samotným postupům které jsem reálně používal ke zpracování dat. Tedy například nalezení postupů jak z výsledků vědecké analýzy popsané v teoretické části získat relevantní výsledky. Tento velmi důležitý fakt totiž není absolutně vůbec popsán v oficiální dokumentaci. Musel jsem tedy nalézt vlastní postupy, které jsem testoval na pulsaru Geminga, quasaru 3C 273 a blazaru Mrk 421. Nalezení těchto postupů si vyžádalo docela hodně času a to především kvůli enormní výpočetní náročnosti. Ověření kdejaké drobnosti si totiž vyžádalo provést jeden iterační cyklus, což v tomto případě znamenalo i více než 24 hodin výpočetního času. Veškeré tyto úkony byly prováděny při velké míře automatizace (manuálně by to bylo časově neuskutečnitelné). To spočívalo v napsání obslužného skriptu, který provádí jak vědeckou analýzu, tak i pozdější agregaci z jejího výstupu, ostatní důležitá zpracování a nakonec vykreslení grafů.

Ve čtvrté kapitole využiji všech předchozích teoretických zákonitostí a aplikuji procedury popsané v praktické části (kapitola 3) na soubor několika zajímavých AGN objektů. Součástí je i vyhodnocení dat.

1.2 Přehled použitých zkratek a akronymů

Zkratka	Původní výraz
CGRO	Compton Gamma Ray Observatory <i>družice vypuštěná r. 1991, předchůdce mise Fermi</i>
Deadtime	Deadtime <i>čas po který detektor po přijetí eventu není schopen zaznamenat další</i>
EBL	Extragalactic background light <i>slabá difuzní záře pozadí způsobená extragalaktickými zdroji</i>
EGRET	Energetic Gamma Ray Experiment Telescope <i>Přístroj nesený CGRO, prakticky předchůdce přístroje LAT</i>
FOV	Field of view <i>úhlová velikost zorného pole (typicky nějakého přístroje)</i>
GBM	GLAST burst monitor <i>jeden z přístrojů nesených družicí Fermi, určený pro detekci GRBů</i>
GRB	Gamma-ray burst <i>extrémě intenzivní záblesky vysokoenergetického elmag. záření</i>
IRF	Instrument response function <i>funkce popisující count v závislosti na odezvě detektoru</i>
LAT	Large area telescope <i>zobrazovací detektor a spektrometr nesený družicí Fermi</i>
MET	Mission elapsed time <i>čas v sekundách v němž jsou zaznamenávány veškeré děje Fermi</i>
PSF	Point spread function <i>funkce pravděpodobnostního rozložení příchozích γ fotonů</i>
ROI	Region of interest <i>oblast v které se nachází PSF zdroje který chceme zkoumat</i>
SAA	South Atlantic anomaly <i>oblast zvýšeného toku nabitých částic v důsledku tvaru v. Allenových pásů</i>
SED	Spectral energy distribution <i>rozložení hustoty energie ve spektru</i>
SR	Source region <i>relativně velká oblast (výseč) okolo (a včetně) ROI</i>
TS	Test statistics <i>výstup likelihood pro zdroje, odmocnina odpovídá detekční významnosti</i>
WIMP	Weakly interacting massive particle <i>slabě interagující částice hmoty</i>

Kapitola 2

Teoretická část

V průběhu celé kapitoly 2 jsem interpretoval poznatky, které jsem pochytal z dokumentace a analytických vláken na webu GSFC [1], dále z prezentace *Spectral analysis of Fermi-LAT data* od Andrea Tramacere a Saas Fee [3] a nakonec z technicky zaměřené práce *THE LARGE AREA TELESCOPE ON THE FERMI GAMMA-RAY SPACE TELESCOPE MISSION* od W. B. Atwood et al [4].

Ve většině kapitoly 2 je však moje interpretace velmi volná a je výsledkem mé vlastní analýzy, která může být v některých případech v rozporu s určitými fakty v citovaných pracích. Důvodem je samotná komplikovanost zkoumaného problému, rozpory mezi jednotlivými pracemi navzájem a případně některá fakta, která jsem ve zkoumaných pracích odhalil jako chybná.

2.1 Družice Fermi

Jedná se o novou družici, vypuštěna byla v červnu roku 2008 americkou NASA ve spolupráci s dalšími světovými agenturami. Minimální trvání mise je pět let, cílem je ale deset let operativního nasazení. Zajímavostí je, že původně se družice jmenovala GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope), později někoho napadlo přejmenovat ji na Fermi, resp FGST (Fermi Gamma-ray Space Telescope). Družice nese dva přístroje. LAT a GBM, které budou popsány níže.

Jak už z názvu plyne, Fermi se zaměřuje na nejenergetičtější část elektromagnetického spektra. Nad horní hranicí jejího spektrálního rozsahu (300 GeV) již není žádná družice nebo teleskop schopná pozorování, pouze až TeV pozemní Čerenkovské detektory. Mise Fermi má několik cílů, mezi ty hlavní patří především:

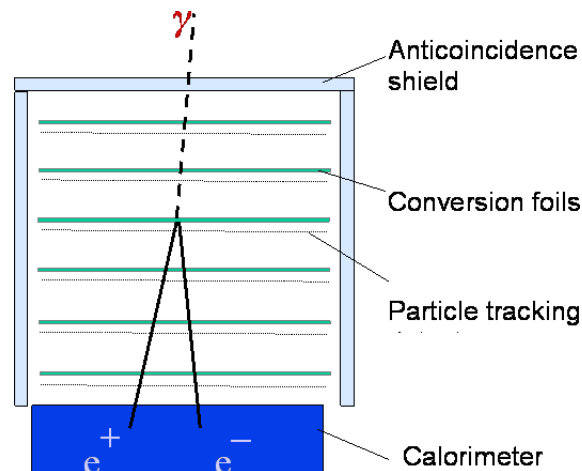
- **Studium blazarů a AGN**, zvláště pak variabilita (díky úžasné citlivosti LAT) a také snaha dozvědět se více o složení jetů
- **Pozorování GRBů**, detekce pomocí GBM a následné pozorování dosvitu

pomocí LAT

- **Temná hmota**, snaha o nepřímou detekci prostřednictvím anihilace WIMP částic
- **EBL**, studium extragalaktického pozadí které se projevuje absorbcí v GeV části spektra (cutoff)

2.1.1 LAT

Hlavním přístrojem družice Fermi je LAT (Large area telescope), který by se dal popsat jako zobrazovací gamma detektor, resp spektrometr s velmi velkým zorným polem. Slouží především k pozorování bodových a difuzních objektů, ale vzhledem k velmi nízké hodnotě deadtime se s ním dají pozorovat i GRBy, resp dosvity GRBů. Jeho spektrální rozsah je teoreticky 18 MeV – 562 GeV, prakticky ale 100 MeV – 300 GeV. Tento detektor je nástupcem přístroje EGRET na družici CGRO. Konstrukci jednoho modulu (tracker) přístroje LAT (obsahuje celkem 16 takových modulů) lze pochopit z následujícího obrázku:



Obrázek: Konstrukce trackeru z LAT [1].

Na vrchu a bocích je anti-koincidenční detektor (scintilační dlaždice) který má za cíl detekovat nabitě částice kosmického záření, které o několik řádů převyšují počet gamma fotonů, a vyloučit jejich detekční signál. Samotný detektor se skládá z několika vrstev. Každá vrstva je tvořena konverzní, wolframem potaženou, fólií pod kterou je detekční fólie se silikonovými proužky. Takových vrstev je v modulu celkem 18, přičemž nejsou všechny stejné. U horních 12 vrstev je wolframová

vrstva tenčí (0.010 cm) což je vhodné pro konverzi fotonů s nižší energií. Další 4 vrstvy obsahují mnohem tlustší wolframovou fólii (0.072 cm) pro konverzi fotonů s nejvyšší energií. A poslední 2 vrstvy vůbec neobsahují konverzní fólii. Uplně dole se nachází kalorimetr který je schopen změřit energii pohlcených párů v celém energetickém rozsahu LAT. Tato komplexnost modulu, resp celého LAT se promítá také do komplexnosti vědecké analýzy, resp rekonstrukce inklinace a energie fotonu na základě několika druhů PSF.

Když vysokoenergetický foton dopadne na konverzní fólii, vyrazí elektron-pozitronový pár. Směr následné spršky částic je detekován právě sérií detekčních fólií.

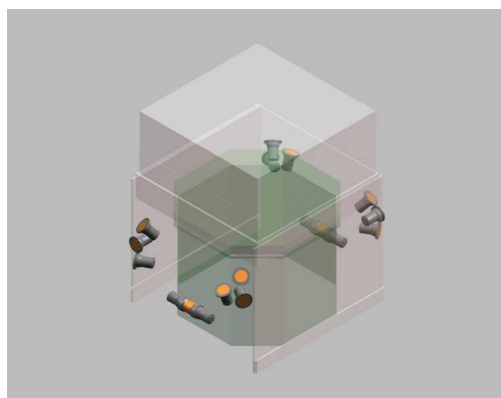
Samotné parametry LAT uvádím v přehledné tabulce:

Parametr	Hodnota
Spektrální rozsah	100 MeV – 300 GeV
Energiové rozlišení	10%
Efektivní plocha detektoru	9500 cm ²
FOV	2.4 sr
Úhlové rozlišení	3.5°(100 MeV), 0.15°(10 GeV)
Citlivost	6×10^{-9} ph cm ⁻² s ⁻¹
Deadtime	26.5 μs
Pozadí (po analýze)	10%

Tabulka 2.1: Parametry LAT

2.1.2 GBM

Přístroj GBM je tvořen 14 scintilačními detektory, které jsou rovnoměrně rozmístěny na těle družice tak aby doplňovaly, resp rozšířily FOV přístroje LAT. Dvanáct detektorů jsou sodíko-iodidové krystaly pro měření v energiích od deseti keV do 1 MeV a dva bismut-germaniové krystaly pro energie 150 keV – 25 MeV. Je tedy vidět že GBM doplňuje nejenom zorné pole LAT, ale navazuje i na jeho spektrální rozsah. Bohužel tento rozsah nelze využít pro pozorování klasických bodových a difuzních objektů a to kvůli velmi špatnému úhlovému rozlišení GBM (pokud se dá o nějakém rozlišení vůbec hovořit). Slouží tedy pouze k pozorování přechodných jevů jako jsou právě GRBy.



Obrázek: Rozmístění detektorů GBM na těle družice [1].

Fermi díky velkému zornému poli LAT je naprostou většinu svého času v tzv. survey módu, tedy není pointován na žádný konkrétní objekt nebo směr. Pokud dojde k nějaké události (GRB), první ji zaznamenají a změří detektory GBM. Zároveň se vyše signál k automatickému přerušení stávajícího pozorování a celá družice se natočí tak aby se GRB dostal do zorného pole LAT, který tak může velmi přesně a hlavně rychle změřit dosvit GRBu. Paralelně s tím se vyše signál do sítě GCN (Gamma-ray Burst Coordination Network), aby stihly pozorovat dosvit také jiné družice a pozemské optické teleskopy. Parametry GBM jsou shrnuty v tabulce:

Parametr	Hodnota
Spektrální rozsah	10 keV – 25 MeV
Energiové rozlišení	10%
FOV (spolu s LAT)	8 sr
Úhlové rozlišení	15°
Deadtime	10 μ s

Tabulka 2.2: Parametry GBM

2.2 Kalibrace dat a vědecká analýza

2.2.1 Popis základních principů

Kalibrace a vlastně i samotný princip detekce je u LAT daleko složitější než je obvyklé např u optických detektorů. Hlavními důvody jsou:

- **Nepřímá detekce** – oproti např optickým detektorům, kde okamžitě po pozorování máme k dispozici county (počet detekovaných událostí), u detektorů v gamma oboru získáme pouze sérii dat charakterizující odezvu přístroje. Samotné county se získávají až následnou rekonstrukcí z těchto dat což je velmi složitý proces. Využívá se k tomu různých druhů IRF (Instrument response function) popisujících odezvu detektoru a především následně likelihood analýzy (analýzy metodou nejvyšší věrohodnosti). Výsledné county jsou tedy popsány určitým pravděpodobnostním rozložením, které z principu skrývá určitou nejistotu.
- **Silné pozadí** – všeobecný problém v gamma astronomii kvůli nízké frekvenci astrofyzikálních countů (u LAT cca 2 Hz). Poměr S/N (signálu a šumu) je velmi špatný. Při samotné detekci je tento poměr řádově 10^6 . Většina těchto countů jsou nabitě částice, jejichž signál je vyloučen pomocí antikoincidenčních detektorů. Samotná data musí být předzpracována už na samotné družici a to kvůli omezené kapacitě datového toku kterým jsou posílána data k Zemi (konkrétně jeden Mbps pro Fermi). Při tomto zpracování jde tedy o to vyloučit co nejvíce nepotřebných countů a přitom zachovat maximální množství astrofyzikálních countů. Data která jsou downlinkována na zem mají poměr S/N okolo 300:1. Na Zemi proběhne další kolo zpracování LAT týmem. Jsou vyloučeny gamma fotony od zemského albeda a jednotlivé astrofyzikální county jsou roztřízeny do jednotlivých tříd v závislosti na IRF, resp velikosti PSF. Z poměrů S/N lze nabýt dojmu že nemůžeme dostat příliš spolehlivé a hlavně přesné výsledky. Opak je pravdou. Účinnost LAT (po několika stupních kalibrace a likelihood analýzy) je nad 75%. To je číslo, které bylo před příchodem LAT v gamma astronomii naprosto nepředstavitelné.
- **Spektrální rozsah** – velká výhoda LAT, na druhé straně příspěvek k ne úplně jednoduché kalibraci. Spektrální rozšaha LAT je obrovský. Teoreticky od 10^7 eV do 10^{11} eV - tj přes čtyři řády. Problém je ovšem v tom, že foton o energii 100 MeV se při dopadu na konverzní vrstvu chová jinak než foton o energii deset nebo 100 GeV, resp reaguje na daný materiál jinak. To vyžaduje příslušnou konstrukci detektoru a je to taktéž důvodem nesourodosti detekčních vrstev v každém modulu LAT. Prvních dvanáct vrstev s menší tloušťkou wolframu je určeno ke konverzi nízkoenergetických fotonů, zatímco čtyři silnější vrstvy mají větší účinnou plochu pro vysokoenergetické fotony. I

přesto, především pro nízkoenergetické fotony, dochází k několikanásobnému rozptylu následné spršky částic. Proto PSF pro fotony o energii 100 MeV má pro 1σ velikost 3.5° , zatímco pro 10 GeV fotony pouze 0.15° .

- **Vícerozměrná data** – tento bod částečně vyplývá ze všech bodů zmíněných výše. V optické astronomii je zvykem že každý count je většinou popsán pouze souřadnicemi a příslušnou energií. V gamma astronomii, resp u LAT je tomu jinak. Odezva (pravděpodobný count) je v počátku popsán okolo 200 parametry. Většina z nich však není potřeba a v průběhu analýzy dojde ke značné redukci. Vysvětlil bych to např na inklinaci příchozího fotonu. Skutečná energie fotonu totiž velmi silně závisí nejenom na detekované energii spršky částic (jak jsem popsal v bodě o spektrálním rozsahu), ale také na inklinaci příchozího fotonu. Jak už jsem psal, dochází v každém modulu LAT k vícenásobnému rozptylu. Skutečnou inklinaci ve skutečnosti neznáme! Máme pouze sadu parametrů popisující odezvu detektoru – konkrétně trajektorii spršky částic (způsobené konverzí fotonu) v kalorimetru, tvar centroidu v kalorimetru vytvořeném sprškou částic, x a y souřadnice průchodu spršky každou vrstvou (resp silikonovými detektory) a konečně tvar centroidu na každé této vrstvě. Pravděpodobnou inklinaci spočítáme až zpětně ze všech těchto parametrů. Popsaná analýza je provedena již částečně samotnou družicí a především LAT týmem. Ale ani poté nedojde k úplné redukci dimenze. Vícerozměrnost se zachová. County jsou totiž rozděleny to jednotlivých tříd podle druhu IRF. Dalším rozměrem který je nutné vzít v potaz (kromě inklinace a energie) je také čas. Odezva LAT závisí také na čase detekce daného countu. Co je velmi důležité je také proces zpracování likelihood analýzou při zjišťování spektra. Ta totiž nutně musí pracovat s trojrozměrnými daty – tedy jak energií, tak souřadnicemi. Důvodem je značná velikost PSF při nižších energiích. PSF zkoumaného zdroje je totiž velmi pravděpodobně ovlivněna PSF okolních zdrojů a ty jsou zase ovlivněny ještě vzdálenějšími zdroji atd. Nelze tedy pracovat s jednorozměrnými daty kde je count popsán pouze energií [1].

2.2.2 Struktura dat

Pro jakoukoliv anlyzu je potřeba z LAT serveru získat dva druhy dat. Jednak tzv fotonová data s příponou PH (ta bývají rozdělena na několik souborů) a potom tzv spacecraft data s příponou SC. Fotonová data obsahují informace o jednotlivých countech, zatímco spacecraft data obsahují přesné informace o poloze a natočení družice v závislosti na čase. To je totiž při kalibraci dat velmi důležité jak se ukáže později. Při získávání dat, resp předávání parametrů LAT serveru, dochází k první selekci dat. Můžeme si totiž kromě pointovacích souřadnic zvolit úhlový

radius oblasti které nás zajímá a také časový interval. Pro objekty blízko galaktické roviny se doporučuje radius $15^\circ - 20^\circ$, zatímco pro objekty vzdálené od galaktické roviny pouze 10° . Tyto odhady se ale různí a je tedy lepší použít vždy alespoň 15° radius. Důvodem pro použití tak rozsáhlé oblasti je značná velikost PSF při nižších energiích jak bylo popisováno v sekci Popis základních principů.

Čas je u všech countů i spacecraft dat zaznamenán v tzv MET formátu (Mission elapsed time). To je čas v sekundách, kde nulová hodnota je 1.1. 2001 v 0:00 UTC. Převod na MJD (modifikované juliánské datum) je triviální.

2.2.3 IRF

Neboli Instrument response function. Jedná se o soubor funkcí popisujících count v závislosti na odezvě detektoru. Roli hraje spousta parametrů které jsem popisoval výše, např energie, inklinace, tvar PSF, resp typ konverze apod. Z hlediska IRF je důležité zavedení čtyř tzv event classes:

Event class	Označení
1	TRANSIENT
2	SOURCE
3	DIFFUSE
4	DATA CLEAN

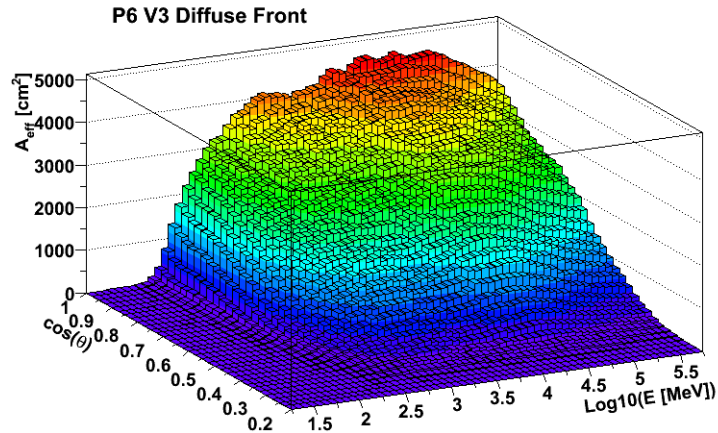
Tabulka 2.3: Event classes

Každá z těchto event class označuje určitý typ fotonů. Event class 1 je vhodná pro analýzu přechodných jevů jako jsou GRBy. Obsahuje velmi silné pozadí a není vhodné na analýzu jednotlivých objektů. Event class 2 je mezistupněm mezi DIFFUSE a TRANSIENT a také není příliš vhodná pro analýzu bodových objektů. Event class 3 již obsahuje pouze slabé pozadí, je tedy velmi selektivní co se týče toho které fotony vybere a je nejvhodnější pro analýzu bodových zdrojů. Event class 4 je již příliš selektivní a je určena pro analýzu difuzního pozadí ať už galaktického nebo extragalaktického. Struktura jednotlivých event classes je hierarchická, tzn že např event class 2 v sobě obsahuje také všechny fotony z event class 3 a 4.

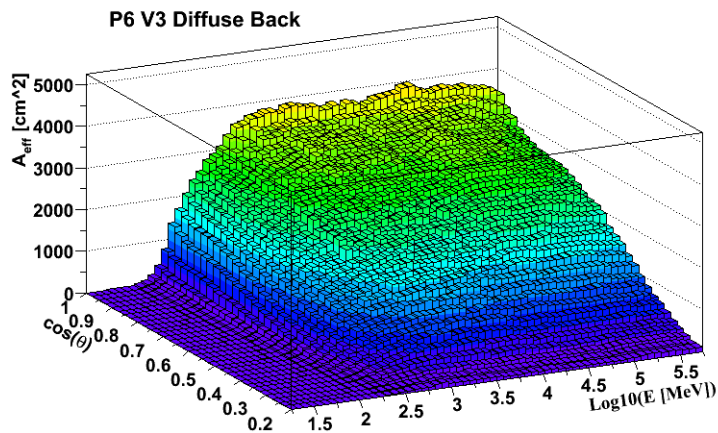
Pro každou event class existují příslušné IRF. Čili např IRF pro event class 3 (kterou používám u analýzy bodových objektů) se nazývá P6_V3_DIFFUSE kde P6_V3 označuje nyní používanou sadu IRF (Pass 6). Můžeme také použít IRF pro fotony u kterých došlo ke konverzi na elektron-pozitronový pár v přední části trackeru kde jsou tenčí W vrstvy (P6_V3_DIFFUSE::FRONT) nebo IRF pro konverzi na zadní části trackeru (P6_V3_DIFFUSE::BACK).

2.2.4 Účinnost

Efektivita LAT silně závisí (kromě jiných) především na dvou parametrech. Těmi jsou energie příchozího fotonu a jeho inklinace. V IRF se účinná plocha počítá zvlášť pro přední a zadní část každého trackeru v LAT. Níže jsou vloženy grafy účinnosti, resp. efektivní plochy v závislosti na kosinu inklinace θ a logaritmu energie E .



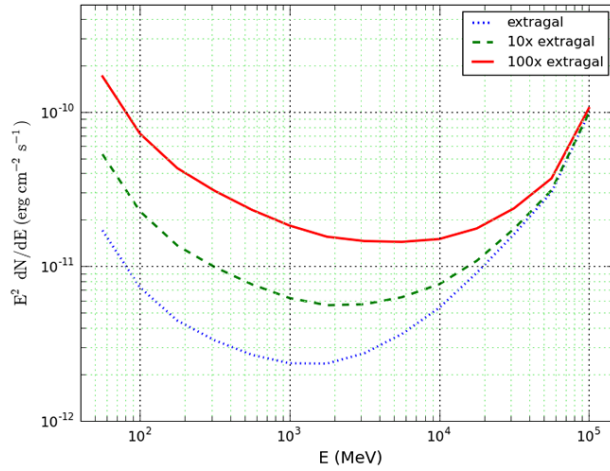
Obrázek: Účinnost pro přední část trackeru [1].



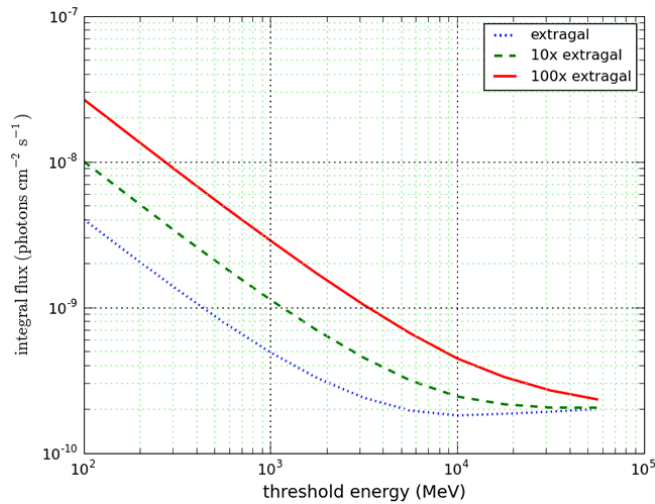
Obrázek: Účinnost pro zadní část trackeru [1].

2.2.5 Citlivost

Velmi důležitá je znalost citlivosti LAT, zvláště při studiu velmi slabých bodových objektů. Příkladám graf rozložení hustoty energie ve spektru pro bodové zdroje o detekčním významu 5σ , která odpovídá TS (Test statistics) hodnotě 25 (bude vysvětleno později). V praxi užitečnější je ale druhý graf integrální citlivosti ve fotonech, která je úměrná countům. V obou grafech jsou vyneseny i křivky pro vyšší hodnoty difusního extragalaktického pozadí.



Obrázek: Citlivost vyjádřená jako graf SED [4].

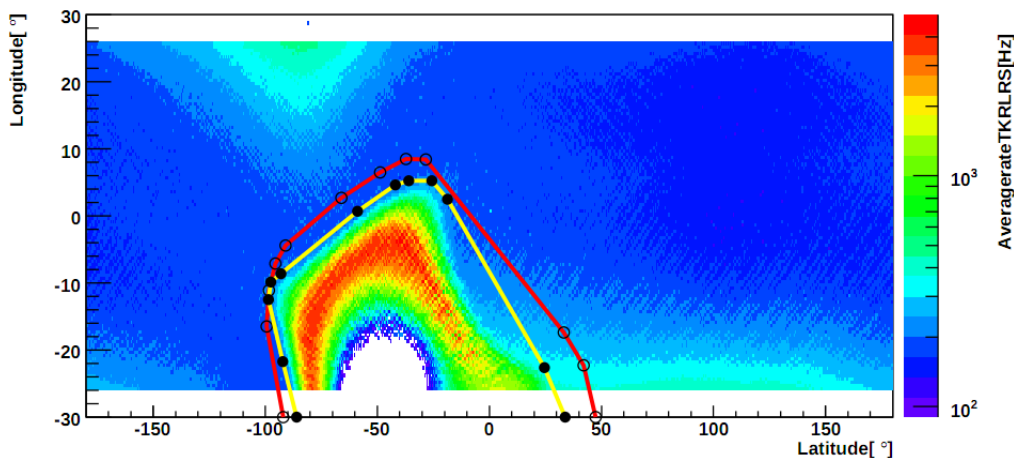


Obrázek: Citlivost ve fotonech [4].

2.2.6 Hyperkrychle a expoziční mapa

Livetime cube (někdy označovaná jako hyperkrychle) je čtyřrozměrný soubor dat který obsahuje orientaci, resp pozici družice (tři souřadnice) v závislosti na čase (čtvrtá souřadnice). Jak jsem totiž napsal dříve, IRF LAT závisí kromě jiných také na inklinaci příchozího fotonu. A ta se velmi rychle mění v čase (Fermi oběhne Zemi za cca 95 minut). Proto k získání počtu countů určitého zdroje musíme vědět jaký čas strávil daný zdroj na té které inklinaci. A to je právě informace obsažená v livetime cube.

Dalším důvodem existence livetime cube je fakt že účinnost LAT závisí také na tom v jakém místě nad Zemí a v jaké orientaci se Fermi nachází. Velký vliv hraje především tzv SAA (South Atlantic anomaly) neboli jihoatlantická magnetická anomálie. V těchto místech je velmi vysoká frekvence countů od nabitých částic a to natolik, že LAT musí být při přeletu nad SAA mimo provoz. Tento výpadek znamená celkovou ztrátu asi 15% pozorovacího času. SAA je způsobena geometrií van Allenových pásů, resp jejich přílišnou blízkost Zemskému povrchu v oblasti SAA, což má za následek onen vysoký tok částic. Přibližnou představu získáte z následující mapy (SAA je jasně viditelný útvar v dolní části).

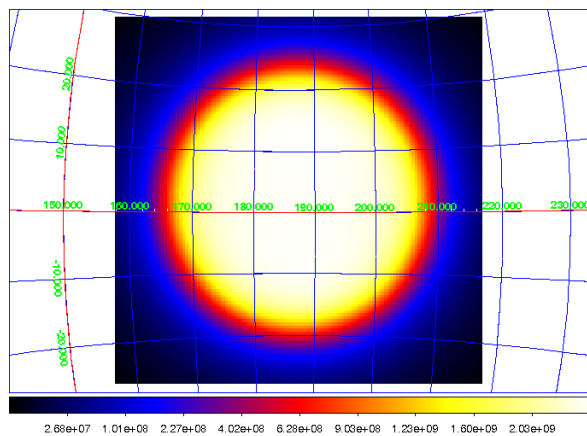


Obrázek: Frekvence nežádoucích countů způsobených nabitými částicemi v závislosti za zeměpisné délce a šířce [4].

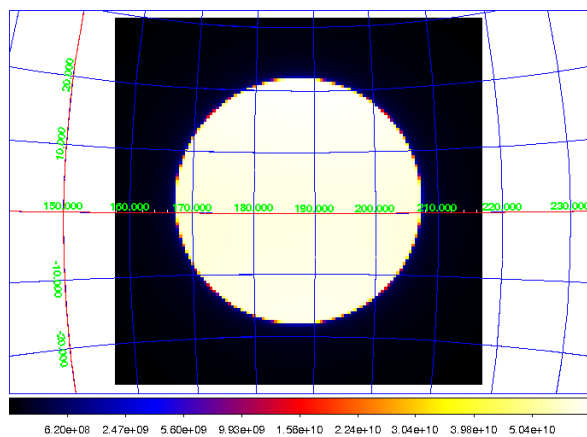
Nyní k expoziční mapě. K její konstrukci je mimojiné potřeba hyperkrychle popsaná výše. Expoziční mapa je totiž zjednodušeně řečeno integrál celkové expozice za čas pro určitou polohu. Expoziční mapa závisí také na energii, resp vždy

vytvoříme příslušný počet (dle libovůle) expozičních map pro konkrétní intervaly energií. County od určitého zdroje tedy v likelihood analýze získáváme jako integrál toku a expoziční mapy.

Pro názornost přikládám ukázkou mnou vytvořených expozičních map pro výseč oblohy o poloměru 20° . Přidal jsem i vrstvu souřadnicové sítě v ekvatoriálních souřadnicích (J2000) ve stupních. Původní mapa byla pro dvacet logaritmických energiových intervalů od 100 MeV do 300 GeV. Já přikládám pouze dvě mapy – pro ten nejnižší a nejvyšší interval. Počet těchto intervalů, jakož i úhlové rozlišení závisí zcela na libovůli, ale není dobré to přehánět protože to potom přináší neúnosné výpočetní nároky.



Obrázek: Část expoziční mapy pro interval 100 – 150 MeV.



Obrázek: Část expoziční mapy pro interval 200 – 300 GeV.

2.2.7 Modely

Samotná finální vědecká analýza, resp rekonstrukce eventů od určitého zdroje se provádí pomocí likelihood analýzy. Její princip bude popsán v podkapitole 2.2.8. Důležité ale je, že tato analýza funguje na bázi statistických metod a k jejímu provedení musíme definovat modely jak pro bodové, tak difusní zdroje které se nachází ve zkoumaném SR (source region). Např pokud nás zajímá nějaký bodový zdroj, musíme vytvořit model pro tento zdroj, pro všechny ostatní bodové zdroje v SR (může jich být i několik desítek) a potom také pro difusní zdroje – zpravidla galaktické a extragalaktické pozadí.

Celý tento model pro zkoumaný SR má formu XML souboru. V něm každý blok odpovídá jednomu zdroji. Tag kterým je každý tento blok kódu ohraničen má 2 parametry – jméno (které může být jakékoliv) a typ zdroje. Rozlišujeme dva typy zdrojů – bodové (PointSource) a difusní (DiffuseSource). Blok kódu příslušející každému zdroji se skládá ze dvou podbloků – `spectrum` a `spatialModel`.

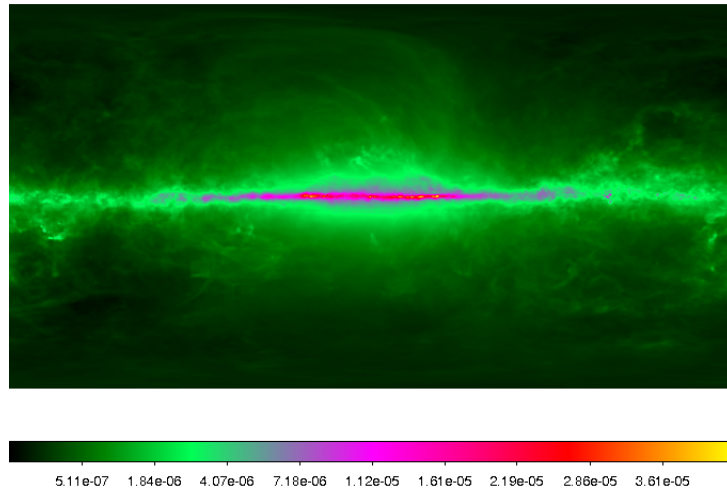
V entitě `spectrum` nejprve určíme typ spektrálního modelu který chceme použít (např PowerLaw) a potom nadefinujeme jednotlivé parametry spektrálního modelu. U PowerLaw jsou tyto parametry Prefactor, Index a Scale. U jiných typech spektrálních modelů je těchto parametrů zpravidla víc, nebo mohou být i úplně jiné. U každého parametru lze nastavit počáteční hodnotu, měřítko a především zda bude parametr volný (tedy bude se fitovat) nebo bude zafixován na určité hodnotě.

Druhá část bloku kódu je `spatialModel`. Ten u bodových zdrojů obsahuje prostorové parametry PSF daného zdroje – tedy rektascenzi a deklinaci. Důležité je že tyto parametry musí být fixované protože SciTools neumožňují současné fitování polohy protože by to kladlo nerealistické výpočetní nároky.

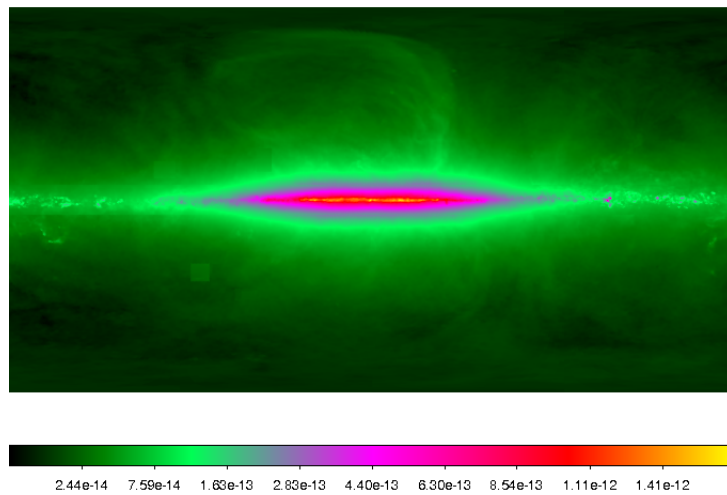
$$\text{PSF} = N_0 e^{-\frac{(\alpha-\alpha_0)^2 - (\delta-\delta_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.1)$$

Nyní uvedu pár příkladů modelů jak pro difusní zdroje tak pro bodové zdroje:

Galaktické pozadí (difusní zdroj) – fitování galaktického pozadí se realizuje jako normalizace hodnot healpix mapy vytvořené podle GALPROP modelu [5]. Výsledek fitu tedy závisí také na expozici. Příkládám dva snímky které jsem extrahoval z této healpix mapy (celkem obsahuje 30 snímků):



Obrázek: Healpix mapa podle GALPROP modelu pro nízké energie [1].



Obrázek: Healpix mapa podle GALPROP modelu pro vysoké energie [1].

- **Extragalaktické pozadí (difusní zdroj)** – model má tvar izotropního pozadí distribuovaného jako jednoduché power law (mocninná funkce). Fit provádí pouze normalizaci.

- **Jednoduché power law (bodový zdroj)**

$$\frac{dN}{dE} = N_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^\gamma \quad (2.2)$$

N_0 – prefaktor
 γ – spektrální index
 E_0 – měřítko

- **Power law s exponenciálním cut-off (bodový zdroj)**

$$\frac{dN}{dE} = N_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^\gamma \quad (2.3)$$

pro $E < E_b$

$$\frac{dN}{dE} = N_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^\gamma e^{-[(E-E_b)/p_1 + p_2 \log(E/E_b) + p_3 \log^2(E/E_b)]} \quad (2.4)$$

pro zbytek def. oboru

N_0 – prefaktor
 γ – spektrální index
 E_0 – měřítko
 p_1 – bod nástupu exp. cut-off

- Další modely jsou definované na stránkách Goddard space flight center [1].

2.2.8 Likelihood metoda

Neboli analýza metodou nejvyšší věrohodnosti. Jsme nuceni ji použít z důvodu nepřímé povahy měření. Vlastně nemáme samotné county, ale musíme je zpětně zrekonstruovat použitím statistických metod. Likelihood analýza provádí maximalizaci L (likelihood). Hledá největší pravděpodobnost, resp věrohodnost daného předpisu.

V likelihood analýze se zhusta využívají modely. Např děláme analýzu nějakého bodového zdroje (třeba blazaru), ten se nachází v našem ROI (region of interest). Musíme použít velký výřez oblohy – velký SR (source region) a to kvůli velikým PSF bodových objektů. Abychom mohli provést likelihood analýzu musíme sestavit model nejenom pro objekt který nás zajímá, ale také pro všechny ostatní modely v našem SR, pro galaktické pozadí a nakonec extragalaktické pozadí.

Nyní přejdu k funkčnímu vyjádření likelihood metody.

$$L = \prod_i p_i \quad (2.5)$$

L značí samotnou hodnotu likelihood (věrohodnosti), p_i jsou poissonovy funkce popisující event. Pro data zbinovaná v energiích i deklinacích platí:

$$L = \prod_i \frac{\theta_i^{n_i} e^{-\theta_i}}{n_i!} \quad (2.6)$$

kde θ_i je očekávaný počet countů podle modelu a n_i odpovídá počtu fyzicky detekovaných countů v binu. Po zlogaritmování můžeme závislost přepsat jako:

$$\log L = \sum_i n_i \log \theta_i - N_{\text{pred}} \quad (2.7)$$

kde N_{pred} je vlastně $(\theta_i - \log n_i!)$. Připomínám že všechny proměnné závisí i na expoziční mapě a všech ostatních podřízených závislostech.

Jak už jsem ale psal kvůli nutnosti zachování vícerozměrnosti dat při likelihood analýze (v důsledku velkých PSF) nelze data zbinovat v energiích do jednorozměrného souboru vektorů, protože tím se ztrácí informace o prostorových souřadnicích každého countu. Je tedy nutné použít nezbinovaná data. V tomto případě je n_i rovno 1 a funkční závislost můžeme přepsat:

$$\log L = \sum_i \log \theta_i - N_{\text{pred}} \quad (2.8)$$

Je třeba upozornit že každý z obou členů v této funkční závislosti závisí na spoustě dalších parametrů. Samotný model se skládá ze spousty složek (bodových i difusních objektů) a ty jsou reprezentovány jednotlivými IRF které závisí opět na dalších parametrech (energie, inklinace, čas ...) jak bylo popisováno v předchozích podkapitolách. Nebylo by příliš efektivní zde tyto závislosti popisovat. Všechny jsou zmíněny ve zdrojích uvedených na začátku kapitoly.

2.2.9 Test Statistics

Nejvhodnějším českým ekvivalentem by byla zřejmě statistická relevance. TS je hodnota která se vždy počítá pro jednotlivé prvky modelu – tedy např bodové objekty, ale také i difusní objekty. Vyjádření TS je následující:

$$\text{TS} = -2 \log \frac{L_{\text{max},0}}{L_{\text{max},1}} \quad (2.9)$$

kde $L_{\text{max},0}$ je nejvyšší hodnota likelihood pro model bez zdroje (kterému tato TS hodnota přísluší) a $L_{\text{max},1}$ nejvyšší hodnota likelihood pro model se zdrojem na

daných souřadnicích. Z tohoto vyjádření plyne jedna věc. Čím vyšší je hodnota $L_{\max,1}$, tedy čím vyšší je pravděpodobnost že se zde zdroj opravdu nachází, tím vyšší je hodnota TS. Navíc $L_{\max,1}$ závisí na počtu countů, tedy např i na expoziční době. Z toho plyne že čím větší expozici zvolíme tím bude TS vyšší, takže často při rozhodování o významnosti konkrétního zdroje musíme o TS uvažovat jako o relativní hodnotě. V tomto smyslu je užitečné vědět, že detekční významnost zdroje odpovídá právě odmocnině z TS, tedy:

$$\sigma = \sqrt{TS} \tag{2.10}$$

2.3 Průběh vědecké analýzy

V této podkapitole zkráceně nastíním jak probíhá vědecká analýza s využitím SciTools, což je proprietární software vyvinutý GSFC pro zpracování dat z Fermiho [1]. Podotýkám že tohle je pouze část z celkového zpracování dat – zbytek je popsán v praktické části. Tento postup je také podrobněji zdokumentován na stránkách GSFC [1].

1. Stažení PH a SC dat z LAT serveru, stažení modelů pro pozadí.
2. Spuštění procedury `gtselect` která provede prvotní selekci dat. Nejdůležitějším parametrem je volba event class countů které chceme použít. Kromě toho ale můžeme udělat spustu dalších výřezů - např v energii i čase, resp expozice. Nesmíme také zapomenout zvolit správnou hodnotu zenitového úhlu tak abysme do výstupního souboru nezahrnuli fotony ze zemského albeda.
3. Provedení procedury `gtmktime` která jednak data z intervalů kdy se námi specifikovaná oblast dostala pod zenitový úhel specifikovaný v předchozí proceduře a dále provede celkovou časovou selekci dat. Vybere tzv good time intervaly. Tzn vyhodí data kdy družice prováděla nějaké operace které by mohly ovlivnit kvalitu dat.
4. Nyní je možné vytvořit count mapu, pokud o to máme zájem. Provedeme to procedurou `gtbin` s příslušnými parametry.
5. Vytvoření hyperkrychle procedurou `gtltcube`. Volíme úhlové kroky a také velikost pixelu. Není dobré to přehnat protože jinak to výrazně zvyšuje výpočetní nároky.
6. Tvorba expoziční mapy procedurou `gtexpmap`. Specifikujeme jaký soubor IRF chceme použít a další parametry týkající se volby počtu intervalů v prostoru a energii. Stejně jako u `gtltcube` není dobré to přehnat.
7. Vytvoření XML modelu. K tomu musíme znát souřadnice všech zdrojů na snímku a vypsát spousty parametrů. Což může být docela zdlouhavé. Dá se na to ale vyzrát jak bude popsáno v praktické části.
8. Spuštění likelihood analýzy procedurou `gtlike`. Zde se vyplatí dát velký pozor při volbě parametrů. Musíme zvolit nebinovou analýzu a také využít správnou numerickou metodu. Prakticky je nejlepší použití NEWMINUIT která dává velmi přesné výsledky, ale na druhé straně její provedení trvá velmi dlouho. Zato např DRMNFB konverguje velmi rychle, ale není tak přesná. Samozřejmě je možné (a taky rozumné) provést více iteračních cyklů,

takže můžeme jednotlivé metody kombinovat. Výsledkem `gtlike` je několik souborů které stojí za zmínku.

Jednak FITS file `counts_spectra` což je tabulka obsahující definici intervalů použitých energiových binů (zbinují se až výsledná data, samotná analýza je nebinová) a především celkové množství normalizovaných countů v jednotlivých binech a počty namodelovaných countů pro zdroje definované v XML modelu.

Dále je výstupem výsledný XML model s nafitovanými parametry a v případě (NEW)MINUIT metody i s vyčíslenými chybami.

A poslední důležitý soubor je obyčejná tabulka (defaultně `result.dat`) kde jsou jak výsledky fitu parametrů z modelu, ale také integrální fotonové toky jednotlivých zdrojů. Nejdůležitější jsou ale hodnoty TS které jsou zde uvedené. Bohužel z neznámých důvodů se sem neukládá hodnota log likelihood celého modelu. Tu najdeme pouze ve standardním výstupu, takže se vyplatí jej někde přeměřovat. Po provedení `gtlike` by se (pokud to povolíme příslušným parametrem) měl zobrazit graf namodelovaných countů. Bohužel v mém případě se tak nestalo kvůli absenci určité knihovny, která přestože byla očividně součástí SciTools, neměla vliv na chybovou hlášku. Obrovským problémem je že na webu GSFC ani nikde jinde nejsou vůbec popsány výsledné soubory, tj co obsahují nebo jak z nich zrekonstruovat okalibrovaná spektra. Na spoustu věcí jsem tedy musel pracně přijít sám jak bude popsáno v praktické části.

9. Jakmile máme výsledný model, tak můžeme vytvořit TS mapu. Je to volitelná záležitost a běžně o to kvůli výpočetní náročnosti rozhodně nebudeme mít zájem. Na druhé straně je to nejzajímavější věc která se dá s daty z LAT udělat. Můžeme takto najít dosud neobjevené bodové zdroje a nebo zkoumat slabé difusní zdroje. Tímto způsobem bylo zidentifikováno mnoho quasarů a blazarů se svými optickými protějšky, byly objeveny zcela nové pulsary, blazary a quasary. Nebo například nedávno objevené bubliny gamma záření nad a pod diskem naší galaxie [9] byly získány primárně použitím této procedury. Jméno procedury je `gttmap` a funguje tak že na základě námi nadefinované sítě prochází jednotlivé body na této síti a modeluje zde bodový zdroj s maximální TS hodnotou. Zdroje definované ve vstupním modelu (výstupním z `gtlike`) odečte. Je možné použít `gttmap` i bez vstupního modelu, ale není to příliš moudré protože u TS mapy nám jde o slabé nebo difusní zdroje a proto je vhodné silné bodové nebo difusní zdroje (rovina galaxie) odečíst.

Kapitola 3

Praktická část

3.1 Úvod

Samotná vědecká analýza kterou jsem popsal v poslední podkapitole teoretické části je pouze malou částí celkového zpracování dat. Některé věci musí být připraveny dopředu – např výběr bodových objektů, zjištění jejich souřadnic a vytvoření modelu. Především je ale nutné spoustu dat zpracovat po provedení `gtlike`. Celé zpracování dat z Fermiho má totiž jeden podstatný problém. Nikde (ani na webu GSFC) nejsou popsány výsledky `gtlike` - tj popis dat které vyplivne `gtlike`, jak tyto data zpracovat apod. Vůbec nebylo jasné jak získat odchylky a zda mou vyrobená spektra skutečně odpovídají realitě. Musel jsem tedy mnou vyrobené výsledky porovnávat s jinými pracemi a také ověřovat spoustů věcí metodou pokus-omyl což bylo značně časově náročné kvůli výpočetnímu času.

Kromě výroby spekter jsem chtěl také dosáhnout časové analýzy jednotlivých blazarů a quasarů. Fotometrie a změna spektrálního indexu v čase je totiž tím nejzajímavějším co se dá u těchto objektů studovat. Na webu GSFC přitom o tomto není vůbec zmínka. SciTools pouze obsahují proceduru na provedení aperturní fotometrie, ale to u tohoto typu dat dává velmi zkreslené výsledky. Vytvořil jsem tedy vlastní proceduru jak udělat kvalitní PSF fotometrii a fitování spektra v čase. Nazval bych to **vzorkování expozice**. Pomocí procedury `gtselect` vlastně provedu velké množství selekcí v čase a rozsekám tak data na spoustu menších celků v závislosti na mnou specifikované velikosti časového binu. Na každém z těchto bloků dat poté provedu celý analytický postup. Samozřejmě je nutné tyto bloky dat správně nasekat a výsledky potom správně poskládat. Z těchto výsledků můžu poté zkorelovat spektrální index s fotometrií nebo vytvořit trojrozměrné obrazy závislosti spektra nebo SED (spectral energy distribution) na čase. A to jsou velmi zajímavé výsledky, které mohou mnoho prozradit o samotných fyzikálních principech dějů v objektech typu AGN.

3.2 Preprocessing, postprocessing a automatizace

3.2.1 Popis řešení

Samotná výsledná metoda kompletního zpracování dat kterou jsem navrhl by byla velmi časově náročná a zvláště při metodě vzorkování expozice v praxi manuálně neproveditelná. Proto jsem napsal rozsáhlý obslužný skript. Ten považuji za hlavní výsledek této práce. Zaměřil jsem se na velmi vysokou míru automatizace. Skript tedy potřebuje velmi malý vstup uživatele a většinu věcí nutných k analýze si dokáže sám vytáhnout ze samotných dat. Navíc jsem jej napsal tak že spolupracuje s Fermi katalogem, takže není potřeba manuálně psát model s desítkami zdrojů a zjišťovat jejich názvy a souřadnice. Skript sám načte z Fermi katalogu všechny názvy zdrojů v našem výřezu, načte poziční souřadnice a sám napíše (mnohdy několikastránkový) model pro celé zkoumané pole. Činnost která by manuálně trvala desítky minut práce tak zvládne během vteřiny. V podobném smyslu pracují i další části skriptu. Při psaní skriptu jsem velmi kladl důraz na univerzálnost. To znamená aby skript fungoval pro jakýkoliv výběr prostoru, času nebo spektrálního intervalu, pro různý počet zdrojů ve výřezu apod. To způsobilo značné zesložnění skriptu, protože je třeba pracovat s proměným počtem prvků v proměnných, proměnným počtem cyklů v iteracích apod. To znamená že všechny tyto proměnné a parametry se musí definovat samy a to na základě předcházejícího prozkoumání dat. Také je nutné kvůli proměnnosti ošetřit všechny proměnné a podmínky proti různým chybám, přetečení apod.

Nyní k popisu samotného skriptu. Je napsán ve skriptovacím jazyce **bash**, využívá také jazyka **awk** a pro implementaci některých nutných sekvencí jazyka C jsem použil **bc**. Jako prekvizity potřebuje **GNU coreutils** (které jsou součástí každého operačního systému UNIXového typu) na práci s FITS využívá soubor procedur **HEATTOOLS** (v mém případě jsem využil balík HEASOFT), dále **GNUPLOT** pro vytváření grafů a nakonec samozřejmě samotné **ScienceTools**, což je proprietární software pro zpracování dat z Fermiho. Všechny použité software je licencován jako open source.

3.2.2 Struktura skriptu

Celý skript je přiložen v příloze 1. Nebudu popisovat úplně přesně jak funguje, protože by to nebylo užitečné. Spíše vysvětlím co provádějí jeho jednotlivé části a především co k jeho obsluze potřebuje vědět uživatel.

- **User input** – v této části se nastavují základní přepínače. Kromě volitelné úpravy modelu je to prakticky jediný vstup který musí uživatel provést. Hlavní je volba velikosti časového binu v sekundách. Pokud se nastaví 0,

skript udělá pouze jeden bin, tedy zintegruje data od začátku do konce. Počet energiových binu (20) je vcelku optimální a není potřeba jej vůbec měnit. Přepínač `modelswitch` přepíná mezi módem tvorby modelu (1) a provedení analýzy (0). Proměnná `energy` určuje prahovou (minimální) intenzitu ve fotonech od které budou zdroje z Fermi katalogu zahrnuty do tvorby modelu. Přepínač `iterswitch` rozhoduje zda se provedou aditivní iterační cykly. Proměnná `iter` je potom počet těchto aditivních cyklů. Proměnná `cores` je velmi důležitá, protože rozhoduje o paralelizaci, které se budu podrobně věnovat později.

- **Advanced user input** – pokročilejší možnosti nastavení. Např. zda provést pouze `gtlike` což se hodí v případě že máme již vytvořeny gti soubory, hyperkrychle a expoziční mapy a chceme ušetřit výpočetní čas.
- **Environment** - v této části se nastavují proměnné určující kam se budou zapisovat data, resp. v jakých adresářích se bude pracovat. Z uživatelského hlediska lze cestu pro pracovní adresář definovat proměnou `GENWAY`. Dále dojde k vytvoření adresářové struktury pro výsledky skriptu.
- **Getting parameters** – pomocí procedury `gtvcut` se provede prozkoumání surových dat (FITS souborů) které jsme stáhli z LAT serveru. Vše potřebné se vypíše do souboru. Skript pak následně extrahuje všechny potřebné parametry které budeme potřebovat v průběhu celé analýzy a načte je do proměnných. Jedná se například o souřadnice středu snímku, `radius`, čas v MET 2.2.2 začátku a konce zaznamenaných dat a interval energií který data pokrývají. To je velmi užitečné, protože uživatel si nemusí zapisovat parametry které zadal do požadavku při získávání dat LAT serveru. Ani tyto informace nemusí později pracně zjišťovat.
- **Model construction** – skript s použitím procedury `ftlist` z HEATTOOLS a parametrů získaných v předchozí části vytáhne z Fermi katalogu názvy všech bodových objektů které se nacházejí v našem výřezu dat a včetně souřadnic (`Ra`, `Dec`) je vypíše do souboru `objectlist`. Do procedury `ftlist` jsem také napsal podmínku pro omezení výběru dat v závislosti na integrálním toku od 100 MeV do 100 GeV. Určující je proměnná `energy` kterou uživatel specifikuje v části `user input`. Z Fermi katalogu tak můžeme vytáhnout např. pouze slabé nebo silné objekty apod. Skript potom s využitím těchto dat (ze souboru `objectlist`) sám napíše XML model pro celou oblast pokrytou našimi daty. Zkonstruuje model pro extragalaktické i galaktické pozadí a také pro všechny bodové objekty (zpravidla několik desítek), jejichž spektra jsou namodelována jako *simple power law*. Uživatel potom může ručně upravit spektrální část modelu objektu který chceme zkoumat např. na exponential cutoff apod.

- **Stack construction** – neboli vytvoření stohu. Dojde k použití metody "vzorkování expozice" kterou jsem navrhnul. Prakticky dojde k vytvoření velkého množství bloků kódu pro různé expozice (a to tak aby se žádný časový interval nebyl vynechán). Tyto bloky kódu jsou uloženy do samostatných souborů.
- **Stack execution** – dojde k multiprocessorovému spuštění bloků kódu vytvořených v předchozí části. Kód každého bloku provede kompletní vědeckou analýzu pro svou část expozice. To zahrnuje kromě selektivních procedur vytvoření hyperkrychle, expmapy, countmapy a především běh `gtlike`. Vše s důmyslně nastavenými parametry. Této části se budu věnovat samostatně v podkapitole Paralelizace.
- **Iterations** – pokud to uživatel specifikuje v sekci user input, tak dojde k provedení aditivních iteračních cyklů. Důležité je že dojde k rekurentnímu předávání výsledných XML modelů, takže výsledný model při každém cyklu je poté použit jako vstupní model v následujícím cyklu. Kvůli vzorkování expozice je výsledných modelů klidně několik desítek, stovek nebo tisíc. Vše je tedy ošetřeno tak aby byl model použit pro správnou část expozice které přísluší. Výsledkem je velmi výrazné zpřesnění celé analýzy dat. Můžeme tak dosáhnout mnohem menších odchylek a také vyššího časového rozlišení.
- **Postprocessing and plotting** – paradoxně nejsložitější část celého skriptu z hlediska obtížnosti naprogramování. Detailní popis by byl velmi komplikovaný. Prakticky dojde k tomu že prostřednictvím HEATOOLS procedur a coreutils dojde k extrakci potřebných dat z výsledků `gtlike`, tedy souborů s XML modely a soubory `results.dat`. Problém je v tom že proměnné, cykly a parametry jednotlivých procedur musí umět pracovat s proměnným počtem prvků. Tato variabilita se podepisuje na složitosti této části skriptu. Po extrakci dat z výsledků `gtlike` dojde k výpočtu spekter, spektrálních indexů, fotometrie a tyto jsou uloženy do tabulek. Kromě toho dojde k vytvoření tzv cts modelů, které vypovídají o kvalitě fitu. Principem konstrukce cts modelů a spekter se budu zabývat později v samostatné podkapitole. Z vypočítaných dat uložených do tabulek potom dojde k vytvoření grafů. K tomu se využívá právě GNUPLOT. Ten je skvělý v tom že mu lze předat parametry celého vykreslení grafu rourou přímo v shellu.

3.2.3 Konstrukce CTS modelů a spekter

Výstup `gtlike` obsahuje počet fyzických countů ve zkoumaném SR, namodelovaná spektra v countech pro každý difusní i bodový zdroj který jsme specifikovali v XML modelu a nakonec nařizovaný model charakterizovaný např spektrálním indexem,

prefaktorem apod. standardním výstupem je také již spočtený integrální tok ve fotonech na centimetr čtvereční za sekundu. Ten se dá ale také získat z nafitovaného modelu jeho zintegrováním přes celý spektrální interval, což jsem mimojiné zkoušel a odpovídá to velmi přesně.

Tento výstup má jeden problém. Na webu GSFC ani nikde jinde jsem nenašel postup jak z něj sestrotit spektra. Co se týče CTS modelů tam byl pouze jejich obrázek ale žádný postup jak jej zkonstruovat. Jak u spekter tak u CTS modelů jsem musel vymyslet vlastní postup. Největší problém jsem měl s rozhodováním jak udělat chybové úsečky.

CTS modely Jsem zkonstruoval tak že fyzické county jsou vykresleny error-bary. Chybové úsečky jsem spočítal jako odmocninu z počtu countů, protože předpokládám že počet dopadnutých fotonů se řídí Poissonovým rozdělením. Namodelované county pro jednotlivé zdroje jsem vykreslil jako spojité křivky. Pod hlavním grafem je menší graf residuí. Hodnotu residuí v i -tém binu jsem spočítal jako

$$r_i = \frac{c_i - \sum_j m_{ij}}{\sum_j m_{ij}}. \quad (3.1)$$

kde c_i je počet fyzických countů v celém SR v i -tém intervalu spektra a $\sum_j m_{ij}$ je součet namodelovaných countů od všech j zdrojů (bodových i difusních) v i -tém intervalu spektra. Chybové úsečky jsem potom sestrojil jako

$$\delta r_i = \frac{\sqrt{c_i}}{\sum_j m_{ij}}. \quad (3.2)$$

Spektrum určitého objektu jsem zkonstruoval tak že jsem v každém intervalu vzal počet namodelovaných countů v daném intervalu a podělil ho součtem countů tohoto objektu ve všech spektrálních intervalech. Tento relativní počet jsem poté vynásobil celkovým integrálním tokem ve fotonech zjištěným ze standardního výstupu `gtlike`.

$$\varphi_i = \frac{m_i}{\sum_i m_i} \sum_i \varphi_i \quad (3.3)$$

kde φ_i je tok ve fotonech v i -tém intervalu spektra a m_i je počet namodelovaných countů daného objektu v i -tém intervalu spektra. Tento způsob jsem navrhl čistě na základě intuice a výsledné toky jsem tedy potom musel ověřovat pomocí prací jiných lidí.

Chybové úsečky jsem se rozhodl určit na základě zákona šíření chyb z namodelovaného count spektra. Opět jsem tedy předpokládal že počet namodelovaných countů se řídí Poissonovým rozdělením.

$$\delta \varphi_i = \frac{\sqrt{m_i}}{\sum_i m_i} \sum_i \varphi_i \quad (3.4)$$

SED (spectral energy distribution) jsem spočítal ze spektra. V každém spektrálním binu jsem průběh spektra aproximoval konstantní funkcí, jejíž hodnota odpovídala hodnotě toku. Ten jsem poté vynásobil hodnotou energie, kterou jsem stanovil jako střed spektrálního binu. Poté jsem to už jenom vynásobil určitou konstantou tak abych dostal SED v jednotkách $\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Jsem si vědom toho, že tento postup není rozhodně optimální. Největší chyba je v aproximování průběhu spektra konstantní funkcí. Správně bych měl použít aproximaci alespon lineární funkcí. I to by však v tomto případě nebylo optimální, zvláště v nižších energiích kde se nachází comptonovský peak. Důvod proč jsem nemohl použít ani lineární aproximaci je fakt že neznám funkční hodnoty na hranicích binu. Zním pouze funkční hodnotu ve středu intervalu.

Postup který by byl optimální by bylo vzít postupně funkční hodnoty ve třech intervalech vedle sebe a fitnout ho kvadratickým polynomem. Získanou funkci potom použít pro integraci přes prostřední interval. Tímto způsobem potom projet všechny spektrální intervaly. V praxi by se tento postup dal jednoduše naskriptovat v bashi a na fitování použít gnuplot. Přesto jsem tento postup nakonec nezrealizoval kvůli značnému zesložitému skriptu. Navíc vzhledem k přirozeným odchylkám není použití konstantní funkce zas tak špatné.

Fotometrie a časový průběh spektrálního indexu už byly na sestrojení jednoduché. Hodnoty jsem získal tak že jsem je vytáhl z výsledků `gtlike`, jediný problém bylo tedy zidentifikování se správným objektem. Chybové úsečky byly také jednoduché, protože při použití MINUIT fitu jsou součástí výsledků i nejistoty.

3.2.4 Postup provedení kompletní analýzy

Předpokládejme že chceme udělat časovou analýzu – tj primárně fotometrii a závislost spektrálního indexu (případně tvaru celého spektra) na čase. Pokud bychom chtěli zjistit pouze spektrum, tj udělat analýzu přes celou expozici, proces by byl mnohem jednodušší. Obecně lze postup celé analýzy rozdělit na dvě části – získání kvalitního modelu a provedení samotné analýzy. Při získávání modelu máme dvě volby. Přesný, ale pomalejší postup a nebo rychlý, ale méně kvalitní postup. Přesný postup představuje provedení kompletní provedení analýzy dat přes celou expozici s jediným časovým binem kde všechny objekty jsou namodelovány jako *simple power law*. Méně kvalitní, ale rychlejší postup, spočívá ve vytvoření modelu pouze na základě vytvoření modelu skriptem kdy ale dopředu nevíme jak dobrý tento model je. U přesného postupu tedy můžeme před provedením samotné časové anlyzy zhodnotit náš model, některé zdroje vyhodit, či ho jinak upravit. Já vždy používám přesný postup a ten také popíšu.

1. **Vytvoření prostředí** – v námi zvoleném umístění vytvoříme adresář `data`,

kam nahrajeme surová data a adresář `cat1` kam stáhneme model galaktického a extragalaktického pozadí a také soubor s Fermi katalogem. Nakonec umístíme do pracovního adresáře můj skript.

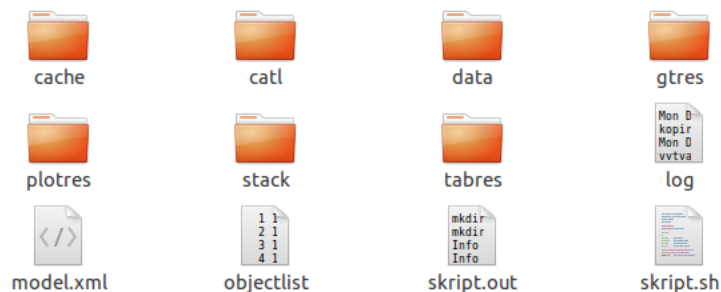
2. **Vytvoření základního modelu** – v části user input ve skriptu zadáme hodnotu `timebin` na 0 (analýza přes celou expozici), `modelswitch` 1 (vytvoření modelu), `energy` 0 (načte všechny zdroje z Fermi katalogu), `iterswitch` 0 (bez aditivních iterací), `iter` cokoliv a `cores` 1 (využití více jader v tomto případě není možné, budeme dělat analýzu přes jeden časový bin). Spustíme skript. Po pár vteřinách skript skončí. Vytvoří se soubor `objectlist` a také samotný XML model.
3. **Analýza přes celou expozici** – tu provedeme pouze za účelem ověření našeho modelu. Ve skriptu změním hodnotu `modelswitch` na 0 a spustíme skript. Provede se kompletní analýza. To může zabrat dva až pět dnů v závislosti na použitém hardwaru. Po skončení se podíváme na výsledek analýzy, především na `cts` modely (bude popsáno později) a zdroje které mají téměř nulovou hodnotu σ (závisí na TS) můžeme vyloučit.
4. **Samotná časová analýza** – použitím metody vzorkování expozice. Vytvoříme kompletně nový adresář ve které budeme pracovat. Z adresáře kde jsme provedli analýzu přes celou expozici přetáhneme adresář `data`, `cat1`, soubor se skriptem a také soubor s výsledným modelem a také `objectlist`. V modelu je velmi důležité změnit spektrální model bodového zdroje který zkomáráme ze *simple power law* na komplikovanější model, který lépe odpovídá zkoumanému objektu. U quasarů/blazarů to téměř vždy bude *power law with exponential cutoff*. Důležitá věc je že pokud jsme z modelu nějaký zdroj odstranili (např kvůli nulové TS), musíme jej odstranit také z `objectlistu`. Dále je velmi vhodné, zafixovat spektrální parametry u zdrojů které nás nezajímají. To značně urychlí analýzu a taky přinese přesnější výsledek u zdroje (zdrojů) který nás zajímá. Určité riziko může představovat variabilita zafixovaných zdrojů. V porovnání s chybou fitu při nedostatku dat je tento postup přijatelný. Potom otevřeme soubor se skriptem a nastavíme následující hodnoty: `timebin` - konkrétní hodnota časového binu v sekundách, `modelswitch` 0, `iterswitch` 1, `iter` alespoň 2, `cores` na hodnotu počtu jader vašeho procesoru (nebo kolik jader chcete tomuto procesu vyhradit). Spustíme skript. Toť vše. Jakmile skript skončí, znamená to že celá analýza je hotova a můžeme si prohlédnout výsledky.

Na tomto jednoduchém postupu je vidět vysoký stupeň automatizace celého procesu. Uživatel pouze musí nastavovat přepínače a dokonce nemusí ani rozumět samotnému procesu analýzy. Metoda vzorkování expozice by nebyla "ručně" vůbec

proveditelná a i jednoduchá analýza popsaná např. na webu GSFC by zabrala člověku velké množství času. Vytvoření modelu, zjištění jaké objekty se nachází ve zkoumaném poli a zjištění jejich souřadnic, dále každá procedura má pět až deset parametrů které musí být správně nastaveny apod. Navíc jenom postprocessing a vytvoření grafů by zabralo více času než nakonfigurování analýzy.

3.2.5 Výsledky analýzy

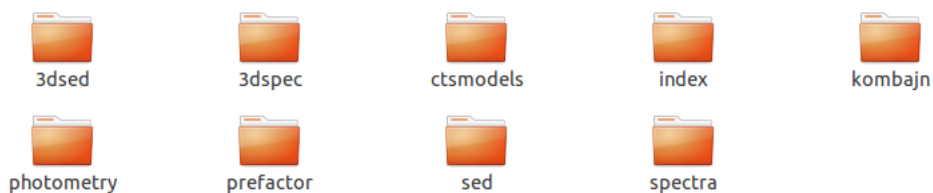
Skript kromě postprocessingu vykreslí grafy. Ty jsou finálním produktem celkové analýzy a tím hlavním co nás bude zajímat. Po skončení analýzy přibude v pracovní složce mnoho podsložek a souborů, jak můžete vidět na následujícím obrázku.



Obrázek: Obsah pracovního adresáře po skončení analýzy.

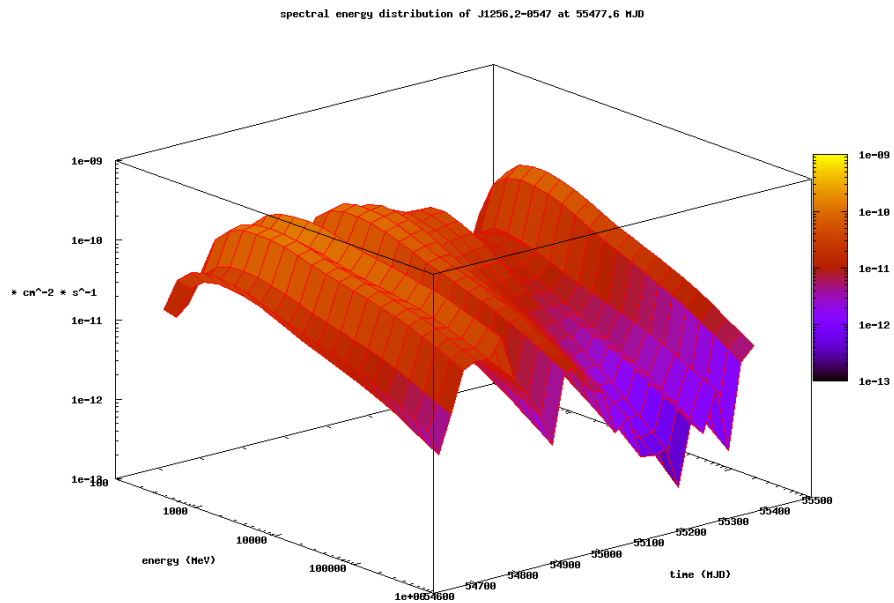
Původně (před začátkem běhu skriptu) zde byly pouze adresáře `data`, `catl`, soubor `skript.sh` a soubory `objectlist` a `model.xml` přetažené z adresáře kde proběhla analýza přes celou expozici. Vše ostatní je tedy produktem skriptu. Adresář `cache` obsahuje produkty procedur `gtselect`, `gtmktime`, `gtltcube` a `gtexpmap` pro každý úsek času (rozsekané expozice). To se může hodit pokud je potřeba opakovat `gtlike` s jiným nastavením. Není totiž potom třeba tyto produkty znova vytvářet což ušetří výpočetní čas. Adresář `gtres` obsahuje produkty procedury `gtlike` a `gtbin` - tj kromě výsledných modelů a dalších souborů (opět pro všechny časové úseky) také count mapy. Adresář `plotres` obsahuje vytvořené grafy. `Stack` obsahuje spoustu vytvořených skriptů (desítky, stovky nebo i tisíce) které jsou výsledkem metody vzorkování expozice, tj každý z nich obsahuje příslušný kód k provedení vědecké analýzy pro svou část expozice. `Tabres` představuje spoustu tabulek, které jsou výsledkem mého postprocessingu, jejich prohlížení nemá praktický smysl a slouží jako podklad pro tvorbu grafů. Soubor `log` obsahuje stručný záznam toho jak postupoval průběh skriptu, resp co bylo hotovo v jakém čase. `Skript.out` potom obsahuje zachycený standardní výstup z běhu skriptu.

Nejdůležitější je ale Adresář `plotres` s grafy. Konstrukci většiny těchto grafů jsem navrhl sám a výběr toho co bude vykresleno byl zvolen v důsledku mé libovůle. Někomu se tedy mohou zdát některé grafy zbytečné, případně naopak.

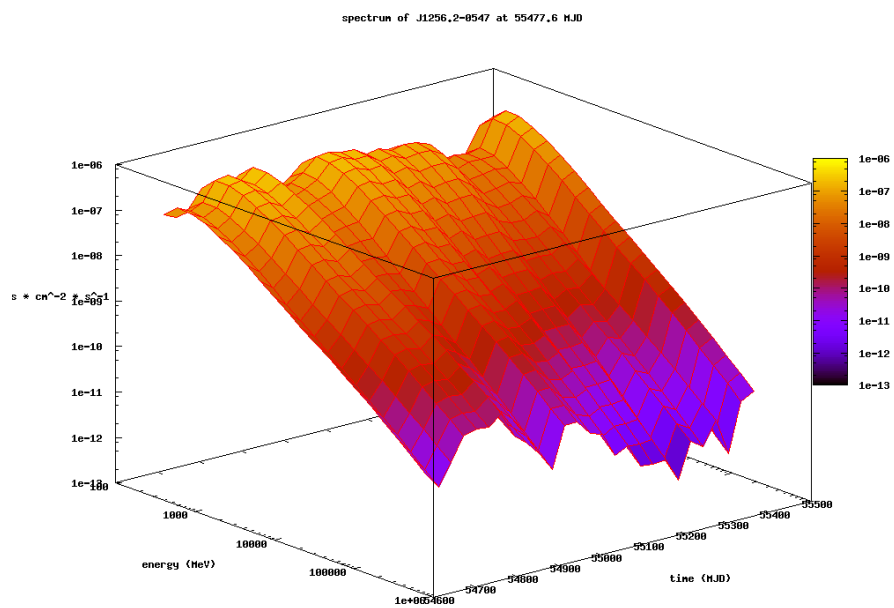


Obsah adresáře `plotres`.

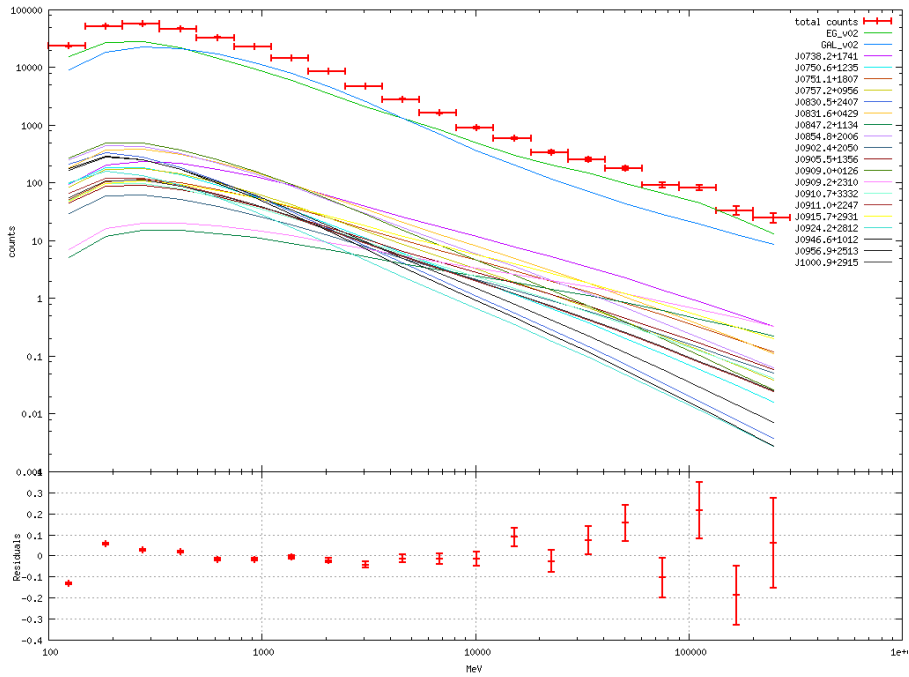
- Adresář `3dsed` obsahuje trojrozměrné grafy závislosti SED na čase pro všechny modelované objekty. Vytvořit podobné trojrozměrné grafy jsem plánoval od začátku. Nikde jsem totiž nic podobného neviděl a přitom mi přišlo, že by to bylo vcelku užitečné.
- Obsah adresáře `3dspec` je velmi podobný `3dsed`, v tomto případě jsou to závislosti fotonových spekter na čase pro všechny modelované objekty.
- Adresář `ctsmodels` obsahuje grafy které jsem navrhl podle obdobného grafu, který jsem viděl na webu GSFC [1]. Jako jediný představuje výsledek samotné analýzy (všechny ostatní grafy jsou výsledkem produktů mnou navrženého postprocessingu). Chybové úsečky představují skutečné county detekované ve zkoumaném SR, spočítal jsem je jako druhou odmocninu z počtu countů. Spojité křivky jsou potom namodelované county reprezentující surová spektra (před postprocessingem). Druhá část grafu jsou residua. Ty jsem spočítal podle postupu viz rovnice 3.4.
- Adresář `index` obsahuje grafy závislost spektrálního indexu na čase pro všechny modelované objekty.
- Adresář `photometry` obsahuje grafy fotometrie pro všechny modelované objekty.
- Adresář `kombajn` potom zkorelovanou závislost spektrálního indexu na čase a fotometrii pro všechny modelované objekty. Tyto grafy jsou asi po praktické stránce nejzajímavější, protože mohou mnoho vypovědět o fyzikálních změnách v daném objektu.
- Adresář `prefactor` obsahuje grafy závislost prefaktoru na čase pro všechny modelované objekty.
- Adresář `sed` obsahuje SED pro všechny modelované objekty.
- Adresář `spectra` obsahuje spektra pro všechny modelované objekty.



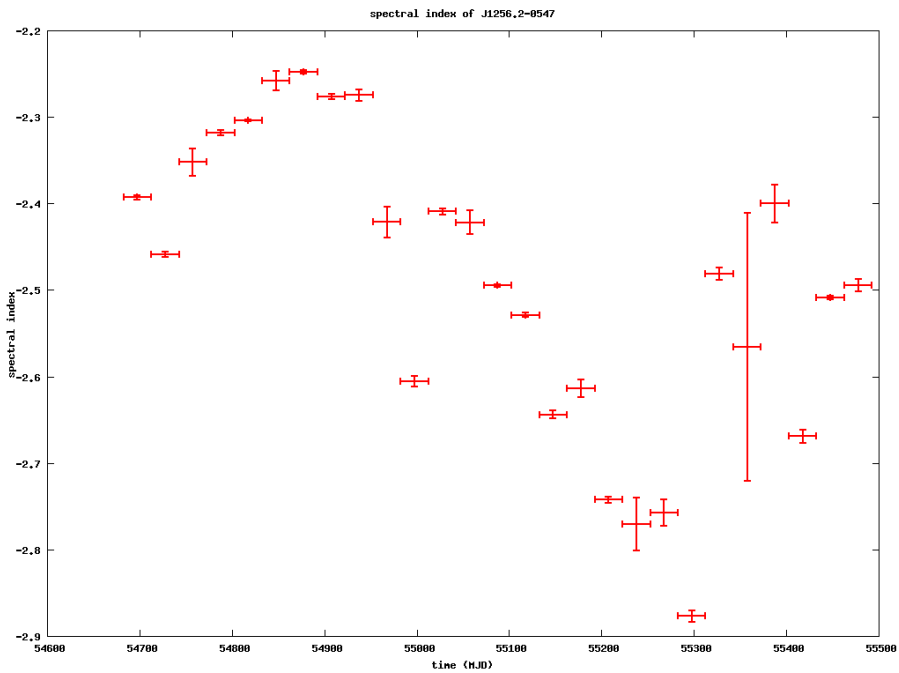
Obrázek: Ukázka grafu závislosti SED na čase.



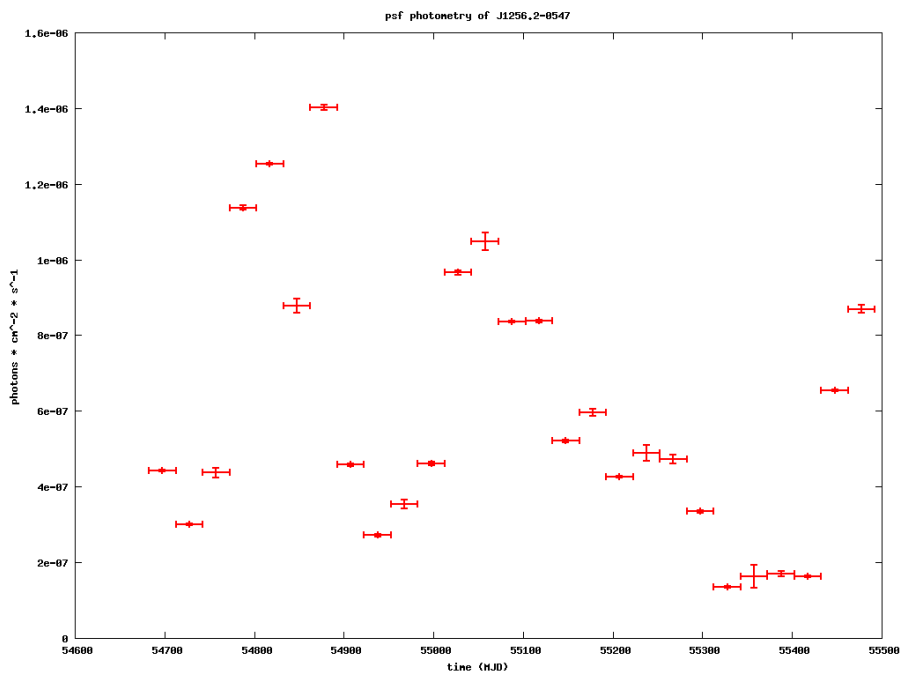
Obrázek: Ukázka grafu závislosti spektra na čase.



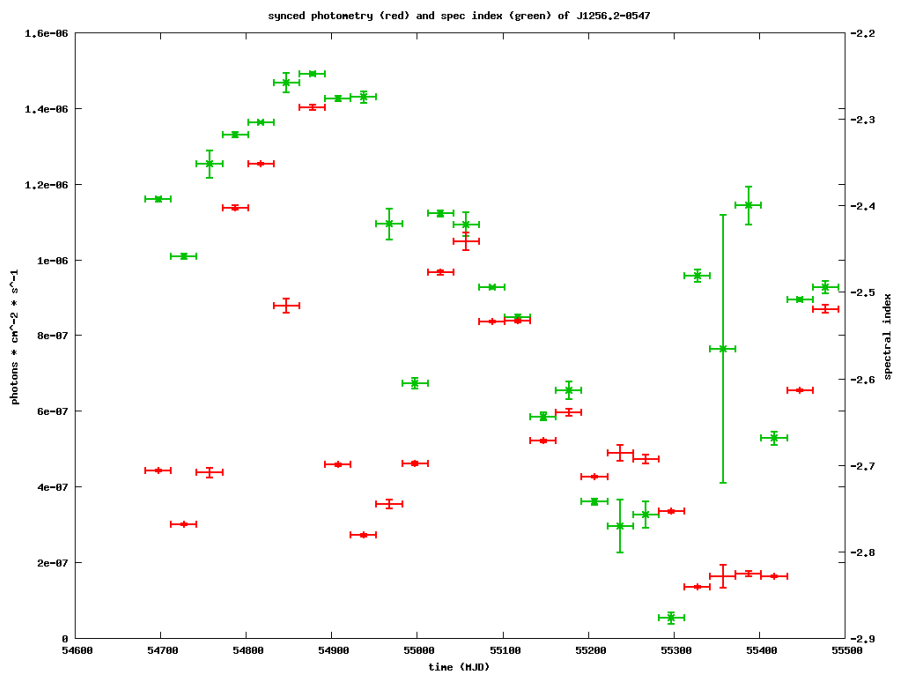
Obrázek: Ukázka grafu cts modelů popisující kvalitu fitu.



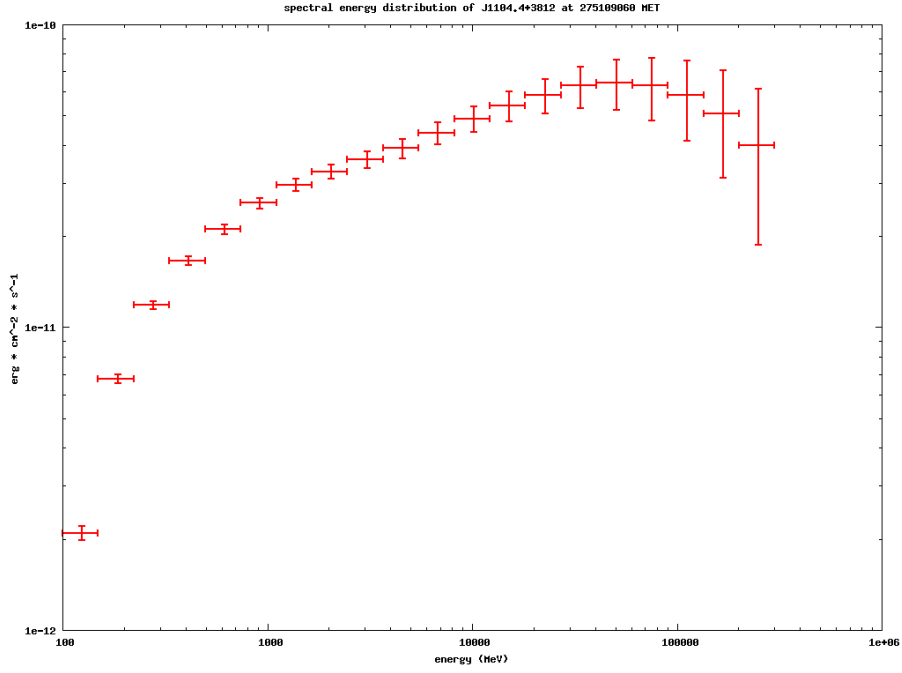
Obrázek: Ukázka grafu závislosti spektrálního indexu na čase.



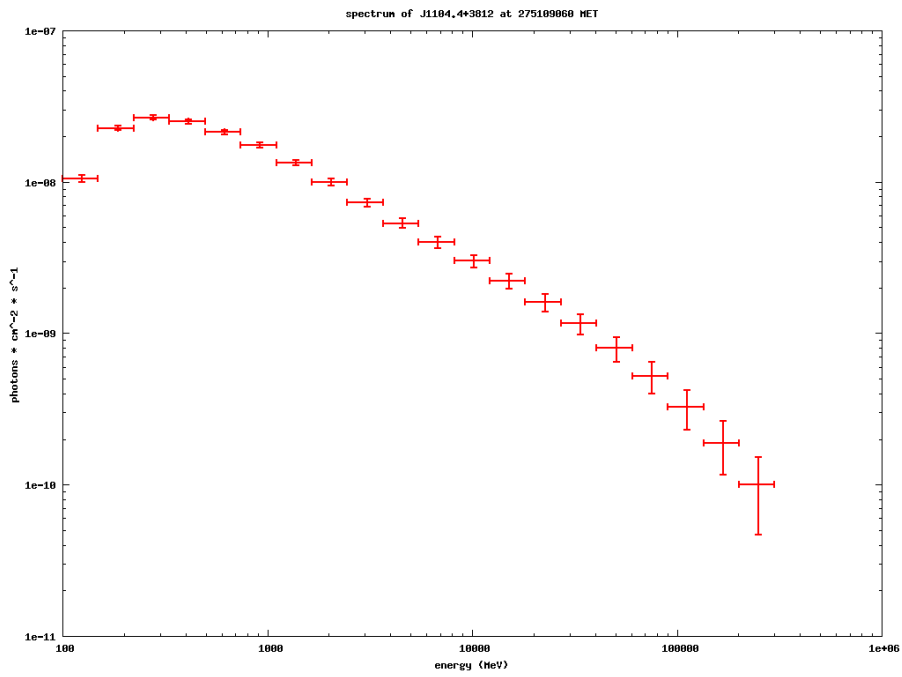
Obrázek: Ukázka grafu fotometrie.



Obrázek: Ukázka grafu zkorelované fotometrie a spektrálního indexu.



Obrázek: Ukázka grafu SED.



Obrázek: Ukázka grafu spektra.

3.3 Výpočetní náročnost

Je jedním z největších problémů. Vědecká analýza přes celou expozici (jeden časový bin, jde nám o zhotovení spektra) může trvat od 8 do 48 hodin. Závisí na expozici, počtu namodelovaných objektů a také jak složité modely byly použity. U zkoumání časového vývoje, tj použití metody vzorkování expozice trvá kompletní analýza přes maximální expozici ještě mnohem déle. Vliv na to má použití aditivních iterací.

Veškerou analýzu jsem prováděl na svém stolním PC. Jeho parametry jsou: tříjádrový procesor AMD Phenom II X3 2.8 GHz (jádro Heka), operační paměť 4GB DDR3. Pro účely analýzy jsem všechna jádra přetaktovává změnou násobiče. U jednovláknových operací jsem ustavil takt 3.2 GHz. U vícevláknových operací na všech třech jádrech jsem musel frekvenci snížit na 3.0 GHz protože při 3.2 GHz již docházelo k hardwarovým chybám a selhání systému.

Takt procesoru ovlivňuje výpočetní čas. Větší problém ale může být s pamětí. U analýzy přes celou expozici (jeden časový bin) si `gtlike` vyhradí typicky 2GB paměti. V některých případech je však paměťová náročnost ještě vyšší a stalo se mi že dokonce převýšila moji dostupnou paměť. V tom případě bylo nutné snížit počet namodelovaných objektů. Alternativou je použití binové analýzy, to ale negativně ovlivní kvalitu celkového fitu a tudíž sami lidé z GSFC to krajně nedoporučují.

U TS map je náročnost extrémní. Při rozumně nastavených parametrech trvá zpracování pole o radiu 20° řádově týdny. O paměťové náročnosti nemluvě.

Veškerá výpočetní náročnost s ohledem na CPU i paměť velmi silně závisí na mnoha použitých parametrech, tj rozlišení expoziční mapy, hyperkrychle, minimalizační procedury v `gtlike` apod. Veškeré zmíněné časy jsou tedy čistě teoretické.

3.3.1 Paralelizace

Veškeré procedury v ScienceTools jsou čistě sériové. Už při navrhování skriptu jsem se tedy zamýšlel nad tím zda je možné určité procesy paralelizovat.

Nakonec se mi podařilo navrhnout velmi účinný proces paralelizace. Jeho podmínkou ale je že se musí použít u metody vzorkování expozice, tj musíme použít více než jeden časový bin. Princip paralelizační metody spočívá v tom, že při vzorkování expozice se pro každou část zkoumané expozice (časový bin) vytvoří vlastní blok kódu který obsahuje kompletní soubor analytických procedur. Každý tento blok kódu je umístěn to samostatného shell skriptu. Tyto soubory jsou pak naházeny do jednoho stohu, což je adresář ve kterém se tyto soubory nachází (defaultně pojmenovaná `stack`).

Poté stačí už jenom tyto shell scripty paralelně zpustit. Původně jsem navrhoval použití `make`, nakonec jsem ale vybral utilitu `xargs` s parametrem `-P` a číslem reprezentující maximální počet paralelně spuštěných procesů. Jména souborů zmí-

něných shell skriptů jsou vlastně přes xargs předávána jako parametr tvořeným bash instancím. Mnou navržený paralelizační postup má několik výhod:

- **Téměř 100% účinnost** – u většiny paralelizačních postupů bývá obvyklá pouze určitá míra paralelizace (např 60%), kterou můžeme definovat třeba úsporou času nebo mírou využití systémových prostředků. Můj postup naopak dosahuje téměř absolutně paralelního běhu několika vláken.
- **Nezávislost vláken** – jednotlivá zpracovávaná vlákna, resp bloky kódu, jsou na sobě absolutně nezávislé. Závislost jednotlivých částí bývá velkým problémem při paralelizaci. V praxi to znamená to že je určitý část kódu se musí provést před jinou částí kódu a nikoliv naopak. To také mívá za následek zmíněnou nižší účinnost paralelizace. To ale není případ mé metody. Díky tomu lze v budoucnu vytvořit např cluster tvořený na sobě nezávislými počítači, kde každý zpracuje příslušnou část stohu, výsledky pošle zpět na server a zde se pouze vytvoří výsledek analýzy. To otevírá prostor například ke hromadnému zpracování a monitorování velkého množství zdrojů v reálném čase, které by při použití standardních procedur nebylo možné.
- **Jednoduchost** – jádro paralelizace, tedy spuštění předvytvořených bloků paralelizovatelného kódu, probíhá velmi chytrým způsobem. Využil jsem k tomu procedury xargs a předávání parametrů instancím shellu. Stupeň paralelizace potom určuje parametr omezující maximální množství běžících instancí. Celá exekuce tohoto postupu představuje jeden krátký řádek kódu. Tradiční postup pomocí makefile by byl nesrovnatelně komplikovanější.

3.4 Ověření postupů

Jak už bylo zmíněno, v oficiální dokumentaci Scitools, ani nikde jinde jsem nenašel postupy jak provést postprocessing a celkovou konstrukci spekter a ostatních produktů. Proto jsem musel tyto postupy navrhnout sám – viz podsekcce 3.2.3. Přestože jsem ve svých postupech nenašel žádnou faktickou chybu, považoval jsem za nutné je ověřit. Využil jsem k tomu srovnávání s jinými pracemi a také další postupy specifikované níže.

3.4.1 Srovnání s jinými pracemi

To bylo trochu problematické. Byť se jednalo o renomované práce, ve většině z nich byla spektra z Fermiho vyhotovena špatně. To znamená že byl použit špatný model. Lidé většinou použili jednoduché power law jako model pro spektra. Což je ve většině případů zpochybnitelné hned na první pohled, např kvůli vypuštění vlivu extinkce ve vyšších energiích vlivem EBL. Nehledě na to že u vlastní analýzy pro obyčejné power law a pro exponential cutoff mi vyšla většinou jednoznačně vyšší TS hodnota u zkoumaného objektu pro model s exponenciálním cutoff.

Přesto se mi podařilo najít dvě velmi přesné práce se zpracovanými spektry z Fermiho za použití správných modelů. První práce se týkala pulsaru Geminga a druhá blazaru Markarian 421.

- **Geminga** – na základě analýzy přes celkou časovou škálu s použitím exponential cutoff modelu spektra pulsaru jsem získal parametry spektra popsané níže v tabulce. Srovnal jsem je s prací Ozlema Celika [6].

Parametr spektra	Můj výsledek	Výsledek O. Celika
spektrální index	1.294 ± 0.007	1.337 ± 0.008
cutoff (GeV)	2.380 ± 0.013	2.563 ± 0.035
integrální tok ($\text{ph}^{-6}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	4.15 ± 0.01	4.28 ± 0.03
detekční významnost	846σ	$> 70\sigma$

Tabulka 3.1: Pulsar Geminga – ověření spektra.

Chybové intervaly se sice nepřekrývají, ale ze statistické podstaty analýzy a z vlastní zkušenosti s jinými objekty mohu říct, že se jedná o velmi přesnou shodu. Hlavní příčinou již zmíněné nepřesnosti je dle mého názoru hlavně značný vývoj IRF a kalibračních metod v průběhu času. Práce O. Celika je o více než rok starší než ta moje. To potvrzuje i řádově vyšší detekční významnost zdroje v mém případě, kterou kromě kvality analýzy ovlivňuje i množství použitých dat (countů) při analýze.

- **Markarian 421** - s použitím stejného modelu jako v předchozím případě jsem srovnával své výsledky s prací D. Paneque et al. [8].

Parametr spektra	Můj výsledek	Výsledek D. Paneque et al.
spektrální index	1.78 ± 0.03	1.79 ± 0.03
cutoff (GeV)	> 300	–
detekční významnost	139σ	–

Tabulka 3.2: Blazar Mrk 421 – ověření spektra.

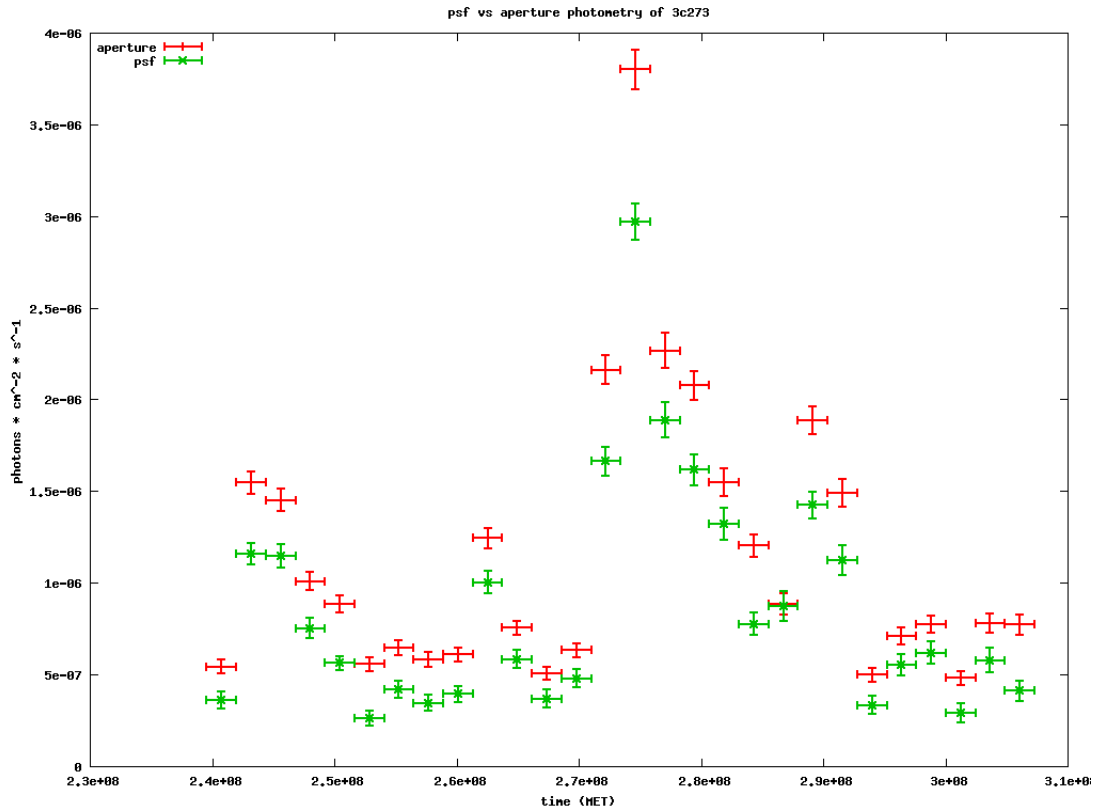
Markarian 421 je velmi blízký blazar (rudý posuv 0.03) a tudíž se u něj neprojevuje extinkce vlivem EBL. V tomto případě je tedy možné použít i model jednoduchého power law. To také udělal D. Paneque et al. Já jsem však úmyslně použil model power law s exponenciálním cutoff. A analýza se provedla správně, tedy model se zachoval tak jak jsem od něj očekával. Spektrální index naprosto přesně sedí s hodnotou D. Paneque et al. a hodnota cutoff energie byla spočtena na 300 GeV. To je ovšem konec intervalu na kterém jsem prováděl celou analýzu (0.1 – 300 GeV). Což znamená, že i bez předchozí znalosti že se jedná o blízký objekt jsem dostal tvar spektra odpovídající jednoduchému power law. A to je jednoznačný úspěch.

3.4.2 Srovnání aperturní a PSF fotometrie

Postup srovnávání s jinými pracemi dobře funguje u statického spektra. Potřeboval jsem ale také ověřit moji metodu vzorkování expozice. A to tímto způsobem již nešlo. U fotometrie každý zpravidla použije vlastní binning a navíc mnou navržená metoda vzorkování expozice je svým způsobem naprogramování unikátní. Což byla v tomto případě nevýhoda, protože to je mnou vytvořená syntetická záležitost, není to žádná utilita ze Scitools, kterou by používal i někdo jiný s kým bych pak mohl své výsledky srovnat. Byl jsem si však naprosto jistý, že moje metoda je z principu správná. Nepotřeboval jsem tedy nějaké detailní porovnávání hodnot, ale pouze ujištění že jsem ve skriptu neudělal nějakou chybu z nedbalosti, která by zapříčinila naprosto nesmyslná výstupní data.

Vzpomněl jsem si, že součástí Scitools je procedura `gtbin`. A s její pomocí se dá provést aperturní fotometrie. Není to vůbec její primární funkce, ale přímo na webu GSFC jsem našel zmínku že se dá takhle použít a tudíž jsem měl potvrzení o smysluplnosti tohoto postupu. Vybral jsem si tedy objekt – v tomto případě blazar 3C 273, což byl prvotní objekt na kterém jsem ověřoval své postupy už při psaní skriptu. Vybral jsem si stejný časový záběr, stejný binning a provedl jsem na tomto vzorku dat jak aperturní fotometrii pomocí `gtbin`, tak na to pustil svůj skript. U apertury jsem použil clonku odpovídající cca třem úhlovým stupňům.

Výsledkem metody vzorkování expozice je vlastně přesná (na to v jakých energiích se pohybujeme) PSF fotometrie. Výsledek si můžete prohlédnout na následujícím obrázku.



Obrázek: Aperturní fotometrie (červeně) a PSF fotometrie (zeleně).

Výsledek zcela potvrzuje správnost mnou navržené metody a také bezchybnost skriptu. Fotometrie pomocí mého skriptu (PSF) dává ve všech bincích menší počet countů, ale přitom kopíruje trend aperturní fotometrie. To má jasné vysvětlení v tom, že u aperturní fotometrie se neodečítá pozadí a navíc je celkově nepřesná protože PSF zdrojů jsou při nižších energiích (odkud ale pochází většina countů) velmi velké a špatně ohraničené.

Kapitola 4

Výsledky

4.1 Volba objektů

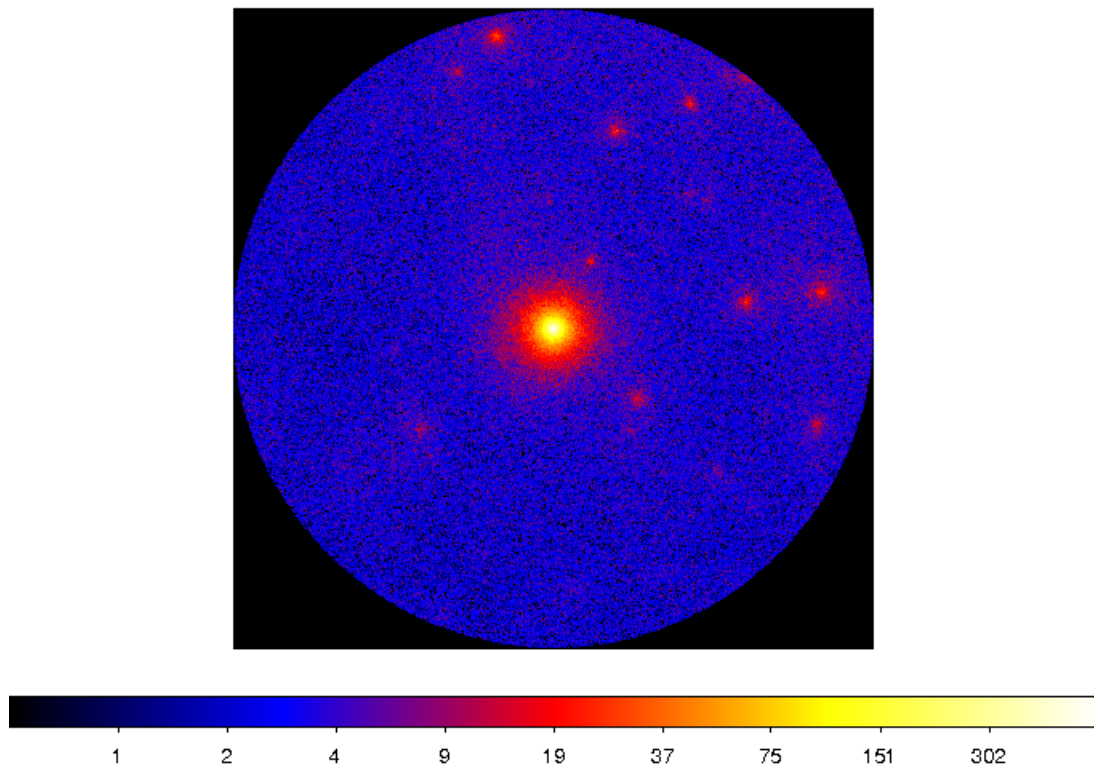
Pro aplikaci svých analytických skriptů v této práci jsem si vybral několik objektů. Jsou to všechno bodové objekty – blazary nebo quasary. Při jejich volbě jsem kladl důraz na to, aby tyto objekty byly velmi jasné ve mnou zkoumaném oboru spektra. Díky tomu jsem měl zaručeno, že dostanu dobré výsledky při analýze vzorkováním expozice, která je velmi citlivá na dostatek dat v jednotlivých časových binech. Druhým hlavním kritériem bylo vybrat variabilní zdroje, které tedy budou zajímavé z pohledu časové analýzy (vzorkování expozice). Všechna data jsem analyzoval ve spektrálním intervalu 100 MeV – 300 GeV. Soupis analyzovaných objektů je v následující tabulce.

Název (simbad)	Fermi katalog[2]	Gal. délka	Gal. šířka	Redshift
3C 454.3	J2253.9+1608	86.1111°	−38.1838°	0.859
Mrk 421	J1104.4+3812	179.8317°	+65.0315°	0.030
QSO J1512-0906	J512.8-0906	351.2893°	+40.1387°	0.360
OJ 287	J0854.8+2006	206.8121°	+35.8209°	0.306

Tabulka 4.1: Parametry objektů, které jsem vybral pro analýzu.

4.2 3C 454.3

Velmi jasný quasar. Jeho název ve fermi katalogu je J2253.9+1608. Leží úhlově velmi daleko od galaktické roviny a to jej činí pro můj typ analýzy mimořádně vhodným. PSF tohoto zdroje totiž není nijak deformována gradientem galaktického pozadí, které i přesto že se dá odečíst má vliv na přesnost analýzy. Navíc kolem 3C 454.3 nejsou žádné silné zdroje, které by deformovaly jeho PSF. Tohle všechno má za následek to, že u tohoto zdroje jsem dosáhl nejvyššího smysluplného časového rozlišení (při metodě vzorkování expozice) ze všech zdrojů, které jsem kdy zkoumal.



Obrázek: Count mapa zkoumané oblasti přes celou expozici (cca dva a půl roku) s quasarem 3C 454.3 přesně ve středu snímku. Velmi rozsáhlá PSF vypovídá o velké jasnosti tohoto objektu v gamma oboru spektra. Úhlový poloměr zkoumané výseče je 20° .

Tento quasar je jedním z nejzajímavějších objektů tohoto typu vůbec. V důsledku mimořádného zjasnění v prosinci 2009 byl vůbec nejjasnějším zdrojem na

celé obloze v gamma oboru [10]. Toto zjasnění o několik řádů se opakovalo v dubnu 2010. Tyto události byly naprosto bezprecedentní a co do procentuelního nárůstu jasnosti a množství uvolňované energie u tohoto typu objektu neměl v historii obdobu.

Velice pozoruhodná věc se mi stala v listopadu 2010. Zpracovával jsem data mimojiné z tohoto blazaru a objevil jsem velmi zvláštní věc. Při zpracovávání aktuálních dat metodou vzorkování expozice jsem si na grafu fotometrie všiml že poslední bod byl vychýlen do (na první pohled) irelevantních hodnot. Své metody jsem tehdy ještě neměl tak zdokonalené jako dnes, takže jsem to považoval za chybu v mém skriptu. Jelikož jsem ji tam ale nenašel, tak jsem začal podezřívát zmatečné hodnoty v datech. Během stahování aktuálních dat v následujících dnech a hlavně po zvýšení časového rozlišení (snížení hodnoty `timebin` v mém skriptu) jsem zde však objevil jasný trend. V té době jsem již z webu zjistil, že quasar 3C 454.3 prochází mimořádným zjasněním. Z mnou zpracovaných dat jsem odhalil, že toto zjasnění bylo téměř $3\times$ větší než již tak rekordní zjasnění v prosinci 2009.

4.2.1 Porovnání modelů a výsledné spektrum

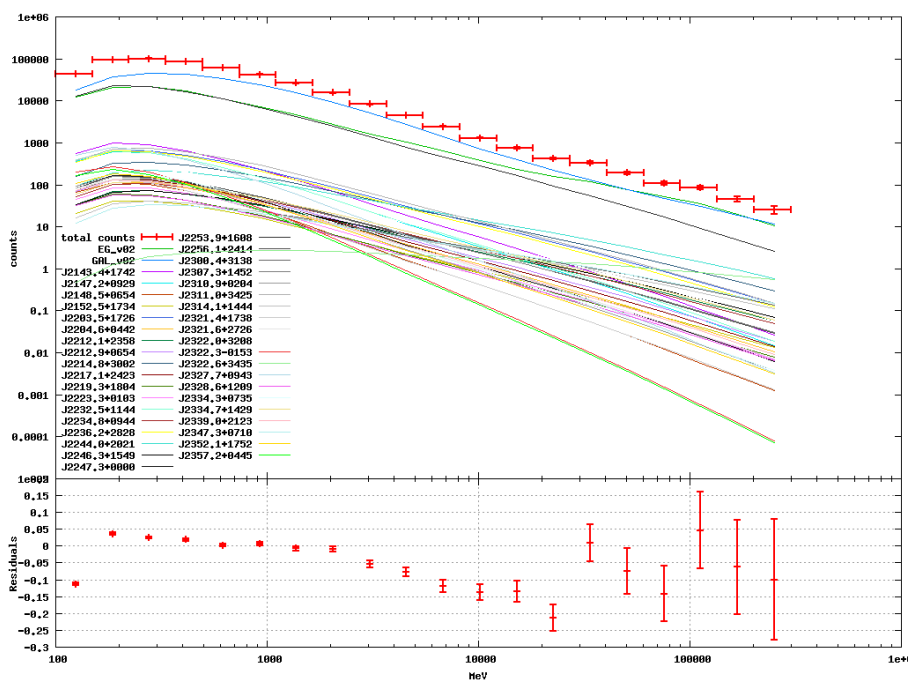
Při zpracovávání dat jsem nejprve musel najít vhodný model pro mnou zkoumaný objekt. To znamená, že jsem musel provést kompletní analýzu přes celý časový interval abych zjistil co možná nejpřesnější tvar spektra. Porovnáním residuí na grafu CTS modelů a především TS hodnot zkoumaného objektu pro různý typ modelu spektra mi vyšel jako nejlepší model *power law with exponential cutoff*. Pro tento model mě napadá i nejlepší fyzikální zdůvodnění, kde power law složka reprezentuje inverzní comptonův rozptyl (v detailu grafu spektra a SED je pěkně vidět i comptonovský peak) a exponenciální cutoff je způsoben zeslabením ve vysokoenergetické části spektra v důsledku interakce fotonů s EBL.

Model spektra	TS
simple power law	378028
broken power law	378449
power law with exponenital cutoff	378609

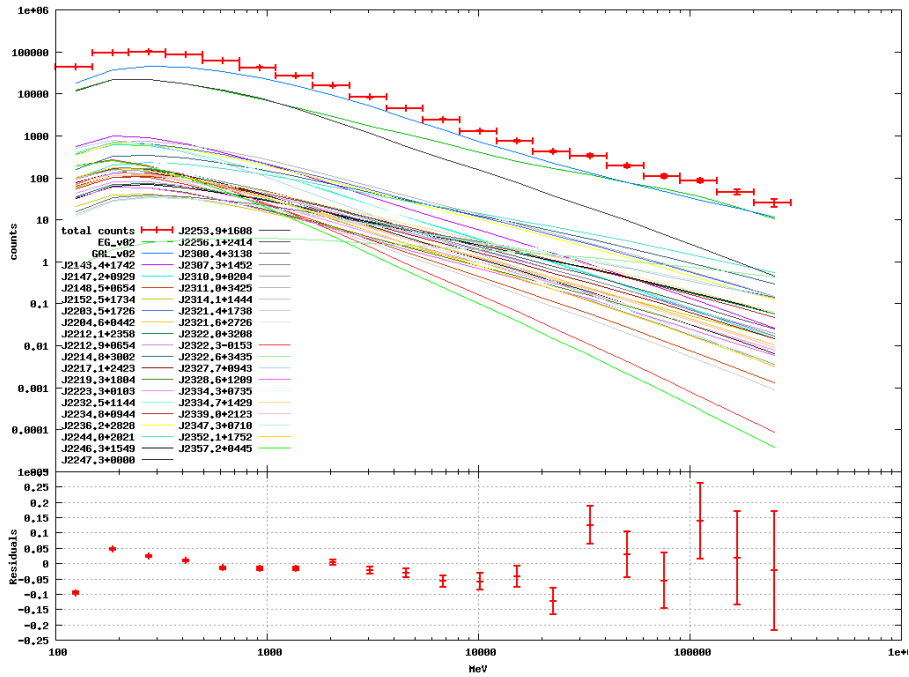
Tabulka 4.2: Porovnání modelů spektra pro quasar 3C 454.3.

Parametr spektra	Hodnota
N_0	$(47.66 \pm 0.39) \times 10^{-9} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
γ	-2.256 ± 0.008
E_b	$(169 \pm 29) \text{ MeV}$
p_1	$(6.38 \pm 0.28) \text{ GeV}$
Flux (0.1 – 300 GeV)	$(3.699 \pm 0.017) \times 10^{-6} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

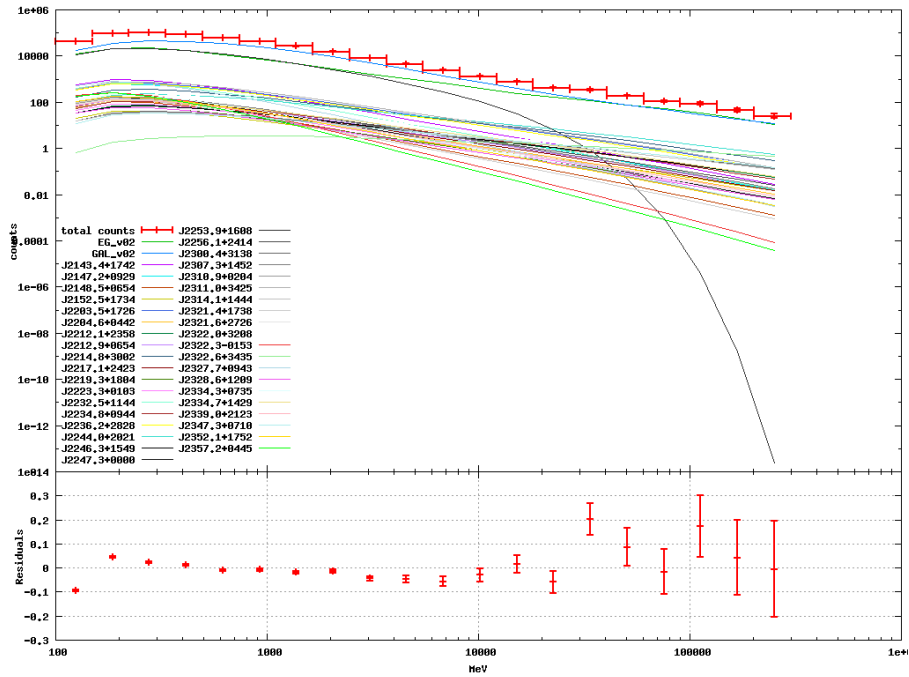
Tabulka 4.3: Výsledné parametry spektra pro quasar 3C 454.3. Co znamenají jednotlivé parametry bylo vysvětleno v podsekcí 2.2.7.



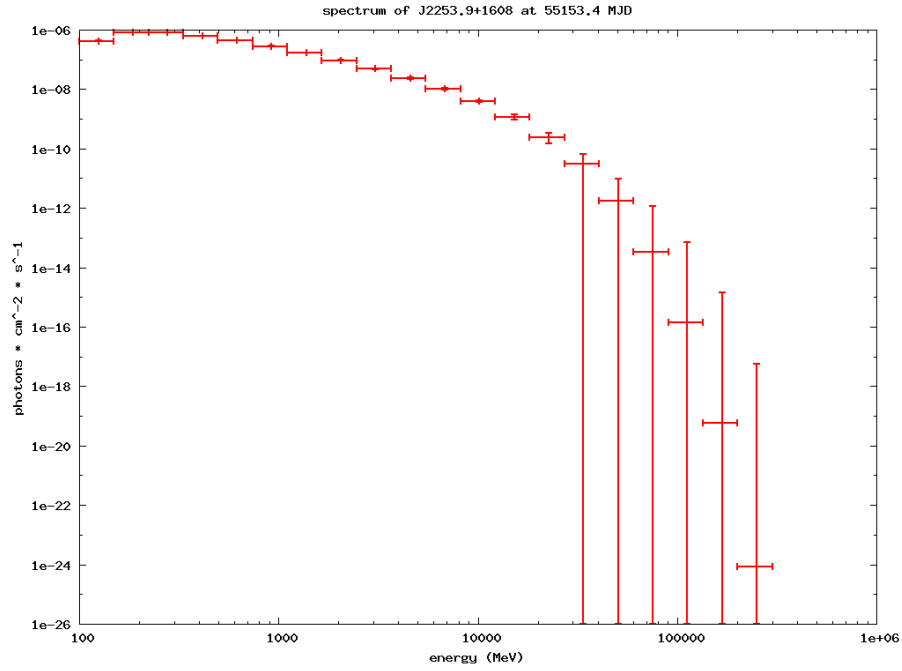
Obrázek: Graf CTS modelů pro model spektra *simple power law*.



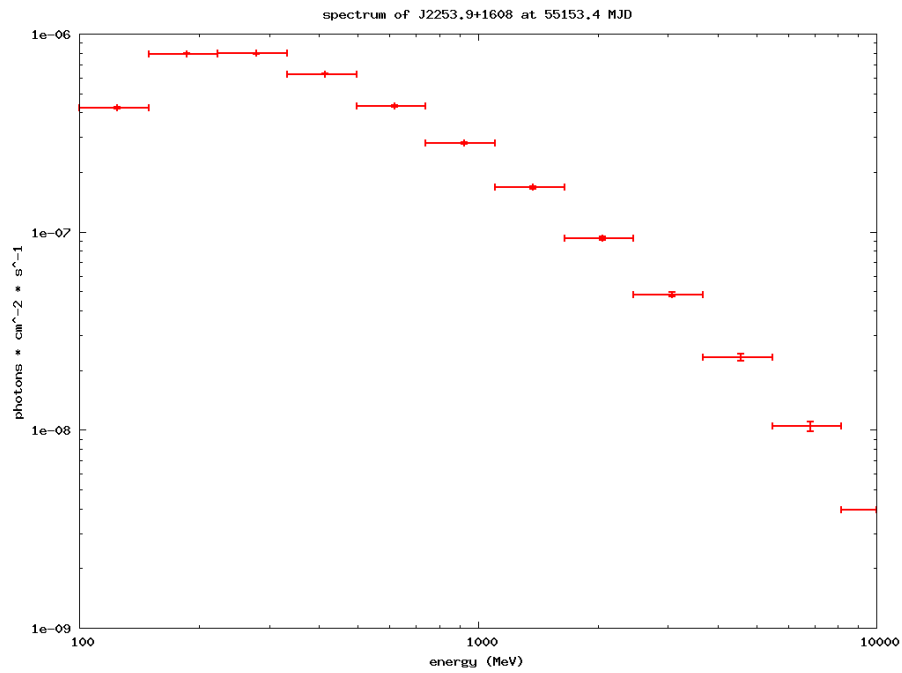
Obrázek: Graf CTS modelů pro model spektra *broken power law*.



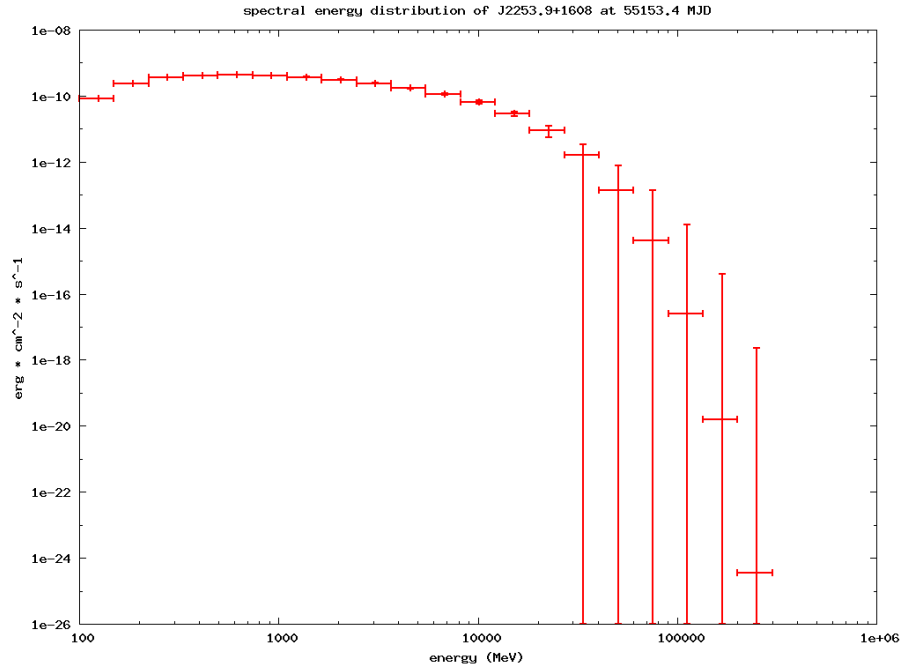
Obrázek: Graf CTS modelů pro model *power law with exponential cutoff*.



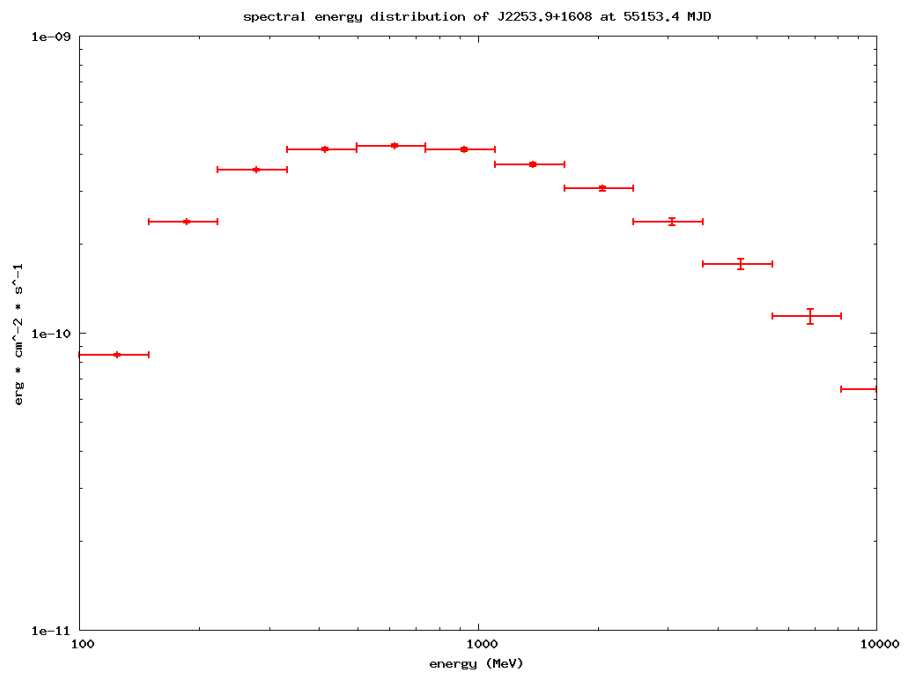
Obrázek: Graf výsledného spektra pro model *power law with exponential cutoff*.



Obrázek: Detail předchozího grafu spektra od 100 MeV do 10 GeV.



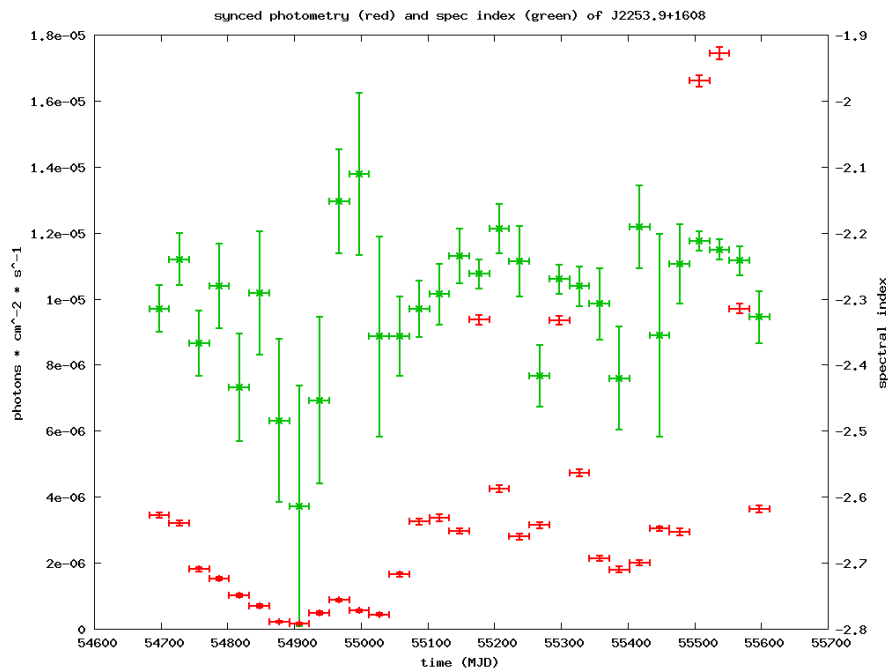
Obrázek: Graf výsledné SED pro model *power law with exponential cutoff*.



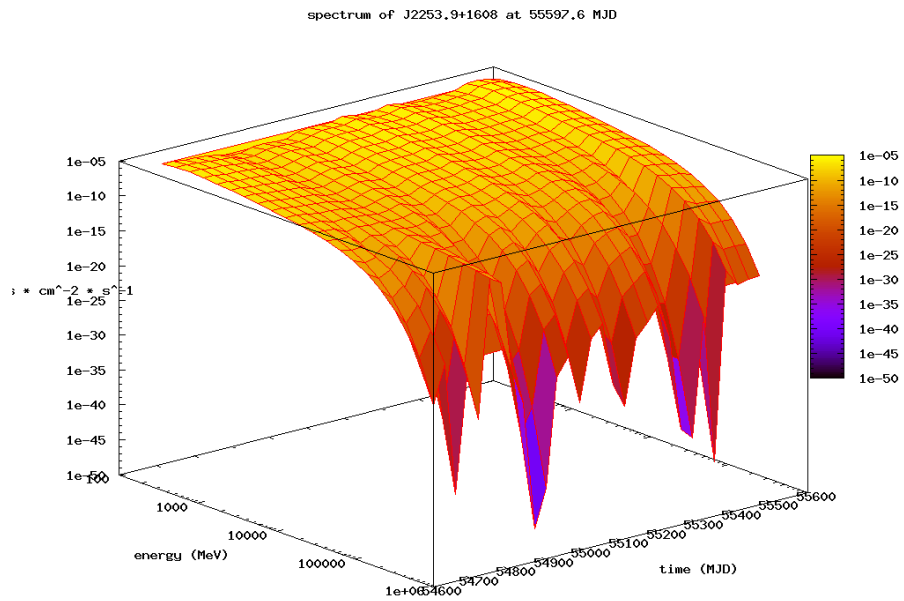
Obrázek: Detail předchozího grafu SED od 100 MeV do 10 GeV.

4.2.2 Časová analýza

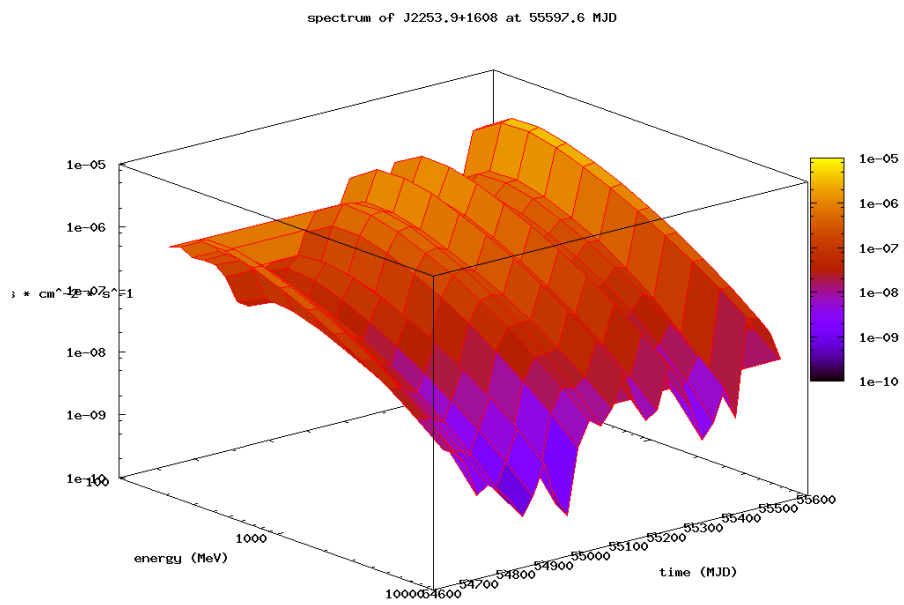
Tu jsem provedl za účelem získání závislosti spektrálního indexu na čase a především fotometrie. Dalším produktem jsou trojrozměrné obrázky závislosti spektra resp. SED na čase. Přestože můj skript standardně provede veškeré možné typy analýz, kompletní časovou analýzu (tedy kromě fotometrie i spektrální index a trojrozměrné grafy spektra a SED) pro tento objekt zde přiložím pouze pro analýzu s velikostí časového binu 30 dní. U druhé analýzy s časovým binem 7 dní přiložím pouze fotometrii.



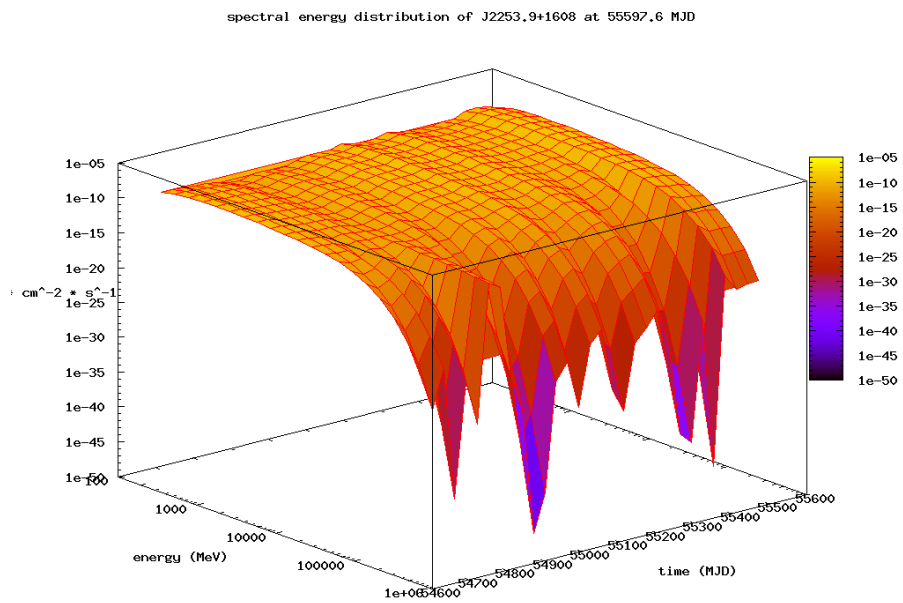
Obrázek: Binning 30 dní – zkorelovaná fotometrie (červeně) a závislost spektrálního indexu na čase (zeleně).



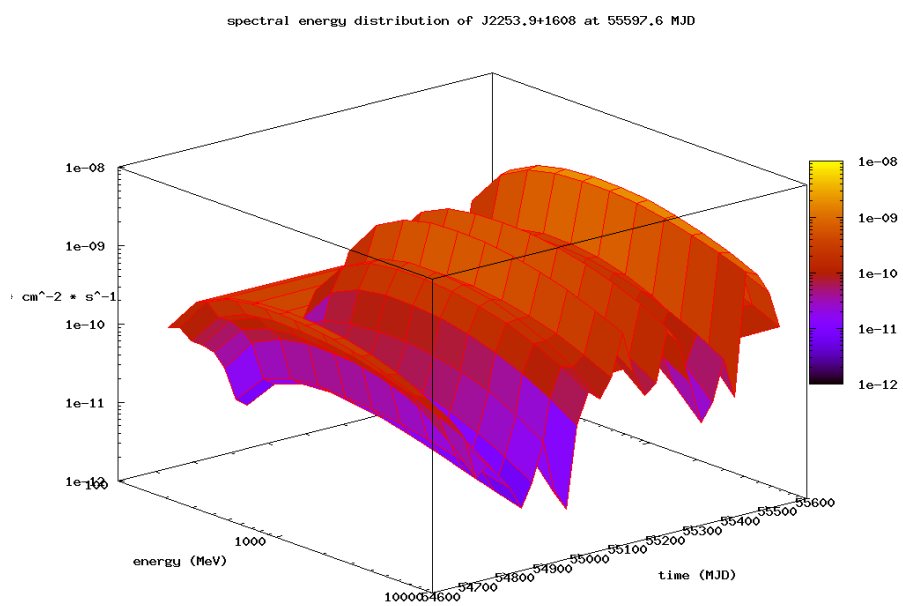
Obrázek: Binning 30 dní – závislost fotonového spektra na čase.



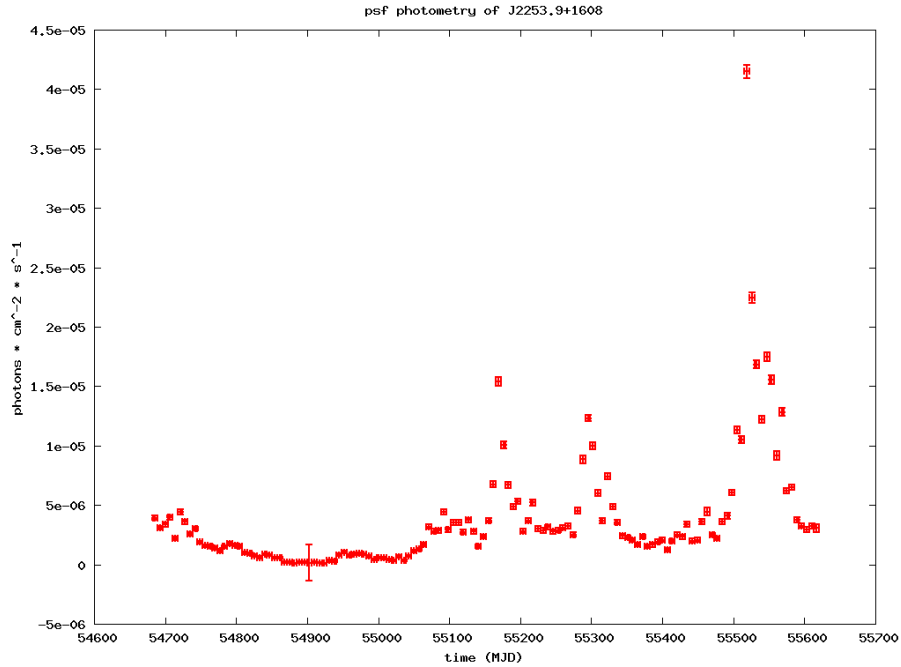
Obrázek: Detail předchozího grafu od 100 MeV do 10 GeV.



Obrázek: Binning 30 dní – závislost hustoty spektrální energie na čase.



Obrázek: Detail předchozího grafu od 100 MeV do 10 GeV.

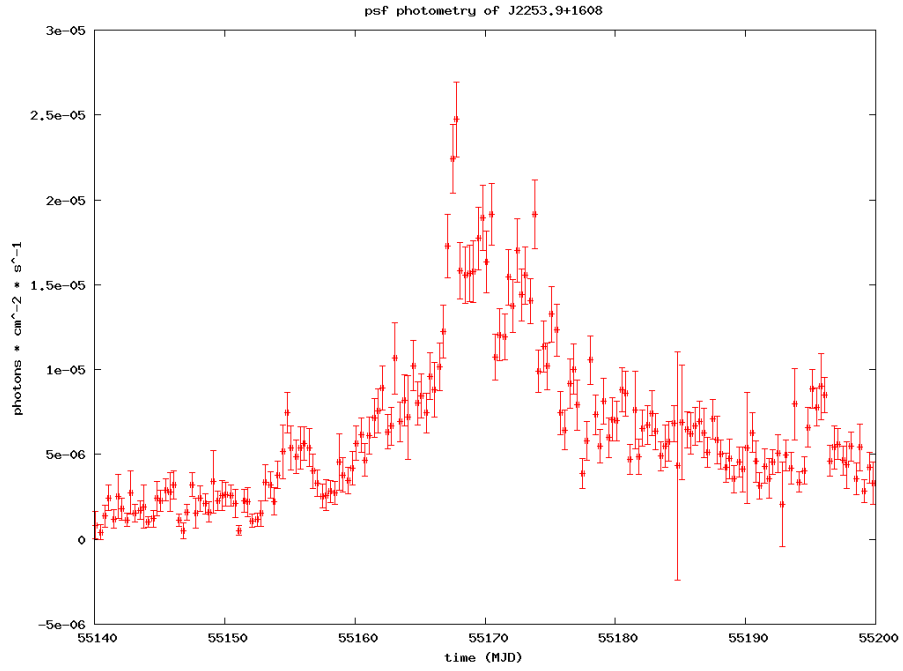


Obrázek: Binning 7 dní – fotometrie.

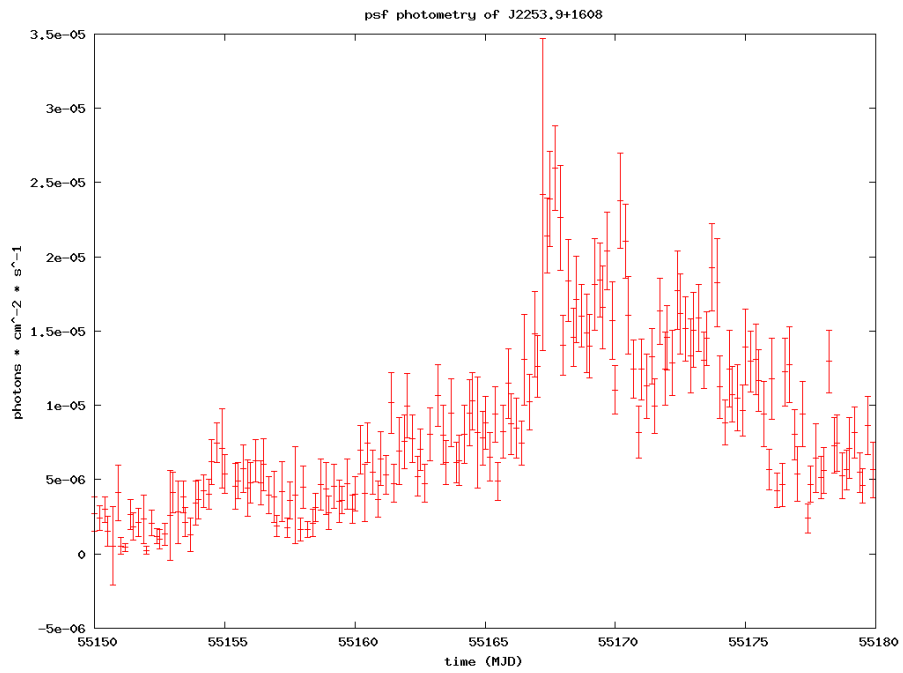
4.2.3 Neobvyklá zjasnění

Quasaru 3C 454.3 jsem se rozhodl věnovat více pozornosti než ostatním objektům a to z důvodu přítomnosti extrémních zjasnění, které jsem již popisoval v úvodním textu k tomuto objektu. V praxi to znamená že jsem udělal výřezy dat pro všechny tři významná zjasnění – v prosinci 2009, dubnu 2010 a především to největší v listopadu 2010, které jsem měl to štěstí pozorovat téměř v reálném čase. Tyto tři soubory dat jsem opět podrobil časové analýze mým skriptem.

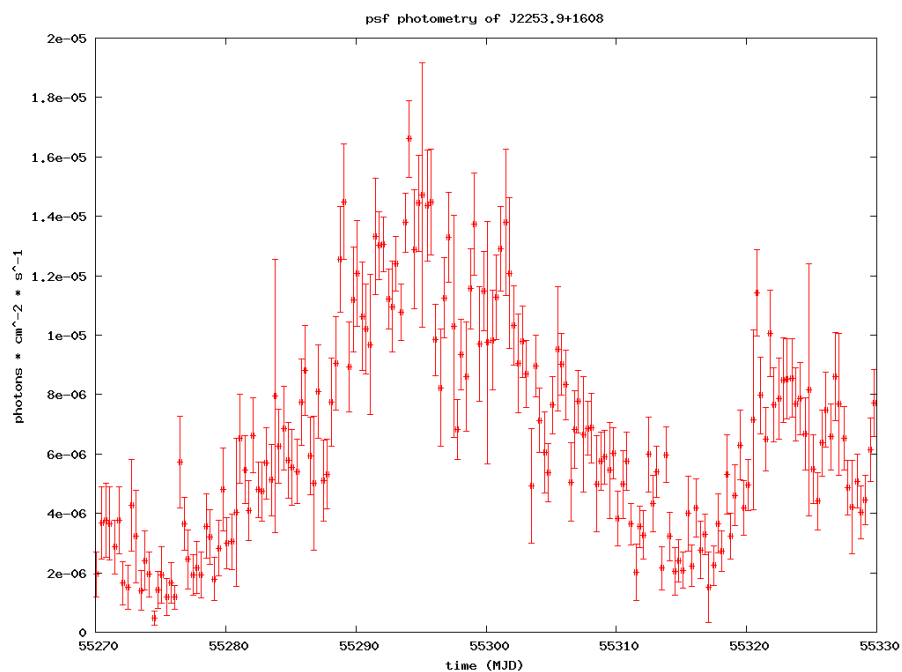
V praxi jsem udělal mnoho takových iterací a při každé jsem snižoval velikost časového binu (tedy zvyšoval rozlišení). U toho posledního zjasnění (listopad 2010) jsem se dostal až na neskutečné 4 hodiny! Když si uvědomíte, že běžně bývá obvyklý binning v řádu týdnů, tak je to jednoznačně skvělý výsledek. Během posledních měsíců jsem navíc své metody značně zdokonalil například použitím přesného modelu vytvořeném přes celou expozici, fixováním parametrů a především implementováním aditivních iterací s rekurentním předáváním modelů. Tím jsem dosáhl ještě většího vyhlazení křivek.



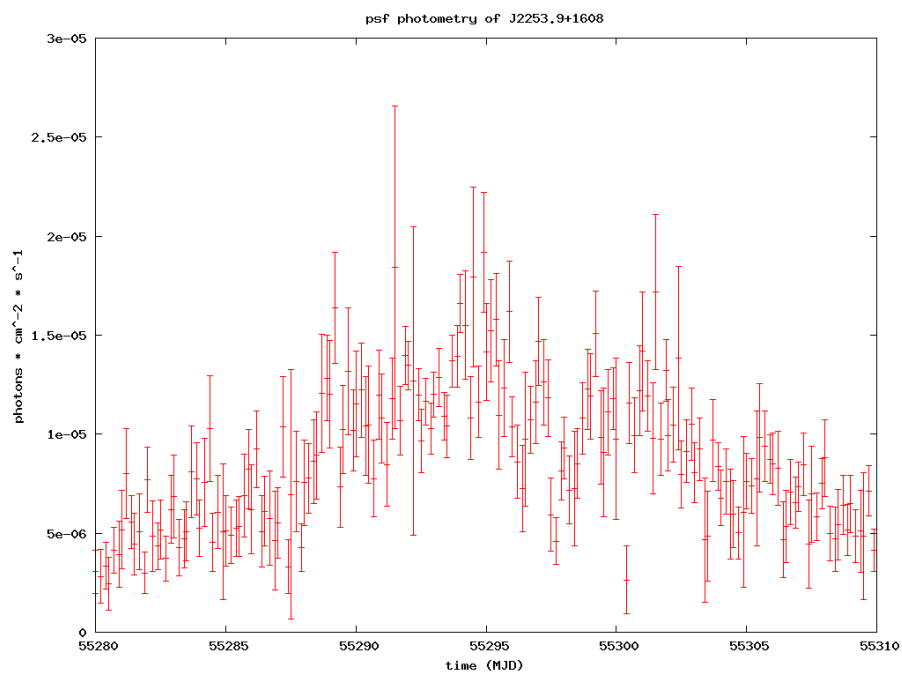
Obrázek: Fotometrie zjasnění v prosinci 2009 – binning 8 hodin.



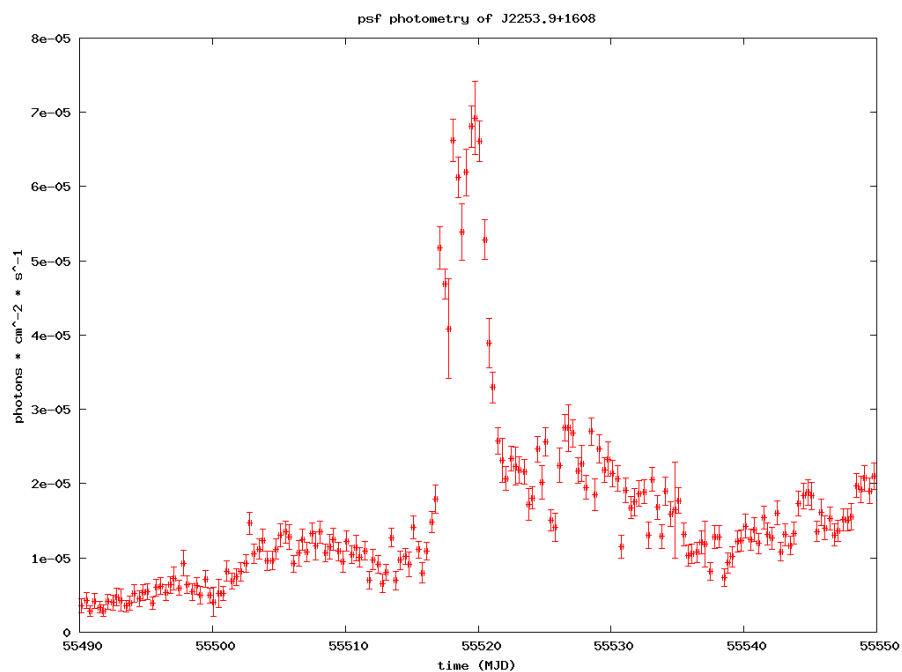
Obrázek: Fotometrie zjasnění v prosinci 2009 – binning 4 hodiny.



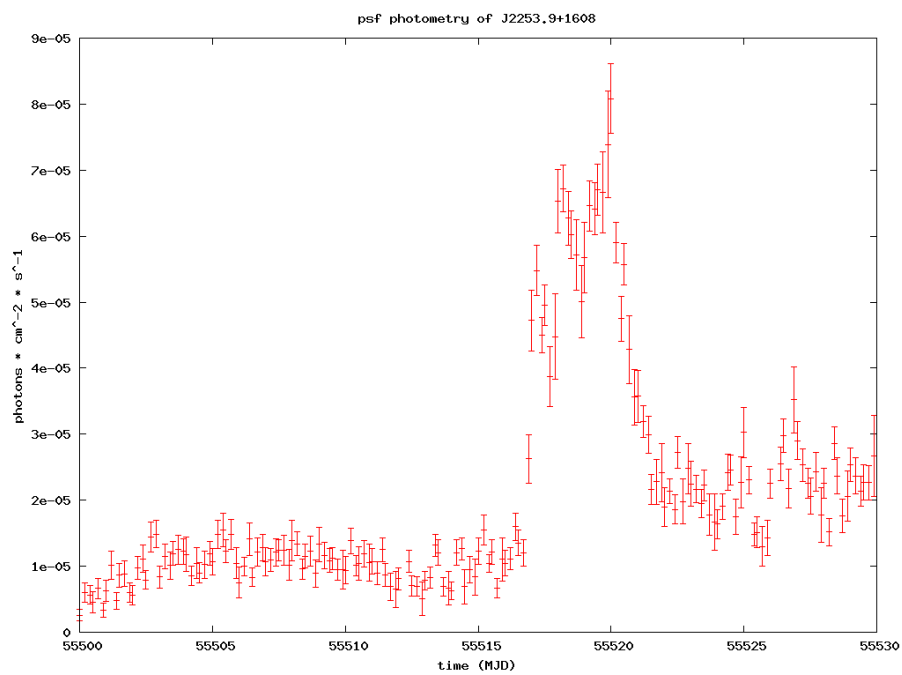
Obrázek: Fotometrie zjasnění v dubnu 2010 – binning 8 hodin.



Obrázek: Fotometrie zjasnění v dubnu 2010 – binning 4 hodiny.



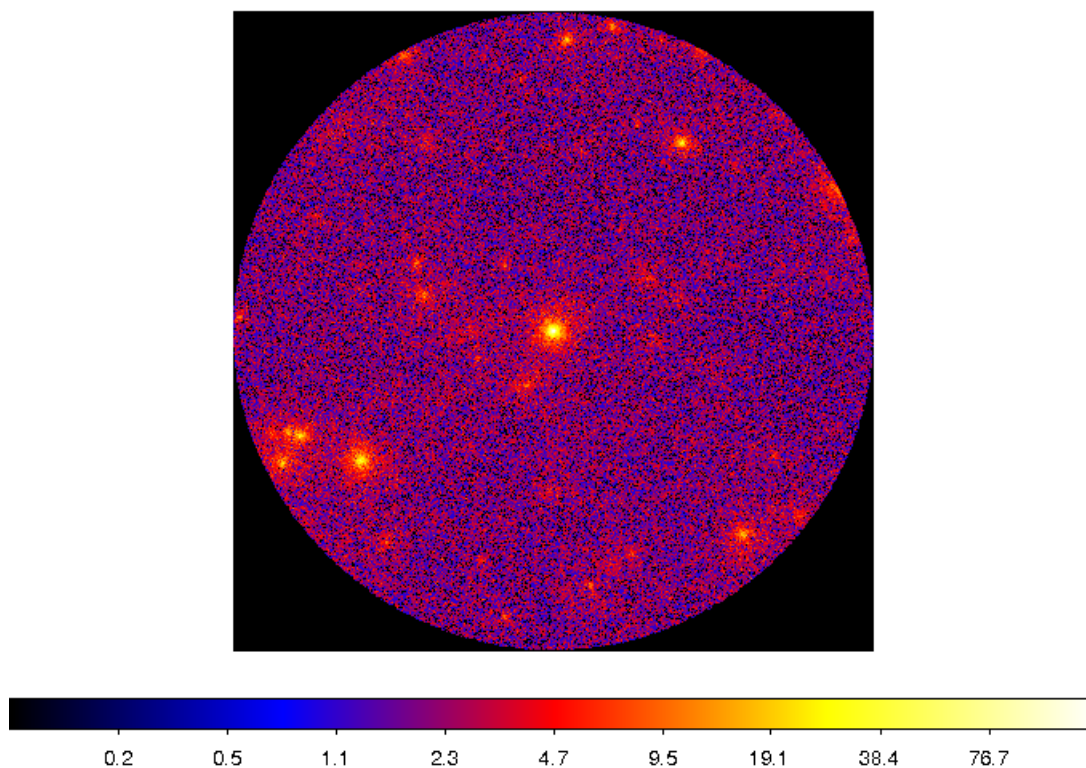
Obrázek: Fotometrie zjasnění v listopadu 2010 – binning 8 hodin.



Obrázek: Fotometrie zjasnění v listopadu 2010 – binning 4 hodiny.

4.3 Mrk 421

Blazar v souhvězdí Velké Medvědice. Jeho název ve fermi katalogu je J1104.4+3812. Je zajímavý tím, že je to jeden z nejbližších AGN (rudý posuv pouze 0.03). To se projeví i na parametrech spektra jak uvidíte později.



Obrázek: Count mapa zkoumané oblasti přes celou expozici (cca dva a půl roku) s blazarem Mrk 421 přesně ve středu snímku. Úhlový poloměr zkoumané výseče je opět 20° .

4.3.1 Porovnání modelů a výsledné spektrum

Stejně jako v předchozím případě jsem nejdříve musel najít vhodný model pro spektrum mého objektu. Porovnáním residuí na grafu CTS modelů a především TS hodnot zkoumaného objektu pro různý typ spektra mi vyšel jako nejlepší model jednoduché power law. Zdůvodnění je zřejmé – jelikož je tento objekt velmi blízko, tak se u něj prakticky neprojevuje zeslabení vysokoenergetické složky spektra vlivem EBL. Dokazují to i výsledky analýz při použití jiných modelů. Jednak

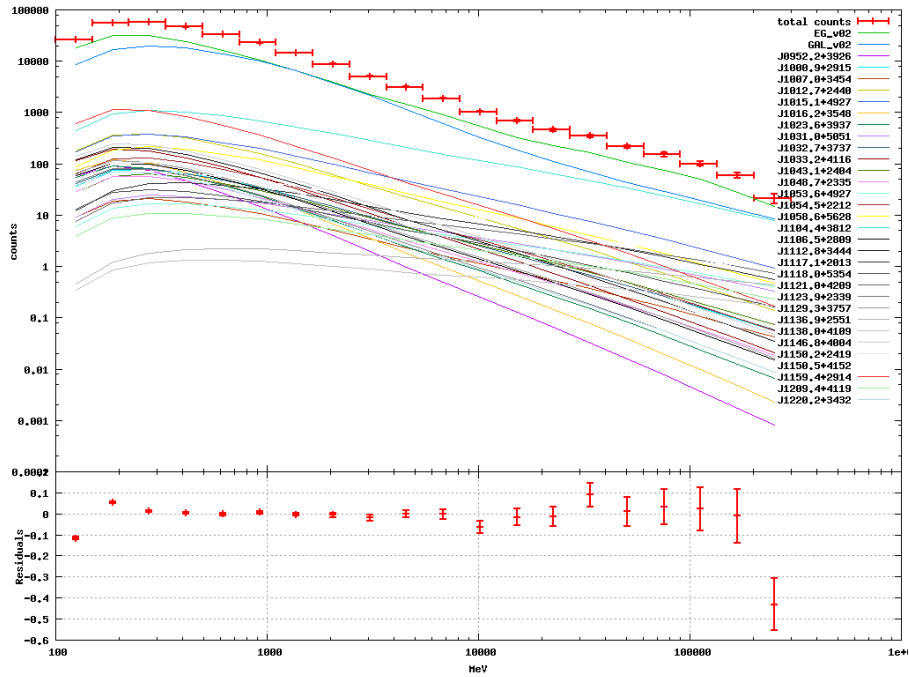
tím, že jejich TS je jen nepatrně nižší než u modelu s jednoduchým power law, a potom taky tím, že u modelu *power law with exponential cutoff* vyjde nástup cutoff (parametr p_1) na hodnotu 300 GeV. To je ale zároveň horní hranice spektrálního intervalu na kterém jsem prováděl analýzu. Potvrzuje to tak moje zdůvodnění proč není zeslabení spektra pozorovatelné. Všimněte si také, že absolutní velikost TS je o řád nižší než u 3C 454.3 – to je způsobeno tím, že Mrk 421 je na mnou zkoumaném spektrálním intervalu mnohem slabší. To je vidět i srovnáním integrálních toků, jakožto výsledku analýzy.

Model spektra	TS
simple power law	22070.2
broken power law	22069.8
power law with exponential cutoff	22061.3

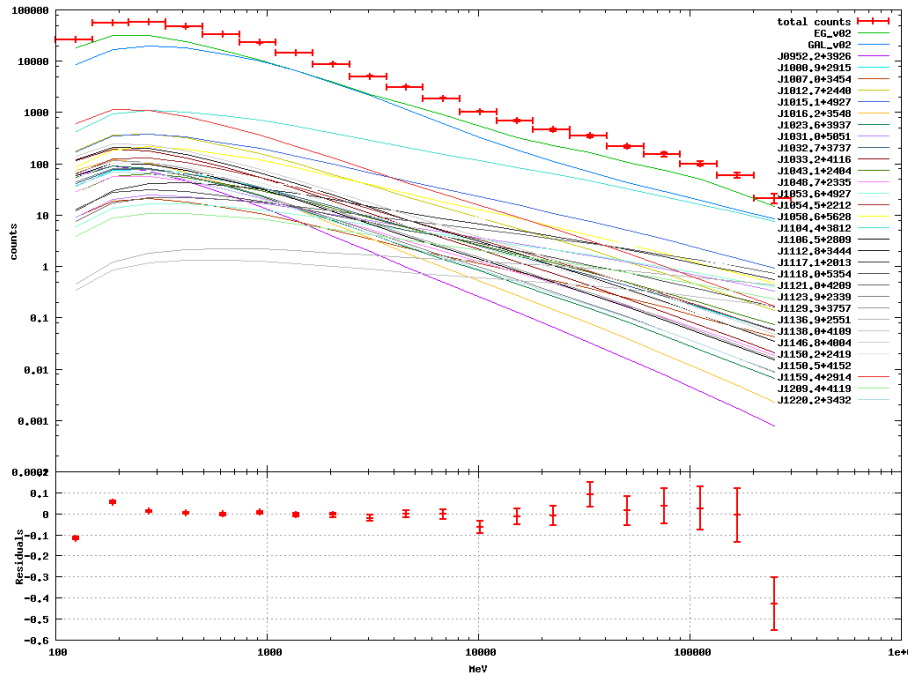
Tabulka 4.4: Porovnání modelů spektra pro blazar Mrk 421.

Parametr spektra	Hodnota
N_0	$(1.443 \pm 0.007) \times 10^{-9} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
γ	-1.809 ± 0.002
Flux (0.1 – 300 GeV)	$(1.785 \pm 0.009) \times 10^{-7} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

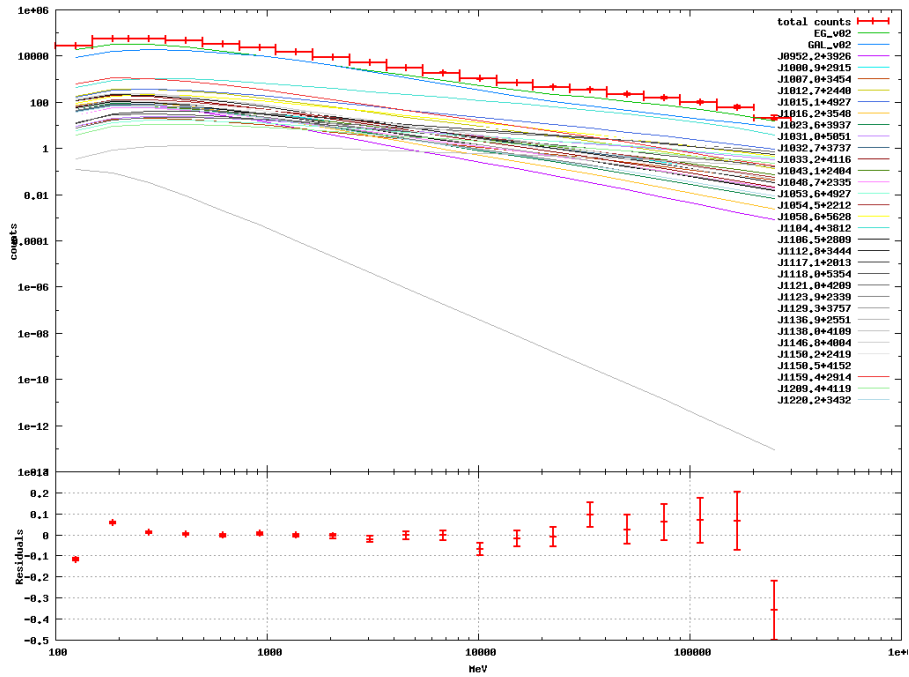
Tabulka 4.5: Výsledné parametry spektra pro blazar Mrk 421. Co znamenají jednotlivé parametry bylo vysvětleno v podsekcí 2.2.7.



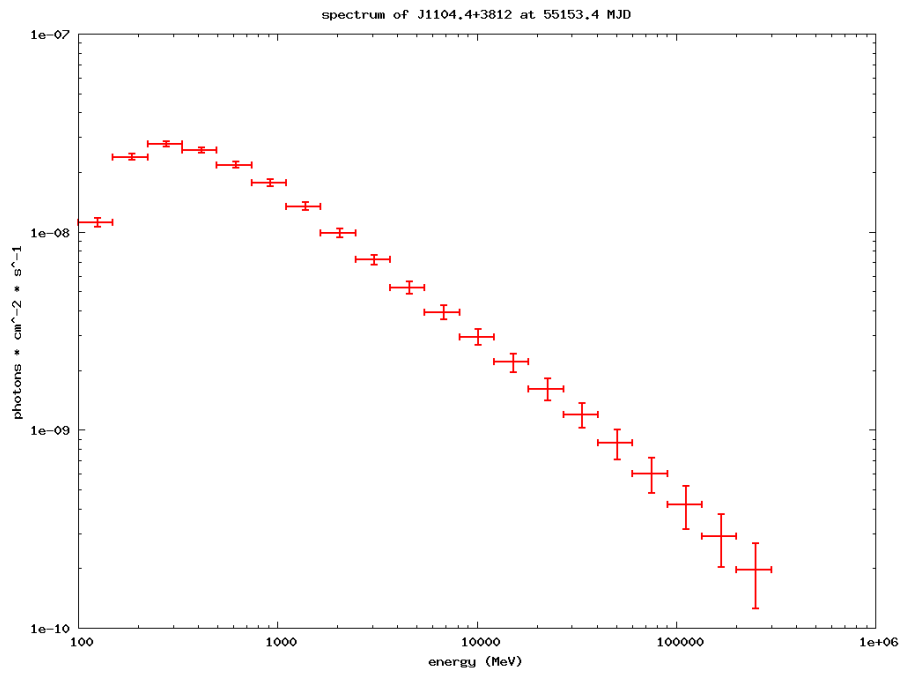
Obrázek: Graf CTS modelů pro model spektra *simple power law*.



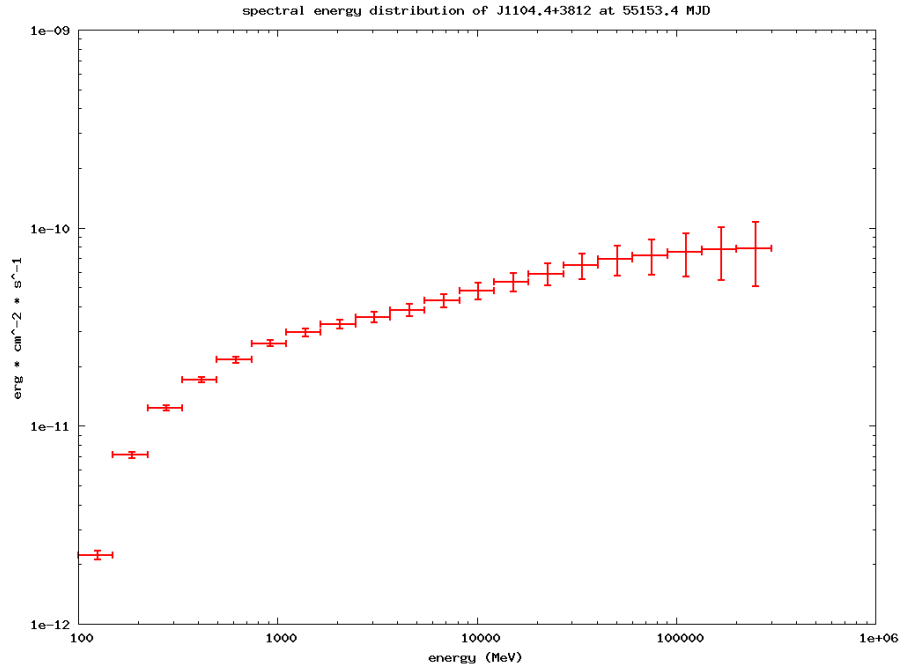
Obrázek: Graf CTS modelů pro model spektra *broken power law*.



Obrázek: Graf CTS modelů pro model *power law with exponential cutoff*.



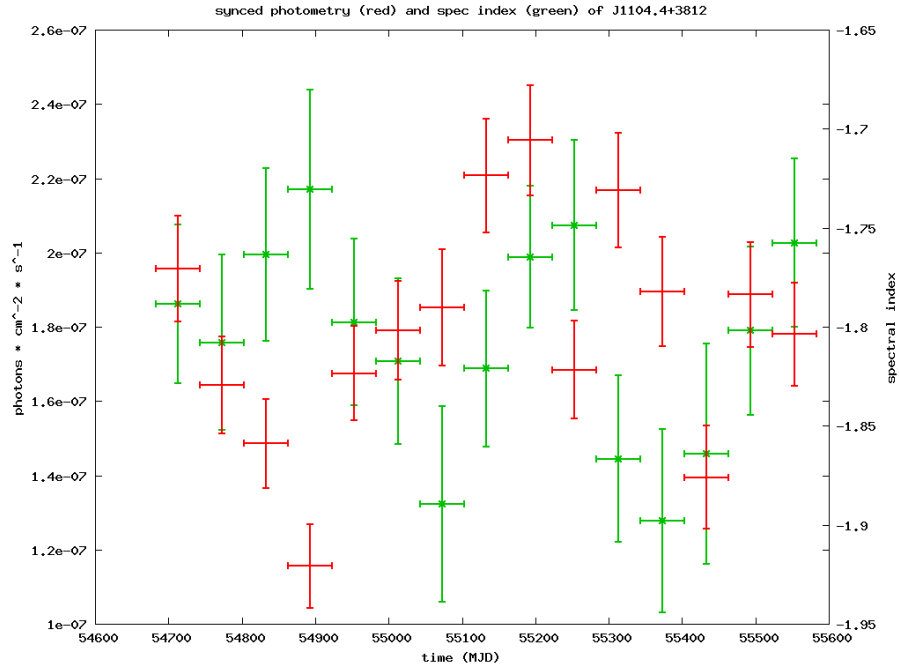
Obrázek: Graf výsledného spektra pro model *simple power law*.



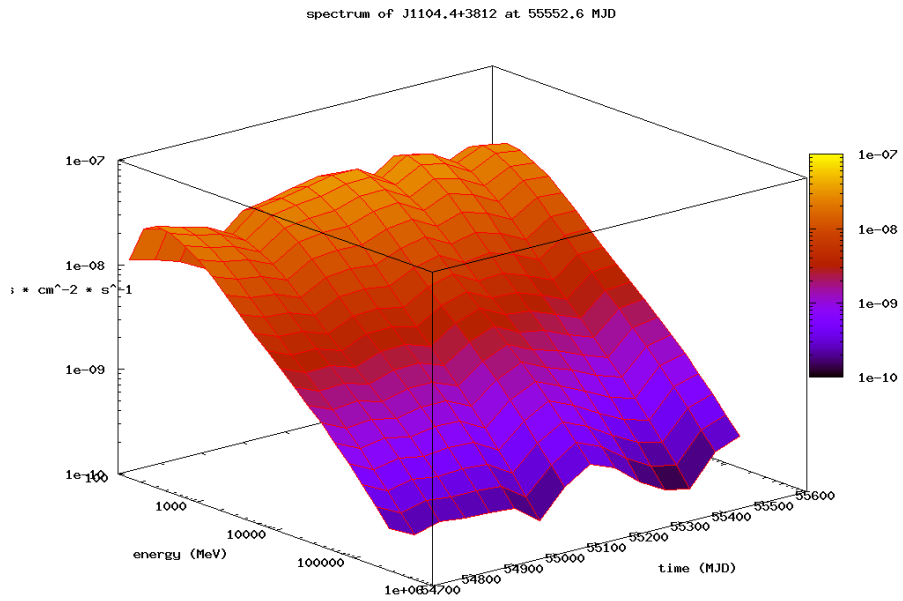
Obrázek: Graf výsledné SED pro model *simple power law*.

4.3.2 Časová analýza

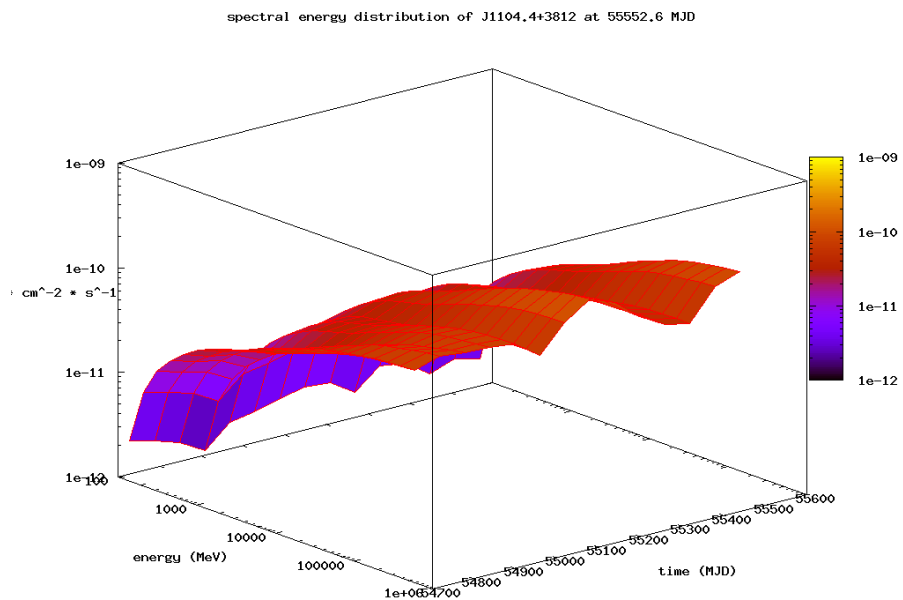
Postupuji stejně jako v předchozím případě u objektu 3C 454.3. Bohužel Mrk 421 je mnohem slabší objekt než 3C 454.3. Proto se ani zdaleka nedostanu na tak vysoké časové rozlišení jako v předchozím případě, kdy jsem udělal analýzu dokonce s binningem pouhé 4 hodiny. U Mrk 421 jsem tedy udělal analýzu s binningem 30 dní. Již při tomto rozlišení však byly chybové úsečky u fotometrie i spektrálního indexu velmi velké. Proto jsem byl nucen udělat i analýzu s 60-denním binningem, kde je závislost spektrálního indexu na čase o poznání přehlednější.



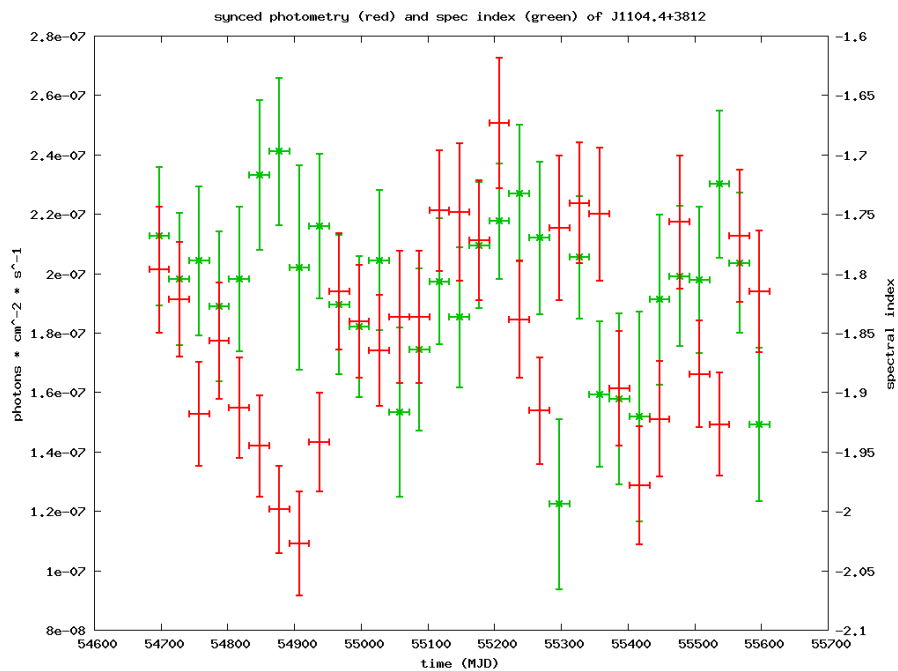
Obrázek: Binning 60 dní – fotometrie (červ.) a závislost spek. ind. na čase (zel.).



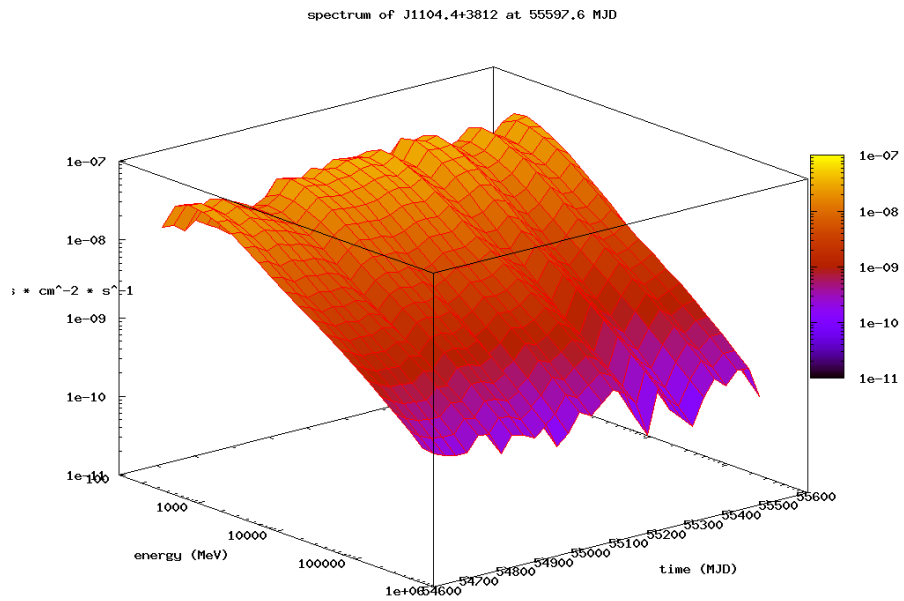
Obrázek: Binning 60 dní – závislost fotonového spektra na čase.



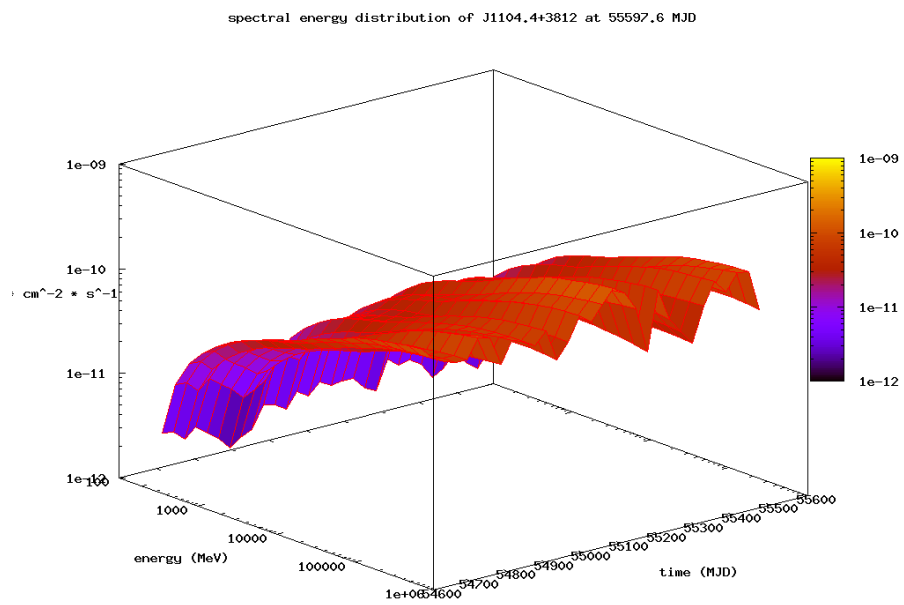
Obrázek: Binning 60 dní – závislost hustoty spektrální energie na čase.



Obrázek: Binning 30 dní – fotometrie (červ.) a závislost spek. ind. na čase (zel.).



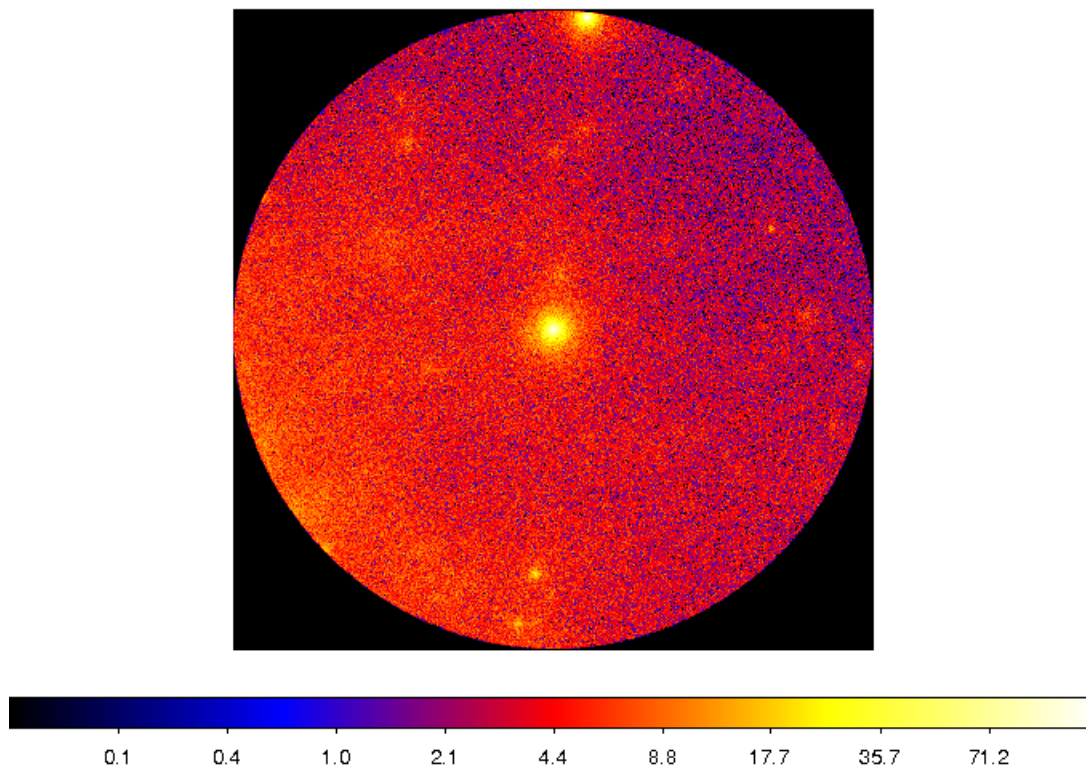
Obrázek: Binning 30 dní – závislost fotonového spektra na čase.



Obrázek: Binning 30 dní – závislost hustoty spektrální energie na čase.

4.4 QSO J1512-0906

Jedná se o quasar. Jeho název ve fermi katalogu je J1512.8-0906. V níže přiložené count mapě ze surových dat si povšimněte znatelného gradientu difusního zdroje. Jedná se o galaktické pozadí. Přestože jsem schopen toto pozadí odečíst pomocí modelu, má jeho přítomnost negativní dopad na výpočetní náročnost a také i trochu na přesnost (odečet není stoprocentní).



Obrázek: Count mapa zkoumané oblasti přes celou expozici (cca 2 a půl roku) s quasarem QSO J1512-0906 přesně ve středu snímku. Úhlový poloměr zkoumané výšece je opět 20° .

4.4.1 Porovnání modelů a výsledné spektrum

Stejně jako v předchozím případě jsem nejdříve musel najít vhodný model pro spektrum mého objektu. Porovnáním residuí na grafu CTS modelů a především TS hodnot zkoumaného objektu pro různý typ spektra mi vyšel jako nejlepší model

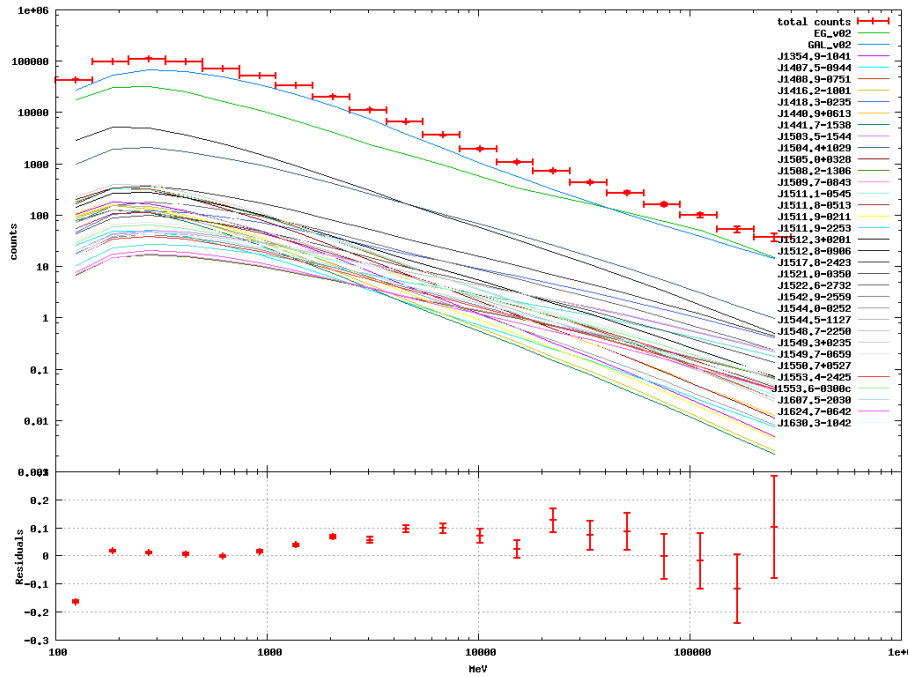
power law with exponential cutoff. Stejně jako u 3c 454.3 je to zřejmě způsobeno vyšším rudým posuvem a tedy vzdáleností objektu, na které se již projevuje zeslabení vysokoenergetické části spektra vlivem EBL.

Model spektra	TS
simple power law	40961
broken power law	41126.9
power law with exponential cutoff	41129

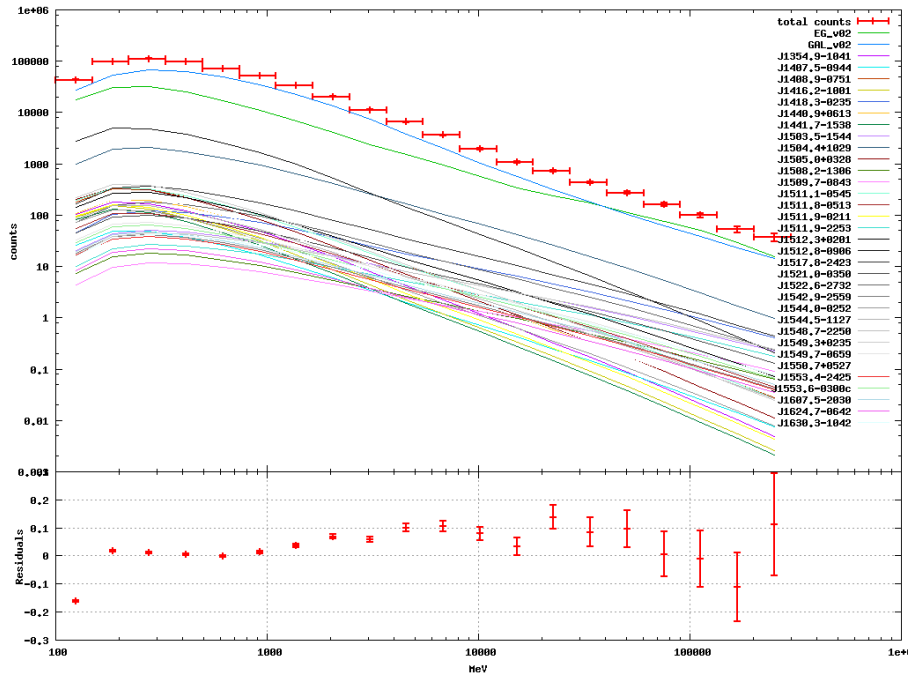
Tabulka 4.6: Porovnání modelů spektra pro quasar QSO J1512-0906.

Parametr spektra	Hodnota
N_0	$(12.6 \pm 1.1) \times 10^{-9} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
γ	-2.379 ± 0.019
E_b	$(9 \pm 2464) \text{ MeV}$
p_1	$(22.7 \pm 3.8) \text{ GeV}$
Flux (0.1 – 300 GeV)	$(9.08 \pm 0.12) \times 10^{-7} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

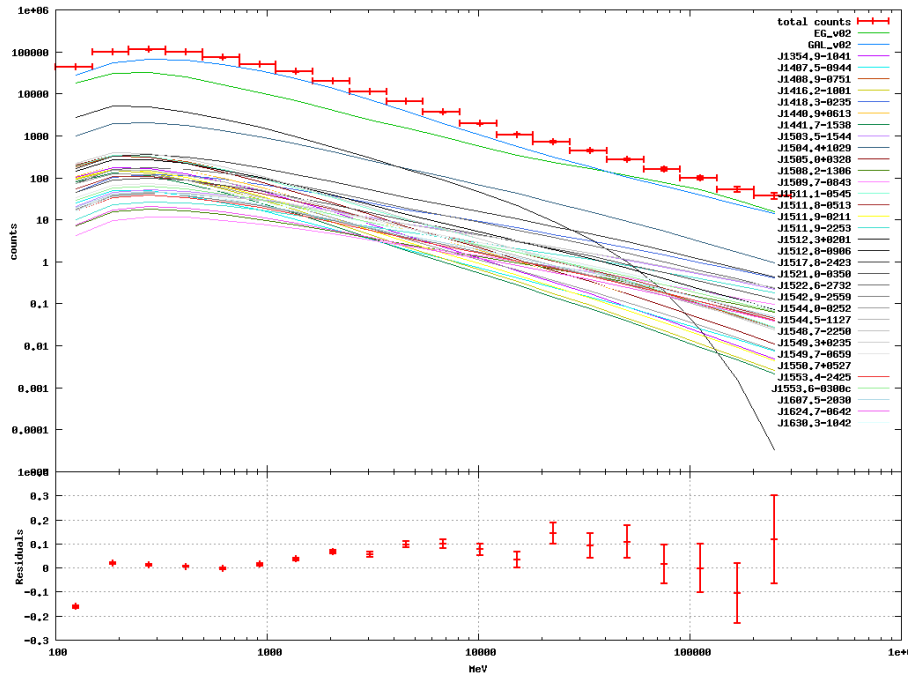
Tabulka 4.7: Výsledné parametry spektra pro quasar QSO J1512-0906. Co znamenají jednotlivé parametry bylo vysvětleno v podsekcí 2.2.7.



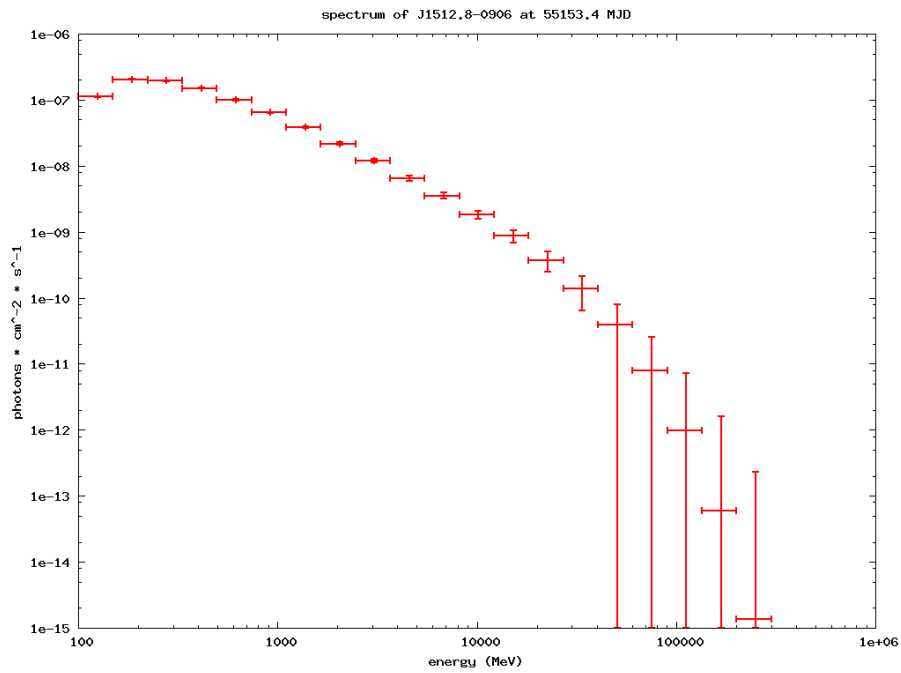
Obrázek: Graf CTS modelů pro model spektra *simple power law*.



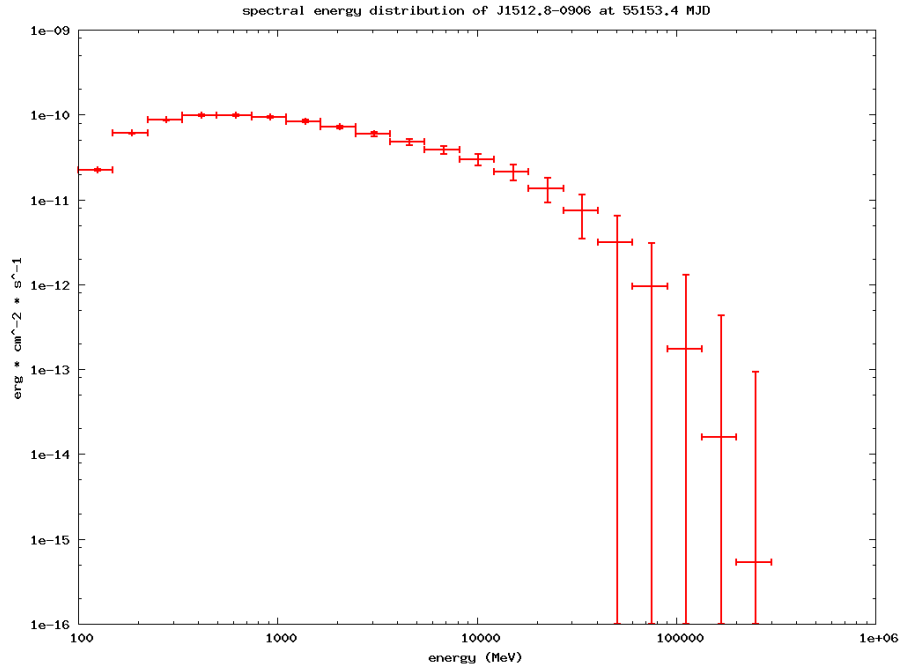
Obrázek: Graf CTS modelů pro model spektra *broken power law*.



Obrázek: Graf CTS modelů pro model *power law with exponential cutoff*.



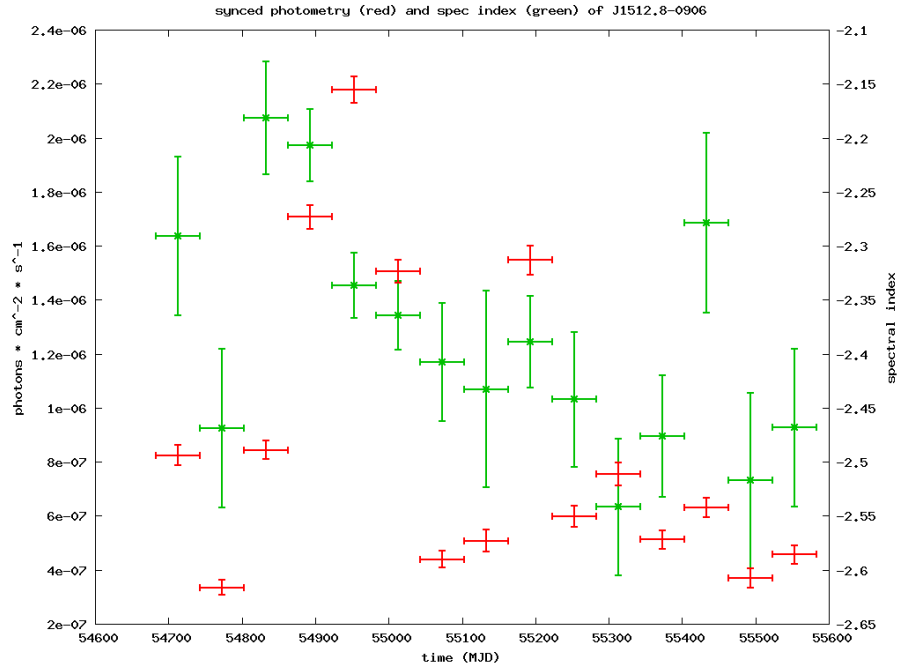
Obrázek: Graf výsledného spektra pro model *power law with exponential cutoff*.



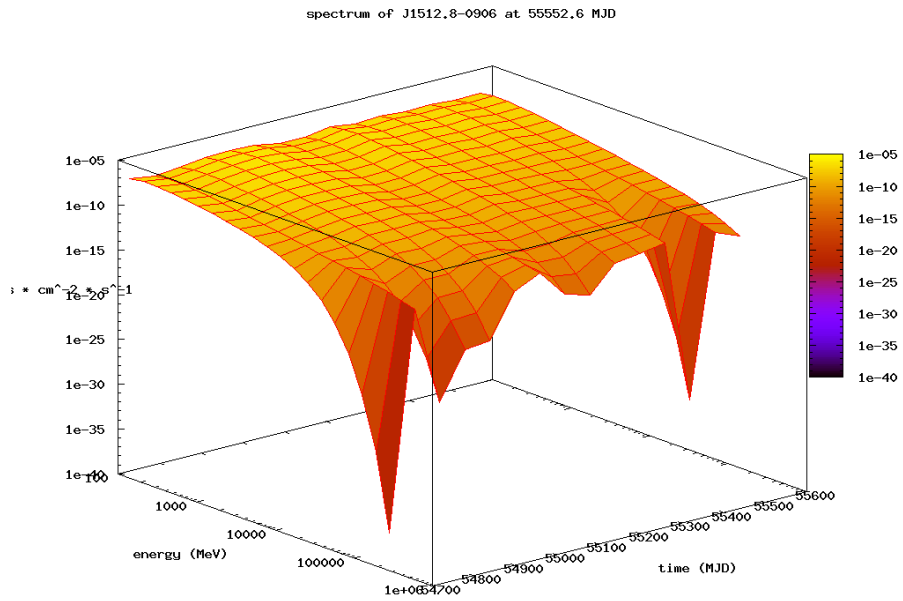
Obrázek: Graf výsledné SED pro model *power law with exponential cutoff*.

4.4.2 Časová analýza

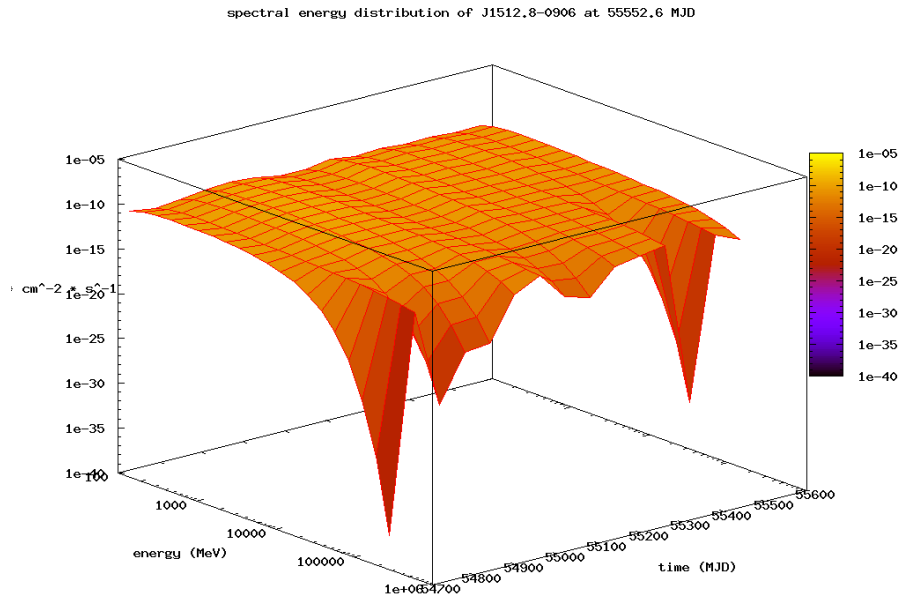
Pro analýzu s 60-ti denním binningem zde přikládám veškeré výsledky analýzy — tj. z Korelovanou závislost spektrálního indexu a fotometrie na čase, trojrozměrný graf vývoje spektra v čase a trojrozměrný obrázek vývoje SED v čase. Pro nižší časový binning již docházelo k příliš vysokému zašumění. Proto ve vyšším, 14-ti denním rozlišení, přikládám pouze fotometrii, která je mnohem méně náchylná na nedostatek dat v jednotlivých bincích.



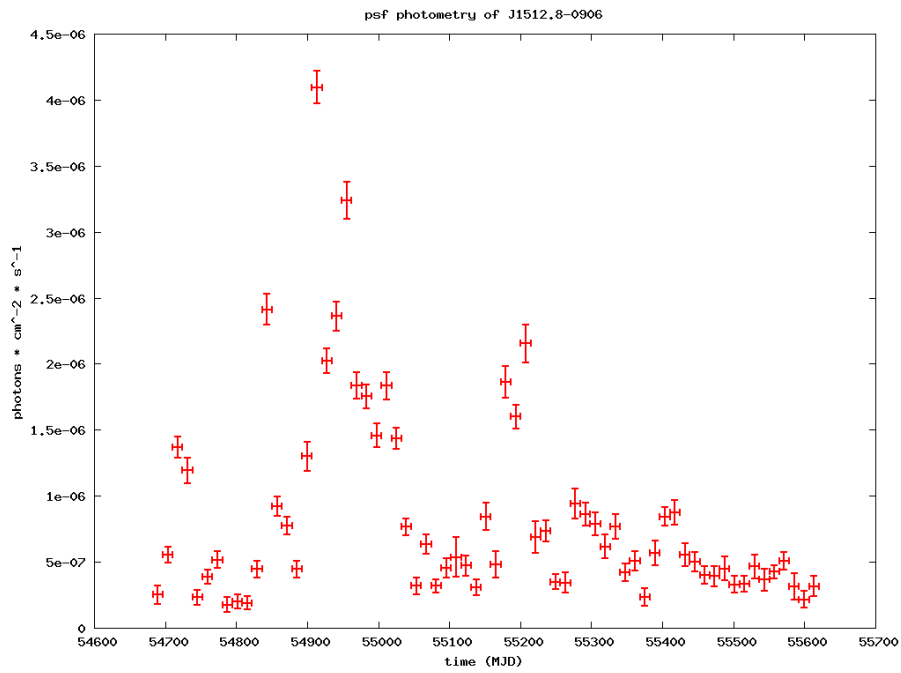
Obrázek: Binning 60 dní – fotometrie (červ.) a závislost spek. ind. na čase (zel.).



Obrázek: Binning 60 dní – závislost fotonového spektra na čase.



Obrázek: Binning 60 dní – závislost hustoty spektrální energie na čase.

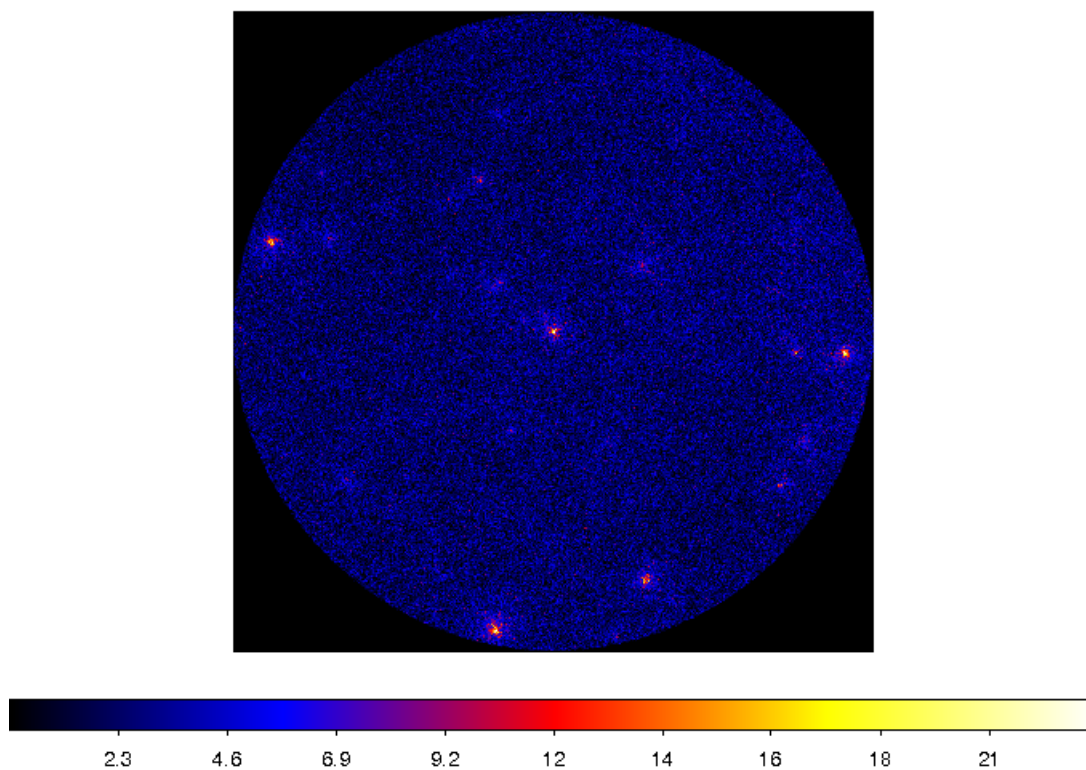


Obrázek: Binning 14 dní – fotometrie.

4.5 OJ 287

Jedná se o objekt typu BL Lac v souhvězdí Raka. Jeho název ve fermi katalogu je J0854.8+2006. Tento objekt se trochu vymyká předpisu, který jsem si stanovil pro výběr objektů k analýze. Jedná se totiž o vcelku slabý objekt, na přiložené count mapě je vidět, že dokonce to není ani nejjasnější objekt na snímku.

Důvod proč jsem na OJ 287 zaměřil svou pozornost je prostý – jde o jeden z nejzajímavějších objektů vůbec. Jako jediný objekt typu AGN vykazuje jistou periodicitu ve fotometrii (s periodou 11 – 12 let). Podle teoretických modelů [11] se jedná o binární systém tvořený supermasivní černou dírou o hmotnosti 18 miliard slunečních hmot (což je mimochodem nejhmotnější známá černá díra) kolem které obíhá další černá díra s hmotností 100 milionů slunečních hmot. Dvojice zjasnění je pravděpodobně způsobena přechodem menší černé díry přes rovinu akrečního disku větší černé díry.



Obrázek: Count mapa zkoumané oblasti přes celou expozici (cca dva a půl roku) s OJ 287 přesně ve středu snímku. Úhlový poloměr zkoumané výseče je opět 20° .

4.5.1 Porovnání modelů a výsledné spektrum

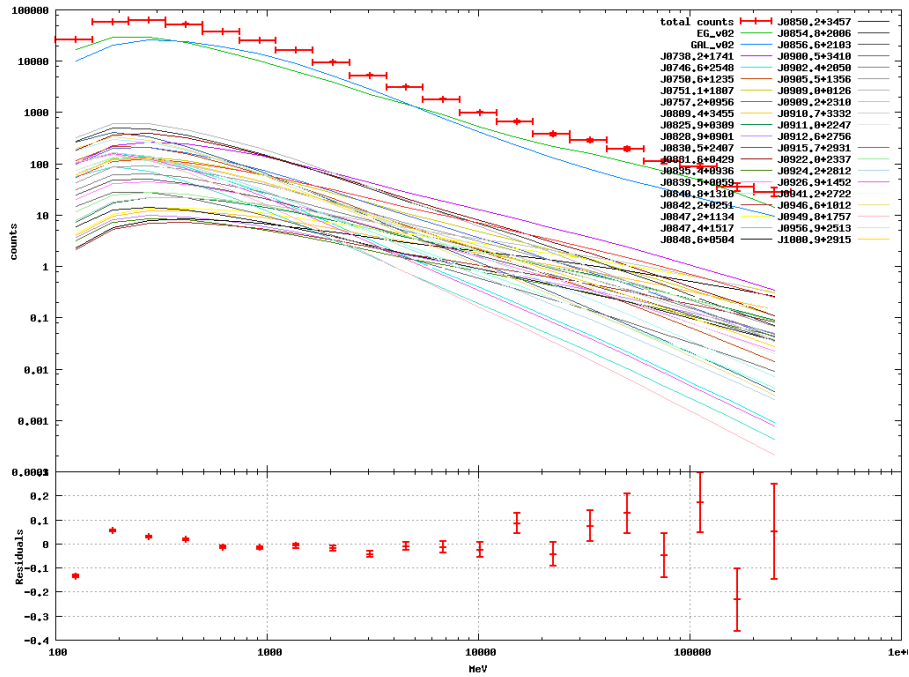
Stějně jako v předchozím případě jsem nejdříve musel najít vhodný model pro spektrum mého objektu. Porovnáním residuí na grafu CTS modelů a především TS hodnot zkoumaného objektu pro různý typ spektra mi vyšel jako nejlepší model *broken power law*. Z pohledu na srovnání TS hodnot pro jednotlivé modely je ale zřejmé, že od jednoduchého power law se liší jen zanedbatelně (to je patrné i z grafu spektra). Všimněte si také, že co do absolutní velikosti jsou hodnoty TS ve srovnání s ostatními zkoumanými objekty velmi nízké. To potvrzuje moji úvodní zmínku o slabé jasnosti OJ 287.

Model spektra	TS
simple power law	1647.41
broken power law	1648.28
power law with exponential cutoff	1643.97

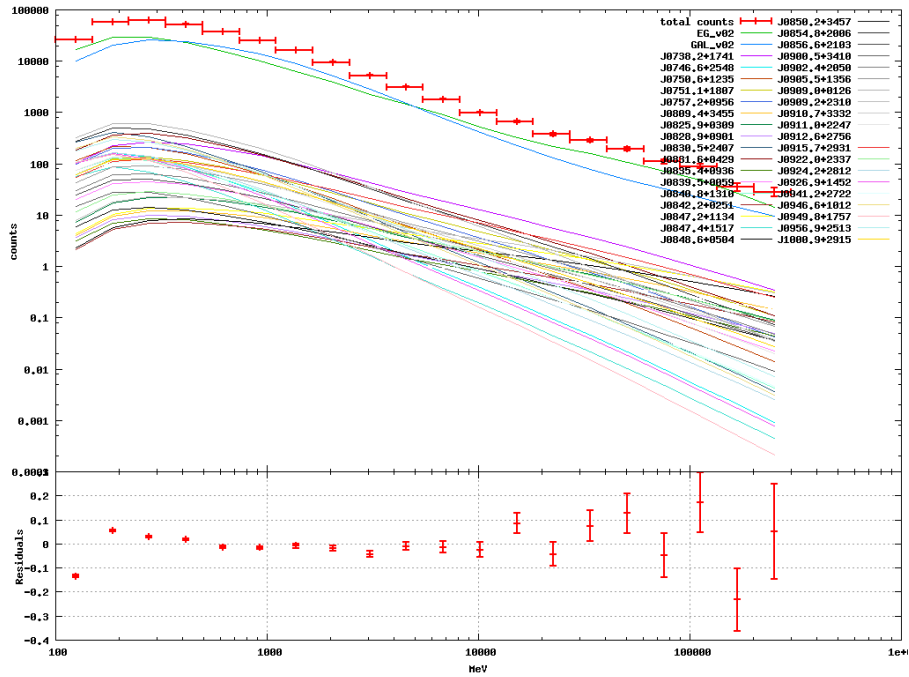
Tabulka 4.8: Porovnání modelů spektra pro OJ 287.

Parametr spektra	Hodnota
N_0	$(0.0062 \pm 0.0028) \times 10^{-9} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
γ_1	-2.394 ± 0.067
γ_2	-2.373 ± 0.073
E_b	$(900 \pm 170) \text{ MeV}$
Flux (0.1 – 300 GeV)	$(8.68 \pm 0.60) \times 10^{-8} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

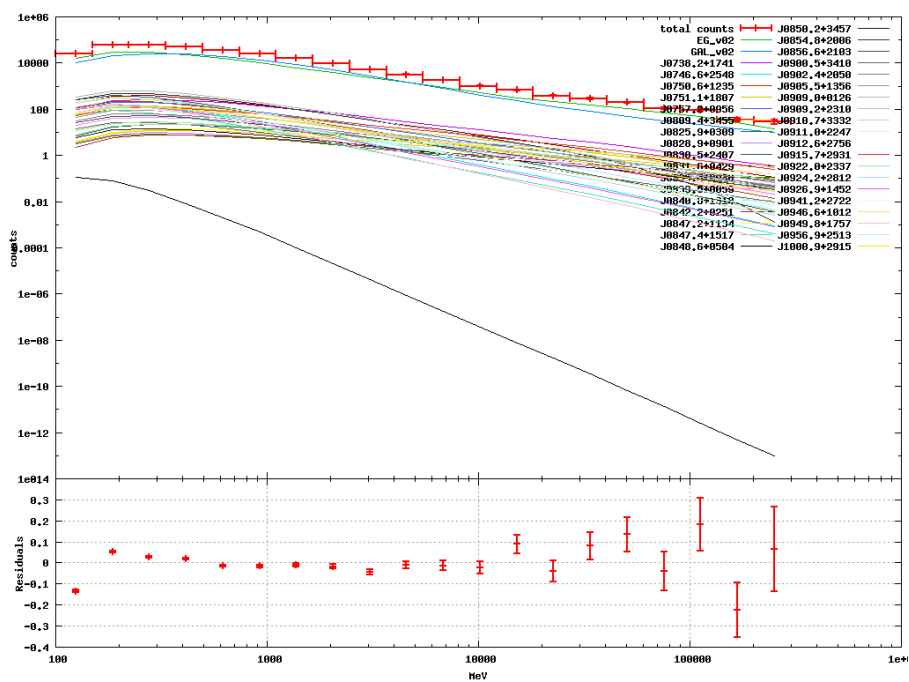
Tabulka 4.9: Výsledné parametry spektra pro OJ 287. Co znamenají jednotlivé parametry bylo vysvětleno v podsekcí 2.2.7.



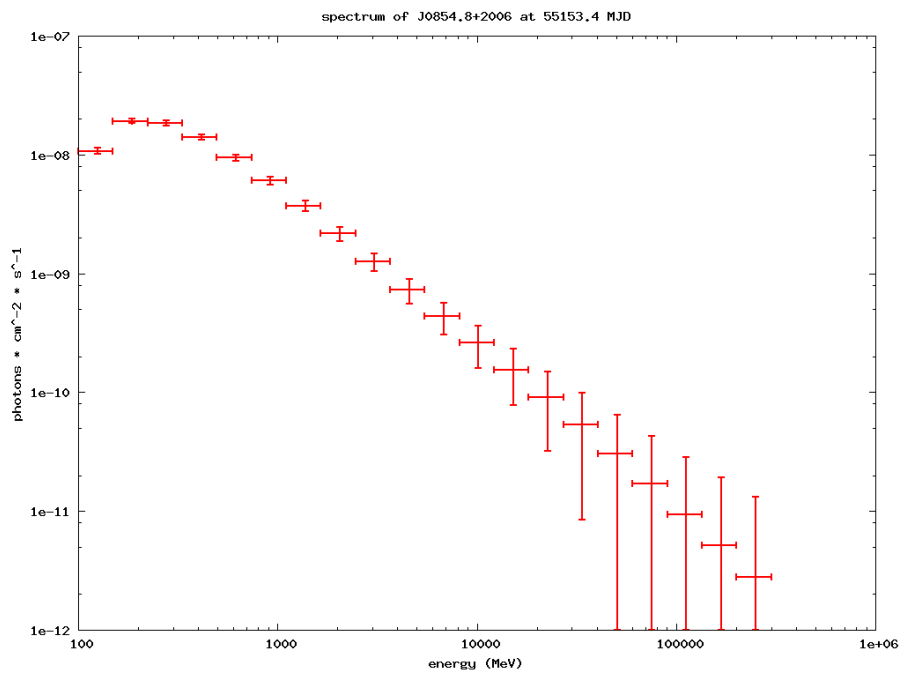
Obrázek: Graf CTS modelů pro model spektra *simple power law*.



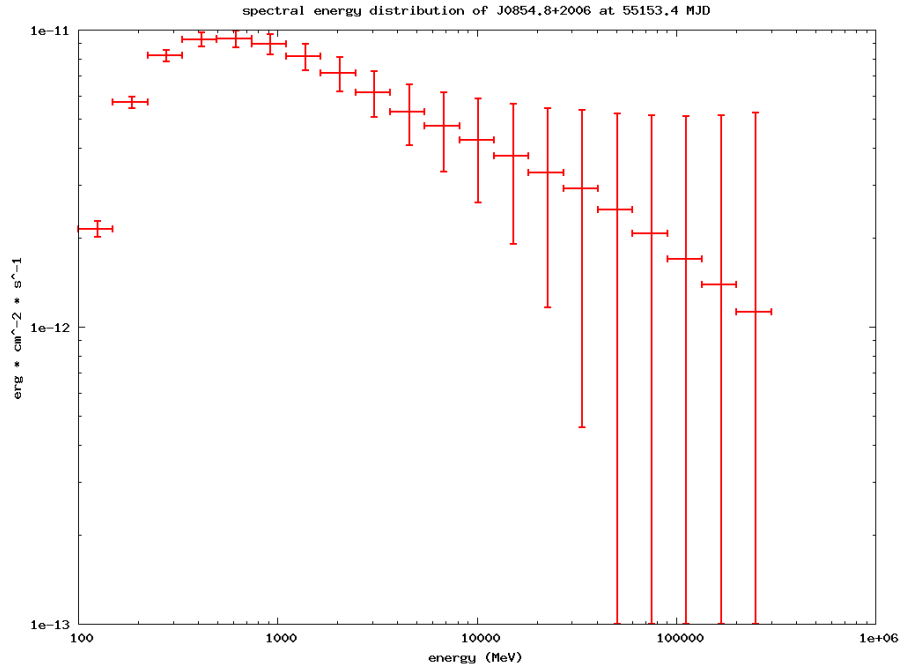
Obrázek: Graf CTS modelů pro model spektra *broken power law*.



Obrázek: Graf CTS modelů pro model *power law with exponential cutoff*.



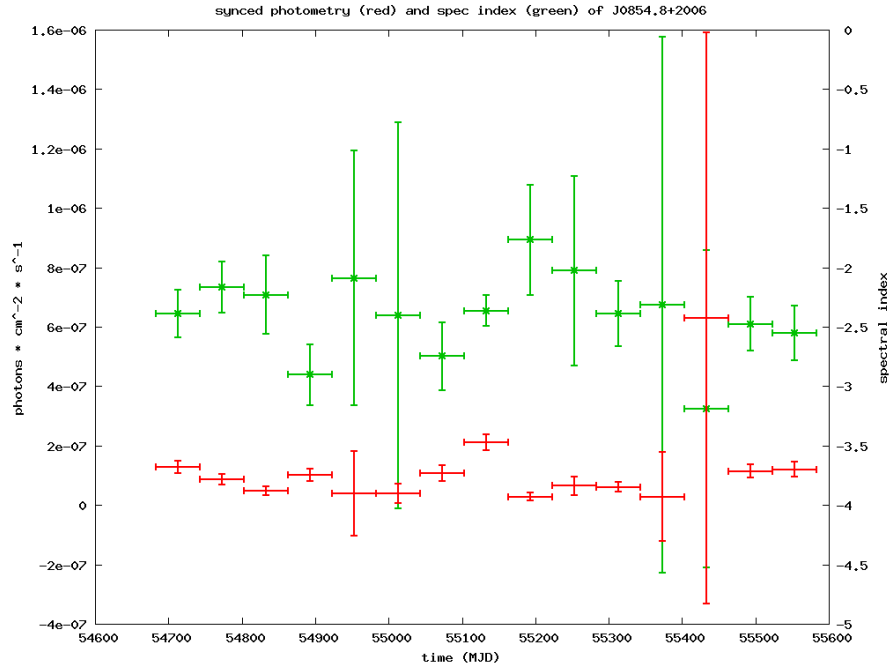
Obrázek: Graf výsledného spektra pro model *broken power law*.



Obrázek: Graf výsledné SED pro model *broken power law*.

4.5.2 Časová analýza

O časové analýzy jsem si mnoho nesliboval. Vzhledem k tomu, jak slabý je OJ 287 objekt, dalo se předpokládat že v jednotlivých časových bincích bude nedostatek dat. Příkládám pouze graf závislosti fotometrie a spektrálního indexu na čase. Výsledek je lepší než jsem čekal. Na grafu fotometrie je vidět zřetelné zjasnění okolo MJD data 55100 (bylo by to lépe názorné při úpravě měřítka osy y). Graf také zobrazuje velmi pěkně trendující hodnotu spektrálního index, zvláště pokud si odmyslíme čtyři nejhorší úsečky grafu s největší chybou.



Obrázek: Binning 60 dní – fotometrie (červ.) a závislost spek. ind. na čase (zel.).

Kapitola 5

Závěr

5.1 Diskuze výsledků

Největším úspěchem byla především analýza zjasnění quasaru 3C 454.3. Tuto významnou událost na poli astrofyziky jsem navíc dokázal postupným zlepšováním svých metod prozkoumat s nevídaným časovým rozlišením.

U blazaru Mrk 421 zase velmi zajímavé výsledky dává graf závislosti fotometrie a spektrálního indexu na čase. V první polovině zkoumaného časového intervalu se spektrální index vyvíjí inverzně oproti jasnosti v závislosti na čase. To znamená, že když klesá jasnost, tak zdroj se stává spektrálně tvrdším a naopak. Avšak v druhé polovině časového intervalu se závislost obrátí a chová se přesně opačně, tedy že spektrální index koreluje s fotometrií.

Velmi zajímavá je také porovnání spektrálního indexu a fotometrie u objektu OJ 287. Vzhledem k tomu, že tento objekt je již sám osobě velmi zajímavý, bylo by přínosné podrobně fyzikálněji rozebrat výsledky analýzy.

5.2 Přínos práce

Hlavním přínosem práce je bezpochyby vytvoření velmi silného automatizačního nástroje na zpracování dat z družice Fermi. Můj skript dokáže zredukovat několikahodinovou tvorbu modelu a vytváření příkazů na řádově desítky vteřin. Hlavní podíl na tom má přímé načítání všech potřebných parametrů analýzy ze samotných dat, schopnost pracovat s proměnným počtem parametrů a především automatická tvorba modelu na základě přístupu do Fermi katalogu.

Dalším přínosem je můj návrh časové analýzy, kterou standardní nástroje Sci-tools vůbec neobsahují. Navíc jsem vymyslel téměř 100% účinnou paralelizaci proceduru. Velmi užitečnou věcí je také moje implementace rekurentního předávání modelů po každé iteraci. Spolu s fixováním nepotřebných spektrálních para-

metrů to přispívá k významnému zpřesnění analýzy.

Tohle všechno způsobilo, že jsem například dokázal dosáhnout velmi vysokých rozlišení při analýze zjasnění 3C 454.3. Při prohledávání databází vědeckých prací jsem nenašel práce které by měly tak přesné výsledky jako já. Naopak hodně prací trpělo chybami v důsledku použití špatných modelů pro zkoumaný objekt apod.

5.3 Budoucí možnosti

Moje práce řeší problém analýzy dat ve vysokoenergetické astrofyzice. Zároveň však daleko více otázek otevírá, nežli uzavírá. U zjasnění 3C 454.3 by bylo velmi zajímavé udělat korelaci mnou získaných dat s optickou oblastí a zkoumat jak se mění spektrální parametry quasaru při tak výrazných zjasnění. Z toho by se dal vytvořit model snažící se popsat jev ke kterému tam dochází.

Když už zmiňuju modely, bylo by například velmi zajímavé s pomocí mojí analýzy pokusit se vytvořit model vyzařování pulsarů. Aktuální velkou událostí je výrazné zjasnění pulsaru v Krabí mlhovině. Pulsar, který se zde nachází by podle všech současných modelů měl vyzařovat téměř konstantně, dokonce byl používán jako kalibrační zdroj. Toto zjasnění momentálně analyzuji mým skriptem, ale výsledky jsem bohužel nestihl přiložit do této práce. Hlavně kvůli extrémní výpočetní náročnosti a tedy trvání analýzy.

Další obrovskou výzvou je například hledání temné hmoty. S mým skriptem je možné dosahovat rychle po sobě následujících iterací při tvorbě modelu zkoumaného prostoru. Prakticky jediným omezením je výpočetní náročnost. A přesný model zkoumané oblasti je naprosto zásadní prvek při pokusech o prokazování existence temné hmoty. Následně by tedy stačilo přidat do mnou vytvořeného modelu oblasti například model čáry odpovídající anihilační energii WIMP částic dle standardního modelu a pak už jenom zhodnotit výslednou statistiku (TS hodnoty) a residua na grafu CTS modelů. A nebo po vytvoření modelu využít test-statistických map (procedura Scitools).

Nehledě na využití při zkoumání EBL. Zde je více než jinde žádoucí analýza velkého množství quasarů a blazarů a provádění velkého množství iterací při ověřování parametrů modelů jejich spekter. Napadaly mě ale také i jiné, exotičtější možnosti uplatnění. Například s využitím mého skriptu napsat druhý obslužný skript pro dynamickou prostorovou analýzu. Jednoduše řečeno pro pohybující se objekty. A to za účelem zkoumání měsíčního povrchu, kde by teoreticky při dopádání nabitých slunečních částic na jeho povrch mělo docházet k rozpadu neutrálních pionů a tvorbě párů gamma fotonů, které by snad bylo možné detekovat.

Vytvořil jsem tedy framework s kterým je možné dále pracovat a dosahovat zajímavých výsledků.

Příloha A

Zdrojový kód skriptu

```
1  #!/bin/bash
2
3  ###user input
4
5  timebin=0      #velikost casoveho binu (v sekundach)
6  estartinput=0 #zacatek zkoumaneho spektr intervalu v MeV (0=automaticke
   nacteni z dat)
7  estopinput=0  #konec zkoumaneho spektr intervalu v MeV (0=automaticke
   nacteni z dat)
8  ebin=20       #pocet energiovych binu
9
10 modelswitch=0 #vytvorit model nebo provest analyzu? (0=analyza 1=model)
11 energy=0     #prahovy total flux objektu pro tvorbu modelu
12
13 iterswitch=0  #provest vicenasobne iterace? (0=ne 1=ano)
14 iter=5       #pocet iteraci s variabilnimy modely (1 az x)
15 cores=1     #paralelizace (1 az x)
16
17 ###user input end
18
19
20 ###advanced user input
21 if [ $modelswitch -eq 1 ]; then
22 objlistswitch=1 #ma se vytvorit objectlist (0=ne 1=ano)
23 else
24 objlistswitch=0
25 fi
26 stackswitch=0  #ma se provest vedecka analyza (0=ne 1=ano)
27 sciswitch=0    #ma se provest pouze gtlike (0=ne 1=ano)
28 ###advanced user input end
29
```

```

30
31 ###enviroment
32
33 GENWAY='pwd'
34 DATA=$GENWAY/data
35 CATL=$GENWAY/catl
36 STACK=$GENWAY/stack
37 CACHE=$GENWAY/cache
38 GTRES=$GENWAY/gtres
39 TABRES=$GENWAY/tabres
40 PLOTRES=$GENWAY/plotres
41
42 if [ $modelswitch -eq 0 ]; then
43 mkdir $GENWAY/stack
44 mkdir $GENWAY/cache
45 mkdir $GENWAY/gtres
46 mkdir $GENWAY/tabres
47 mkdir $GENWAY/plotres
48 mkdir $GENWAY/plotres/3dspec
49 mkdir $GENWAY/plotres/ctsmoels
50 mkdir $GENWAY/plotres/index
51 mkdir $GENWAY/plotres/photometry
52 mkdir $GENWAY/plotres/prefactor
53 mkdir $GENWAY/plotres/spectra
54 mkdir $GENWAY/plotres/sed
55 mkdir $GENWAY/plotres/3dsed
56 mkdir $GENWAY/plotres/kombajn
57 fi
58
59 ###getting parameters
60
61 gtvcut suppress_gtis=yes infile='ls $DATA/*_PH00.fits' table=EVENTS >
    $GENWAY/buffer
62
63 ractr='awk 'BEGIN { FS="(" }; /DSVAL2/ { print $2 }' $GENWAY/buffer | awk
    'BEGIN { FS="," } ; { print $1 }''
64 dectr='awk 'BEGIN { FS="(" }; /DSVAL2/ { print $2 }' $GENWAY/buffer | awk
    'BEGIN { FS="," } ; { print $2 }''
65 radius='awk 'BEGIN { FS="(" }; /DSVAL2/ { print $2 }' $GENWAY/buffer |
    awk 'BEGIN { FS="," } ; { print $3 }' | awk '{ gsub(/\ /, ""); print
    $0 }''
66 tstart='awk 'BEGIN { FS=":" } ; /DSVAL3/ { print $2 }' $GENWAY/buffer |
    awk '{ gsub(/\ /, ""); print $0 }''
67 tstop='awk 'BEGIN { FS=":" } ; /DSVAL3/ { print $3 }' $GENWAY/buffer'
68 estartcut='awk 'BEGIN { FS=":" } ; /DSVAL4/ { print $2 }' $GENWAY/buffer |
    awk '{ gsub(/\ /, ""); print $0 }''

```

```

69 estopcut='awk 'BEGIN { FS=":" }; /DSVAL4/ { print $3 }' $GENWAY/buffer'
70 if [ $timebin -eq 0 ]; then
71     tbin='expr $tstop \- $tstart'
72 else
73     tbin=$timebin
74 fi
75
76 if [ $startinput -eq 0 ]; then
77     estart=$startcut
78 else
79     estart=$startinput
80 fi
81
82 if [ $stopinput -eq 0 ]; then
83     estop=$stopcut
84 else
85     estop=$stopinput
86 fi
87
88 ###model construction
89
90 if [ $objlistswitch -eq 1 ]; then
91 ftlist "$CATL/gll_psc_v02.fit[1][sqrt((RA - $ractr)**2+(DEC - $dectr)**2)
92     < $radius && (Flux100_300 + Flux300_1000 + Flux1000_3000 +
93     Flux3000_10000 + Flux10000_100000) > $energy]" T columns="Source_Name
94     ,RA,DEC,Spectral_Index" | tail -n +4 > $GENWAY/objectlist
95 fi
96
97 objlist='awk '{ print $1 }' $GENWAY/objectlist'
98 objnums='awk '{ print $1 }' $GENWAY/objectlist | tail -n 1'
99 objnames='awk '{ print $3 }' $GENWAY/objectlist'
100 objnames1='echo $objnames | awk '{ gsub(/\ /,"," ); print $0 }''
101
102 if [ $modelswitch -eq 1 ]; then
103 echo "<?xml version=\"1.0\" ?>"
104 <source_library title=\"source library\">
105 <source name=\"EG_v02\" type=\"DiffuseSource\">
106 <spectrum file=\"$CATL/isotropic_iem_v02.txt\" type=\"FileFunction\">
107 <parameter free=\"1\" max=\"1000\" min=\"1e-05\" name=\"Normalization\"
108     scale=\"1\" value=\"1\" />
109 </spectrum>
110 <spatialModel type=\"ConstantValue\">
111 <parameter free=\"0\" max=\"10.0\" min=\"0.0\" name=\"Value\" scale=\"
112     1.0\" value=\"1.0\"/>
113 </spatialModel>
114 </source>

```

```

110
111 <source name="GAL_v02" type="DiffuseSource">
112 <!-- diffuse source units are cm^-2 s^-1 MeV^-1 sr^-1 -->
113 <spectrum type="ConstantValue">
114 <parameter free="1" max="10.0" min="0.0" name="Value" scale="
115     1.0" value="1.0"/>
116 </spectrum>
117 <spatialModel file="$CATL/gll_iem_v02.fit" type="MapCubeFunction">
118 <parameter free="0" max="1000.0" min="0.001" name="Normalization"
119     scale="1.0" value="1.0"/>
120 </spatialModel>
121 </source>" > $GENWAY/model.xml
122
123 for n in `echo $objlist`; do
124     sname=`grep -E "\ $n\ " $GENWAY/objectlist | awk '{ print $3 }'`
125     sra=`grep -E "\ $n\ " $GENWAY/objectlist | awk '{ print $4 }'`
126     sde=`grep -E "\ $n\ " $GENWAY/objectlist | awk '{ print $5 }'`
127     sindex=`grep -E "\ $n\ " $GENWAY/objectlist | awk '{ print $6 }'`
128     echo "
129 <source name="$sname" type="PointSource">
130 <spectrum type="PowerLaw">
131 <parameter free="1" max="1000.0" min="0.001" name="Prefactor"
132     scale="1e-09" value="10"/>
133 <parameter free="1" max="1.0" min="-5.0" name="Index" scale="
134     1.0" value="-2.1"/>
135 <parameter free="0" max="2000.0" min="30.0" name="Scale" scale="
136     1.0" value="100.0"/>
137 </spectrum>
138 <spatialModel type="SkyDirFunction">
139 <parameter free="0" max="360" min="-360" name="RA" scale="1.0"
140     value="$sra"/>
141 <parameter free="0" max="90" min="-90" name="DEC" scale="1.0"
142     value="$sde"/>
143 </spatialModel>
144 </source>" >> $GENWAY/model.xml
145 done
146 echo "</source_library>" >> $GENWAY/model.xml
147 fi
148
149 if [ $modelswitch -eq 0 ]; then
150
151 ###data copying
152
153 cp $DATA/*_SC* $DATA/sc.fits
154 ls -d $DATA/*_PH* > $GENWAY/events
155

```

```

149 date > $GENWAY/log
150 echo "kopirovani dat hotovo" >> $GENWAY/log
151
152 ###stack construction
153
154 ntbin='expr \( $tstop \- $tstart \) \/ $tbin'
155 nlist='echo "for (i=1;i<=$ntbin;i++){print i, "\n\"}" | bc -q'
156
157 for n in `echo $nlist`; do
158     t0='expr $tstart \+ \( \( $n \- 1 \) \* $tbin \)'
159     t1='expr $tstart \+ \( $n \* $tbin \)'
160     echo "#!/bin/bash" > $STACK/${n}.sh
161     if [ $sciswitch -eq 0 ]; then
162         echo "gtselect evclsmin=3 evclsmax=4 infile=@$GENWAY/events outfile=
            $CACHE/${n}_events_filtered.fits ra=$ractr dec=$dectr rad=$radius
            tmin=$t0 tmax=$t1 emin=$estart emax=$estop zmax=105" >> $STACK/${n}
            }.sh
163         echo "gtmtime scfile=$DATA/sc.fits filter=\"DATA_QUAL==1 &&
            LAT_CONFIG==1 && ABS(ROCK_ANGLE)<52\" roicut=yes evfile=$CACHE/${n}
            }_events_filtered.fits outfile=$CACHE/${n}_events_gti.fits" >>
            $STACK/${n}.sh
164         echo "gtbin evfile=$CACHE/${n}_events_gti.fits scfile=NONE outfile=
            $GTRES/${n}_count_map.fits algorithm=CMAP nxpix=400 nypix=400
            binsz=0.1 coordsys=CEL xref=$ractr yref=$dectr axisrot=0 proj=AIT"
            >> $STACK/${n}.sh
165         echo "gtltcube evfile=$CACHE/${n}_events_gti.fits scfile=$DATA/sc.fits
            outfile=$CACHE/${n}_ltcube.fits dcostheta=0.025 binsz=1" >>
            $STACK/${n}.sh
166         echo "gtexpmap evfile=$CACHE/${n}_events_gti.fits scfile=$DATA/sc.fits
            expcube=$CACHE/${n}_ltcube.fits outfile=$CACHE/${n}_expmap.fits
            irfs=P6_V3_DIFFUSE srcrad='expr $radius \+ 10' nlong=120 nlat=120
            nenergies=$ebin" >> $STACK/${n}.sh
167     fi
168     echo "gtlike refit=no plot=no results=$GTRES/${n}_results.dat specfile
            =$GTRES/${n}_counts_spectra.fits sfile=$GTRES/${n}_output_model.
            xml irfs=P6_V3_DIFFUSE expcube=$CACHE/${n}_ltcube.fits srcmdl=
            $GENWAY/model.xml statistic=UNBINNED optimizer=NEWMINUIT evfile=
            $CACHE/${n}_events_gti.fits scfile=$DATA/sc.fits expmap=$CACHE/${n}
            }_expmap.fits" >> $STACK/${n}.sh
169 done
170
171 date >> $GENWAY/log
172 echo "vytvareni stohu hotovo" >> $GENWAY/log
173
174 ###stack execution
175

```

```

176 if [ $stackswitch -eq 1 ]; then
177 ls -d $STACK/* | xargs -L 1 -P $cores bash
178
179
180 date >> $GENWAY/log
181 echo "primarni exekeuce stohu hotova" >> $GENWAY/log
182
183
184 ###iterations
185 if [ $iterswitch -eq 1 ]; then
186 iterlist='echo "for (i=1;i<=$iter;i++){print i,\\n\\n}" | bc -q'
187
188 for x in `echo $iterlist`; do
189
190     rm $STACK/*
191     rm $GTRES/*result*
192     rm $GTRES/*spectra*
193     mv $GTRES/*_output_model.xml $GENWAY
194
195     for n in `echo $nlist`; do
196         echo "gtlike refit=no plot=no results=$GTRES/${n}_results.dat
197             specfile=$GTRES/${n}_counts_spectra.fits sfile=$GTRES/${n}
198             _output_model.xml irfs=P6_V3_DIFFUSE expcube=$CACHE/${n}
199             _lrcube.fits srcmdl=$GENWAY/${n}_output_model.xml statistic=
200             UNBINNED optimizer=NEWMINUIT evfile=$CACHE/${n}_events_gti.
201             fits scfile=$DATA/sc.fits expmap=$CACHE/${n}_expmap.fits" >>
202             $STACK/${n}.sh
203
204     done
205
206     ls -d $STACK/* | xargs -L 1 -P $cores bash
207     rm $GENWAY/*_output_model.xml
208 done
209
210 date >> $GENWAY/log
211 echo "sekundarni exekeuce stohu hotova" >> $GENWAY/log
212 fi
213 fi
214
215 ###postprocessing and plotting
216
217 for n in `echo $nlist`; do
218     t0='expr $tstart \+ \(\ \( $n \- 1 \) \* $tbin \)'
219     t1='expr $tstart \+ \(\ $n \* $tbin \)'
220     tavg='expr \(\ $t0 \+ $t1 \) \/ 2'

```

```

216 terr='expr \( $t1 \- $t0 \) \ / 2'
217 mjd='echo "scale=1; ($tavg/86400)+51910" | bc -q'
218 mjderr='echo "scale=1; ($terr/86400)" | bc -q'
219 echo "for (i=1;i<=$ebin;i++){print $mjd,\\"n\\"}" | bc -q > $GENWAY/
    buffer0
220
221 ##ctsmodely
222 ftlist "$GTRES/${n}_counts_spectra.fits[3]" T columns="E_MIN,E_MAX" |
    tail -n +4 | awk '{ print ($2+$3)/2"\t"($3-$2)/2 }' > $GENWAY/
    buffer1
223 ftlist "$GTRES/${n}_counts_spectra.fits[1]" T columns="ObsCounts,
    EG_v02,GAL_v02,$objnames1" | tail -n +4 | awk '{for(i=3;i<=NF;i++)
    t+=$i; print sqrt($2)"\t"($2-t)/t"\t"sqrt($2)/t"\t"$0; t=0}' >
    $GENWAY/buffer2
224 paste $GENWAY/buffer1 $GENWAY/buffer2 > $TABRES/${n}_cts
225
226 ##spektrum, fotometrie, spek.index, ploceni
227 for m in `echo $objnames`; do
228     mcorr='echo $m | awk '{ gsub(/\+/, "\+"); print $0 }' '
229     row='nl $GTRES/${n}_results.dat | grep -E "$mcorr" | awk '{ print
    $1 }' '
230     ind='tail -n +$row $GTRES/${n}_results.dat | awk '/Index/ { print
    $0 }' | head -n 1 | cut -d "" -f 4 | awk '{ print $1 }' '
231     inderr='tail -n +$row $GTRES/${n}_results.dat | awk '/Index/ {
    print $0 }' | head -n 1 | cut -d "" -f 4 | awk '{ print $3
    }' '
232     totflux='tail -n +$row $GTRES/${n}_results.dat | awk '/Flux/ {
    print $0 }' | head -n 1 | cut -d "" -f 4 | awk '{ print $1
    }' '
233     totfluxerr='tail -n +$row $GTRES/${n}_results.dat | awk '/Flux/ {
    print $0 }' | head -n 1 | cut -d "" -f 4 | awk '{ print $3
    }' '
234     pref='tail -n +$row $GTRES/${n}_results.dat | head -n 1 | cut -d "
    ' -f 6 | awk '{ print $1 }' '
235     preferr='tail -n +$row $GTRES/${n}_results.dat | head -n 1 | cut -
    d "" -f 6 | awk '{ print $3 }' '
236     #spek.index
237
238     echo "$mjd $mjderr $ind $inderr" >> $TABRES/${m}_index
239
240     #prefaktor
241
242     echo "$mjd $mjderr $pref $preferr" >> $TABRES/${m}_pref
243
244     #fotometrie
245

```

```

246     echo "$mjd $mjderr $totflux $totfluxerr" >> $TABRES/${m}
        _photometry
247
248     #spektrum
249     ctsuma='ftlist "$GTRES/${n}_counts_spectra.fits[1]" T columns="$m"
        | tail -n +4 | awk -v f=$totflux '{ sum+=$2 } END { print sum
        }','
250     ftlist "$GTRES/${n}_counts_spectra.fits[1]" T columns="$m" | tail
        -n +4 | awk -v f=$totflux -v ctsum=$ctsuma '{ print $2"\t"($2/
        ctsum)*f"\t"(sqrt($2)/$2)*($2/ctsum)*f }' > $GENWAY/buffer3
251
252     paste $GENWAY/buffer0 $GENWAY/buffer1 $GENWAY/buffer3 | awk '{
        print $0"\t"$5*$2*1.6e-06"\t"(sqrt($4)/$4)*$5*$2*1.6e-06 }' >
        $TABRES/${m}_${n}_spec
253     paste $GENWAY/buffer0 $GENWAY/buffer1 $GENWAY/buffer3 | awk '{
        print $0"\t"$5*$2*1.6e-06"\t"(sqrt($4)/$4)*$5*$2*1.6e-06 }' >>
        $TABRES/${m}_3dspec
254     echo ' ' >> $TABRES/${m}_3dspec
255
256     #ploceni spektrum
257     echo "set terminal png giant size 1024,768; set output '$PLOTRES/
        spectra/${m}_${mjd}.png'; set tmargin 3 ;set rmargin 3; set
        xlabel 'energy (MeV)'; set ylabel 'photons * cm^-2 * s^-1'
        offset 1; set logscale x; set logscale y; unset key; set title
        'spectrum of $m at $mjd MJD'; plot '$TABRES/${m}_${n}_spec' u
        2:5:3:6 w xyerrorb lw 2" | gnuplot
258
259     #ploceni SED
260     echo "set terminal png giant size 1024,768; set output '$PLOTRES/
        sed/${m}_${mjd}.png'; set tmargin 3 ;set rmargin 3; set xlabel
        'energy (MeV)'; set ylabel 'erg * cm^-2 * s^-1' offset 1; set
        logscale x; set logscale y; unset key; set title 'spectral
        energy distribution of $m at $mjd MJD'; plot '$TABRES/${m}_${n}
        }_spec' u 2:7:3:8 w xyerrorb lw 2" | gnuplot
261
262     done
263
264     ##ploceni ctsmodely
265     > $GENWAY/buffer4
266     for o in `echo $objlist`; do
267         octs=`expr $o \+ 9`
268         sname=`grep -E "\ $o\ " $GENWAY/objectlist | awk '{ print $3 }'`
269         echo ", '$TABRES/${n}_cts' u 1:${octs} w l lw 1 t '$sname' " >>
        $GENWAY/buffer4
270     done
271

```



```

272     ctsplot1='cat $GENWAY/buffer4'
273     ctsplot='echo $ctsplot1'
274     echo "set terminal png medium size 1024,768; set output '$PLOTRES/
        ctsmodels/$mjd.png'; set lmargin 8; set rmargin 1; set tmargin 1;
        set multiplot; set size 1, 0.7; set origin 0, 0.3; set key t r;
        unset grid; unset xlabel; set format x "\\\"; set ylabel 'counts'
        offset 3; set bmargin 0; set logscale x; set logscale y; plot '
        $TABRES/${n}_cts' u 1:7:2:3 w xyerrorb lw 2 t 'total counts', '
        $TABRES/${n}_cts' u 1:8 w l lw 1 t 'EG_v02', '$TABRES/${n}_cts' u
        1:9 w l lw 1 t 'GAL_v02' $ctsplot ; set size 1, 0.3; set origin 0,
        0; set tmargin 0; set bmargin 3; set logscale x; unset logscale y
        ; set grid; unset key; set format x; set xlabel 'MeV'; set ylabel
        'Residuals' offset 1; plot '$TABRES/${n}_cts' u 1:4:5 w errorb lw
        2; unset multiplot" | gnuplot

275
276 done
277
278
279
280
281 ###ploceni ostatni
282
283 for m in `echo $objnames`; do
284     ##ploceni spek.index
285     echo "set terminal png giant size 1024,768; set output '$PLOTRES/index
        /$m.png'; set tmargin 3 ;set rmargin 3; set xlabel 'time (MJD)';
        set ylabel 'spectral index' offset 1; unset key; set title '
        spectral index of $m'; plot '$TABRES/${m}_index' u 1:3:2:4 w
        xyerrorb lw 2" | gnuplot

286
287     ##ploceni prefaktor
288     echo "set terminal png giant size 1024,768; set output '$PLOTRES/
        prefactor/$m.png'; set tmargin 3 ;set rmargin 3; set xlabel 'time
        (MJD)'; set ylabel 'prefactor / 10^-9' offset 1; unset key; set
        title 'prefactor of $m'; plot '$TABRES/${m}_pref' u 1:3:2:4 w
        xyerrorb lw 2" | gnuplot

289
290     ##ploceni fotometrie
291     echo "set terminal png giant size 1024,768; set output '$PLOTRES/
        photometry/$m.png'; set tmargin 3 ;set rmargin 3; set xlabel 'time
        (MJD)'; set ylabel 'photons * cm^-2 * s^-1' offset 1; unset key;
        set title 'psf photometry of $m'; plot '$TABRES/${m}_photometry' u
        1:3:2:4 w xyerrorb lw 2" | gnuplot

292
293     ##ploceni kombajn

```

```

294 echo "set terminal png giant size 1024,768; set output '$PLOTRES/
      kombajn/${m}.png'; set tmargin 3 ;set rmargin 9; set xlabel 'time (
      MJD)'; set y2tics; set ylabel 'photons * cm^-2 * s^-1' offset 1;
      set y2label 'spectral index' offset 0; unset key; set title '
      synced photometry (red) and spec index (green) of $m'; plot '
      $TABRES/${m}_index' u 1:3:2:4 axes x1y2 w xyerrorb lt 2 pt 2 lw 2,
      '$TABRES/${m}_photometry' u 1:3:2:4 axes x1y1 w xyerrorb lt 1 pt
      1 lw 2" | gnuplot
295
296 ##ploceni 3dspec
297 echo "set terminal png giant size 1024,768; set output '$PLOTRES/3
      dspec/${m}.png'; set tmargin 3 ;set rmargin 3; set view 65,50; set
      pm3d hidden3d 1; set border 4095; set ticslevel 0; set log cb;
      set ylabel 'time (MJD)'; set xlabel 'energy (MeV)'; set zlabel '
      photons * cm^-2 * s^-1' offset 1; set logscale x; set logscale z;
      unset key; set title 'spectrum of $m at $mjd MJD'; splot '$TABRES/
      ${m}_3dspec' u 2:1:5 w pm3d" | gnuplot
298
299 ##ploceni 3dsed
300 echo "set terminal png giant size 1024,768; set output '$PLOTRES/3dsed
      /${m}.png'; set tmargin 3 ;set rmargin 3; set view 65,50; set pm3d
      hidden3d 1; set border 4095; set ticslevel 0; set log cb; set
      ylabel 'time (MJD)'; set xlabel 'energy (MeV)'; set zlabel 'erg *
      cm^-2 * s^-1' offset 1; set logscale x; set logscale z; unset key;
      set title 'spectral energy distribution of $m at $mjd MJD'; splot
      '$TABRES/${m}_3dspec' u 2:1:7 w pm3d" | gnuplot
301
302
303 done
304
305 rm $GENWAY/events
306
307 date >> $GENWAY/log
308 echo "vse hotovo" >> $GENWAY/log
309
310 fi
311 rm $GENWAY/buffer*

```

Literatura

- [1] <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/>
- [2] http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/1yr_catalog
- [3] Andrea Tramacere, Saas Fee: *Spectral analysis of Fermi-LAT data*
- [4] W. B. Atwood et al.: *THE LARGE AREA TELESCOPE ON THE FERMI GAMMA-RAY SPACE TELESCOPE MISSION*, 2009 ApJ **697** 1071
- [5] A. W. Strong et al.: *The GALPROP Cosmic-Ray Propagation Code*, arXiv:0907.0559v1 [astro-ph.HE]
- [6] Ozlem Celik: *Fermi LAT Observations of the Geminga Pulsar*, ICRC 2009
- [7] A. A. Abdo et al.: *FERMI-LAT OBSERVATIONS OF THE GEMINGA PULSAR*, 2010 ApJ **720** 272
- [8] D. Paneque et al.: *FERMI view of the TeV blazar Markarian 421*, ICRC 2009
- [9] Meng Su, Tracy R. Slatyer, Douglas P. Finkbeiner: *Giant Gamma-ray Bubbles from Fermi-LAT: AGN Activity or Bipolar Galactic Wind?*, arXiv:1005.5480v3 [astro-ph.HE]
- [10] L. Pacciani et al.: *The December 2009 gamma-ray flare of 3C 454.3: the multifrequency campaign*, arXiv:1005.3263v1 [astro-ph.CO]
- [11] E. Valtaoja et al.: *Radio Monitoring of OJ 287 and Binary Black Hole Models for Periodic Outbursts*, 2000 ApJ **531** 744 doi: 10.1086/308494