

**ბლაზარების რენტგენული გამოსხივების ცვალებადობის კვლევა სპექტრის  
0.3-10 კილოელექტრონვოლტ დიაპაზონში**

**სერგო კაპანაძე**

*სადოქტორო ნაშრომი წარდგენილია ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტის  
საბუნებისმეტყველო მეცნიერებებისა და მედიცინის ფაკულტეტზე ფიზიკის დოქტორის  
აკადემიური ხარისხის მინიჭების მოთხოვნის შესაბამისად*

ფიზიკისა და ასტრონომიის სადოქტორო პროგრამა

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: ბიძინა კაპანაძე, ასოცირებული პროფესორი

**ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტი**

**თბილისი, 2021**

## განაცხადი

როგორც წარდგენილი სადოქტორო ნაშრომის ავტორი, ვაცხადებ, რომ ნაშრომი წარმოადგენს ჩემს ორიგინალურ ნამუშევარს და არ შეიცავს სხვა ავტორების მიერ აქამდე გამოქვეყნებულ, გამოსაქვეყნებლად მიღებულ ან დასაცავად წარდგენილ მასალებს, რომლებიც ნაშრომში არ არის მოხსენიებული ან ციტირებული სათანადო წესების შესაბამისად.

სერგო კაპანაძე

13 აგვისტო, 2021 წელი

## აბსტრაქტი

ბლაზარები ქმნიან გალაქტიკათა აქტიური გულების (AGNs) ერთერთ ყველაზე ექსტრემალურ კლასს. ისინი გამოირჩევიან გლუვი სპექტრებით, ემისიური ხაზების არარსებობით და მეტად სუსტი შთანთქმის ხაზებით, ძლიერი ოპტიკური და რადიო პოლარიზაციით, გამოსხივების ნაკადის ცვალებადობით სპექტრის ყველა უბანში, კომპაქტური რადიო მორფოლოგიით, სუპერლუმინარული მოძრაობითა და ფართო კონტინუუმით, რომელიც ვრცელდება რადიოდან მაღალენერგიულ  $\gamma$ -დიაპაზონამდე. ბლაზარები წარმოადგენენ სამყაროს ერთერთ ყველაზე ექსტრემალურ ობიექტებს როგორც სრული გამოსხივებული ენერჯის ისე გენერირებული ფოტონების სრული დიაპაზონის სიდიდის თვალსაზრისით.

დღესდღეობით ფართოდ მიღებული მოდელის მიხედვით ბლაზარები მოიცავენ ზემასიურ შავ ხვრელებს, აკრეციულ დისკებს, რელატივისტურ ჯეტებს და წარმოადგენენ გიგანტურ კოსმოსურ ლაბორატორიებს, რომლებიც საშუალებას გვაძლევენ დავაკვირდეთ სხვადასხვა რელატივისტურ ეფექტებსა და მაღალენერგიულ მოვლენებს ბუნებრივ პირობებში. დღეისათვის ფართოდ აღიარებული ჰიპოთეზის თანახმად, ბლაზართა დაკვირვებული მახასიათებლები გამოწვეულია იმ გარემოებით, რომ მათი ერთერთი ჯეტი მომართულია ჩვენკენ და ქმნის მცირე კუთხეს მხედველობის სხივის მიმართ.

მიუხედავად ბლაზართა ბუნების შესწავლაში არსებული მნიშვნელოვანი პროგრესისა, ჯერ კიდევ რჩება ბევრი გადაუჭრელი პრობლემა მათ სტრუქტურასა და გამოსხივების მექანიზმებთან დაკავშირებით. გამოსხივების ცვალებადობის შესწავლა წარმოადგენს ერთ-ერთ უმთავრეს საშუალებას ბლაზართა აგებულებისა და იმ არასტაციონალური პროცესების შესასწავლად, რომლებიც გამოსხივების დაკვირვებულ ვარიაციებს იწვევენ. ამ მხრივ განსაკუთრებით აქტუალურია კვლევის წარმოება სპექტრის რენტგენულ უბანში, ვინაიდან რენტგენული გამოსხივება წარმოიშობა ულტრა-

რელატივისტური ელექტრონების მიერ სინქროტრონული გამოსხივებით ან ამავე ელექტრონებზე დაბალენერგიული ფოტონების კომპტონის უკუ-გაბნევის გზით, ასეთ ენერგიებამდე ელექტრონთა აჩქარების მექანიზმის შესახებ კი მეცნიერთა შორის საერთო აზრი ჯერჯერობით არ არსებობს.

ბლაზართა რენტგენული გამოსხივების ცვალებადობის კვლევის შედეგად შეგვიძლია მივიღოთ მნიშვნელოვანი ინფორმაცია ჯეტის შემადგენელ ნივთიერებებში რელატივისტური დარტყმითი ტალღის გავლის შედეგად დამყარებული ფიზიკური პირობების შესახებ. გარდა ამისა, ტალღის ურთიერთქმედებას ჯეტში არსებულ არაერთგვაროვნებებთან, რომელსაც შეუძლია გამოიწვიოს ხანმოკლე რენტგენული ანთებები და საათების რიგის ფლუქტუაციები, რომელთა ამპლიტუდები საზოგადოდ იზრდება მაღალი სიხშირეების მიმართულებით ანუ მათი აღმოჩენა უფრო ადვილად შეგვიძლია სპექტრის რენტგენულ და გამა უბანში, ვიდრე რადიო-ოპტიკურში.

თუ გავითვალისწინებთ იმ ფაქტს, რომ ამჟამად დაკვირვებების მეშვეობით შესწავლილია მხოლოდ ზოგიერთი ახლომდებარე ბლაზარების ათეულობით და ასეულობით კილოპარსეკის რიგის მანძილებზე განვრცობილი ჯეტები, დანარჩენი ბლაზარებისთვის გამოსხივების ცვალებადობის შესაწავლა წარმოადგენს ერთადერთ პრაქტიკულ საშუალებას რათა წარმოდგენა შევიქმნათ ბლაზართა შინაგან აგებულებაზე.

წარმოდგენილ სადისერტაციო ნაშრომის ფარგლებში მიღებულ შედეგებზე დაყრდნობით, რომელიც მიღებულია თანამგზავრ სვიფტის (Swift) რენტგენული ტელესკოპის დაკვირვების საფუძველზე, ჩვენ ვაკეთებთ გარკვეულ დასკვნებს იმის შესახებ, რომ ჩვენს მიერ შერჩეულ ობიექტთა რენტგენულ გამოსხივებაში დაკვირვებული სიკაშკაშისა და სპექტრულ პარამეტრთა ცვალებადობები, კარგად შეიძლება აღიწერონ იმ ფიზიკური მოდელების მეშვეობით, რომელთაც თანამედროვე მაღალენერგიულ ასტროფიზიკაში მომუშავე მკვლევართა უმრავლესობა გვთავაზობს.

ძირითადი საძიებო სიტყვები: გალაქტიკა: ცვალებადობა-ბლაზარი

## Abstract

Blazars form one of the most extreme classes of Active Galactic Nuclei (AGN). They are characterized by smooth spectra, absence of emission lines and very weak of absorption lines, strong optical and radio polarization, flux variability in all spectral bands, compact radio morphology, apparent superluminal motions and broad continuum extending from radio to very high energy gamma-rays. Blazars are one of the most extreme objects in the universe in terms of both the full range of radiated energy, and the full range of photons, generated in all spectral bands.

According to the widely accepted model, Blazars include supermassive black holes, accretion discs, relativistic jets and represent giant space laboratories that allow us to observe the various relativistic effects and high-energy phenomenas, under the natural conditions. According to the widely accepted hypothesis today, the observed characteristics of Blazars are caused by the fact that one of their jets is directed towards us and creates a small angle to the line of sight.

Despite of significant progress in the studing the nature of Blazars, many unresolved problems regarding their internal structure and radiation mechanisms still remain. The study of flux variability is one of the main tool for understanding the structure of the blazars and that non-stationary processes, which cause the observed variations. Studying of radiation of the x-ray spectral band is relevant in this regard, since x-ray emmision is generated by the synchrotron radiation of ultra-relativistic electrons or by the inverse-Compton cattering of low-energy photons, on the same electron population. There is no consensus among scientists about the acceleration mechanism of electrons to such energies.

By the studying of Blazar x-ray flux variabilities, we can obtain important information about the physical conditions established after propagation of a relativistic shock wave through the Blazar jet. In addition, interactions between the shock wave and the jet inhomogeneities can produce short-term flares and intraday flux fluctuations whose amplitudes generally increase

towards the high frequencies, so they can be more easily detected in the x-ray and gamma-ray bands, than in radio-optics.

Given the fact that the researchers have been studied only some of nearby Blazar's jets spread over hundreds and tens of kiloparsecs in space, for other blazars, studying the variability of their radiation is the only practical way to get reasonable ideas about their internal structure.

Based on the results of this Ph.D thesis, analyzed from the Swift-XRT observation data, we conclude that the x-ray flux and the spectral variabilities of the objects we have selected, can be well described by that physical models, offered by most of scientists, working in modern high-energy astrophysics.

Keywords: Galaxies: variability- Blazar

## მადლობა

უდიდესი მადლიერება და პატივისცემა მინდა გამოვხატო ჩემი ხელმძღვანელის ბიძინა კაპანაძის მიმართ დოქტორანტურის პერიოდში კვლევების წარმართვისა და გვერდში დგომისათვის.

# სარჩევი

სარჩევი.....	vii
ცხრილების ჩამონათვალი .....	ix
ნახაზების ჩამონათვალი.....	x
<b>თავი 1. შესავალი .....</b>	<b>1</b>
<i>1.1 სინქროტრონული გამოსხივება.....</i>	<i>6</i>
<i>1.2 კომპტონის უკუ-გაბნევა.....</i>	<i>8</i>
<b>თავი 2. კვლევის აქტუალურობა.....</b>	<b>10</b>
<i>2.1 ბლახარების გამოსხივებაში მაღალენერგიული პიკის წარმოშობა.....</i>	<i>11</i>
<b>თავი 3. საკვლევი ობიექტები და ამოცანები.....</b>	<b>14</b>
<i>3.1 საკვლევი ობიექტები.....</i>	<i>14</i>
<i>3.2 კვლევის ამოცანები.....</i>	<i>19</i>
<b>თავი 4. კვლევის მეთოდიკა და ამოცანები.....</b>	<b>23</b>
<i>4.1 რენტგენული დაკვირვებების დროითი ანალიზი.....</i>	<i>23</i>
<i>4.2 რენტგენული დაკვირვებების სპექტრული ანალიზი.....</i>	<i>25</i>
<b>თავი 5. "სვიფტის" რენტგენული ტელესკოპი (Swift XRT-Telescope).....</b>	<b>27</b>
<i>5.1 თანამგზავრი "სვიფტი".....</i>	<i>27</i>
<i>5.2 დაკვირვებული მასალის დამუშავება.....</i>	<i>31</i>
<b>თავი 6. კვლევების ძირითადი შედეგები და დასკვნები.....</b>	<b>53</b>
<i>6.1 სვიფტის დაკვირვებები, შვიდ შორეულ მაღალენერგიული პიკის მქონე ლაცერტიდზე.....</i>	<i>53</i>
<i>6.2 1ES 2344+514 ლაცერტიდის კვლევა, სვიფტის დაკვირვებებზე დაყრდნობით.....</i>	<i>64</i>
<i>6.3 სვიფტის დაკვირვებები Mrk 421 ლაცერტიდზე, შერჩეულ ეპოქებში. I. სპექტრული და ნაკადის ცვალებადობა 2005–2008 წლებში.....</i>	<i>71</i>
<i>6.4 ლაცერტიდ 1ES 1959+650-ის მეორე ძლიერი რენტგენული ანთება და მრავალსიხშირული ცვალებადობა 2016 წლის იანვარ–აგვისტოში.....</i>	<i>77</i>



თავი 7. სადოქტორო ნაშრომის შედეგების მოკლე აღწერა.....	84
დისერტანტის სამეცნიერო ღონისძიებებში მონაწილეობა.....	89
სამეცნიერო პუბლიკაციები.....	91
ბიბლიოგრაფია.....	95

## ცხრილების ჩამონათვალი

ცხრილი 1: საკვლევ ობიექტთა ნუსხა.....	14
ცხრილი 2: სვიფტის რენტგენული ტელესკოპის მიერ წარმოებული დაკვირვებების დროითი ანალიზის შედეგები (ამონარიდი სტატიიდან).....	55
ცხრილი 3: 0.3-10 კევ უბნის იზოტროპული გამოსხივების შედარებები, სამიზნე ობიექტებსა და სხვა ახლომდებარე კაშკაშა ლაცერტიდებს შორის.....	61
ცხრილი 4: სვიფტის რენტგენული ტელესკოპით წარმოებული დაკვირვებების სპექტრული ანალიზის შედეგები (ამონარიდი სტატიიდან).....	62
ცხრილი 5: სვიფტის რენტგენული და UVOT ტელესკოპების დაკვირვებები, სხვადასხვა პერიოდებში.....	67
ცხრილი 6: კორელაცია სპექტრულ პარამეტრებსა და მრავალსიხშირულ ნაკადებს შორის.....	73
ცხრილი 7: სპექტრულ პარამეტრთა განაწილებები.....	74
ცხრილი 8: სვიფტის რენტგენული ტელესკოპით წარმოებული დაკვირვებების, ხანგრძლივი რენტგენული ანთებების დროითი ანალიზის შედეგები.....	84
ცხრილი 9: სვიფტის რენტგენული ტელესკოპით წარმოებული დაკვირვებების, ხამოკლე რენტგენული ანთებების დროითი ანალიზის შედეგები.....	85
ცხრილი 10: სვიფტის რენტგენული ტელესკოპით წარმოებული დაკვირვებების მიკროცვალებადობათა დროითი ანალიზის შედეგები.....	86
ცხრილი 11: სვიფტის რენტგენული ტელესკოპით წარმოებული დაკვირვებების სპექტრული ანალიზის შედეგები.....	87

## ნახაზების ჩამონათვალი

ნახ. 1.1 ბლაზარის აგებულების სქემა .....	3
ნახ. 1.2 სპექტრული განაწილების (SED) ნიმუშები.....	4
ნახ. 1.3 სინქროტონული გამოსხივება და კოპტონის უკუ-გაბნევა.....	5
ნახ. 1.4 სხვადასხვა ტიპის ბლაზართა განსაზღვრა სინქროტონული პიკის მიხედვით.....	6
ნახ. 5.1 თანამგზავრი სვიფტი და სხვადასხვა ინსტრუმენტების განლაგება მასზე.....	28
ნახ. 5.2 Swift-ის რენტგენული ტელესკოპის სქემა.....	29
ნახ. 5.3 Swift-XRT-დან მიღებული Mrk421-ის რენტგენული გამონახაზი.....	36
ნახ. 6.1 საკვლევი ობიექტების 0.3-10 კევ სიკაშკაშის მრუდები.....	57
ნახ. 6.2 0.3-10 კევ მიკროცვალებადობის (IDVs) მრუდები.....	58
ნახ. 6.3 ბლაზარ 1ES 2344+514-ის სიკაშკაშის მრუდები.....	66
ნახ. 6.4 1ES 2344+514 ის "HR-ნაკადი" სიბრტყეები, სხვადასხვა პერიოდებისათვის.....	69
ნახ. 6.5 Mrk421-ის ერთ დღიანი სიკაშკაშის მრუდები.....	72
ნახ. 6.6 Mrk 421-ის სპექტრული ჰისტერიკები.....	76
ნახ. 6.7 1ES 1959+650-ის მრავალტალღოვანი სიკაშკაშის მრუდები.....	79
ნახ. 6.8 1ES 1959+650-ის მრავალტალღოვანი ცვალებადობები, 1-3 პერიოდებში.....	83

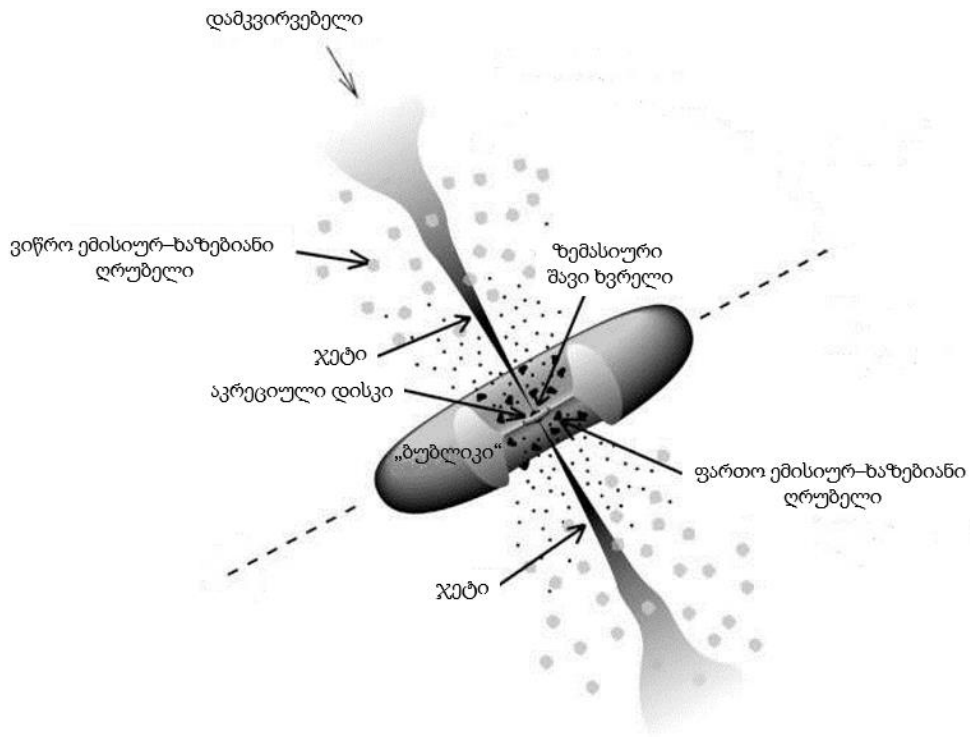
## თავი 1. შესავალი

გალაქტიკას ეწოდება ნორმალური, თუ მისი სხვადასხვა არეებიდან გამოსხივებული ენერგია ერთმანეთთან შედარებადია. ასეთი გალაქტიკების მიერ გამოსხივების სპექტრის ხილულ და ახლო-ინფრაწითელ უბანში სჭარბობს ვარსკვლავთა გამოსხივება, ასევე გვაქვს გაზისა და მტვრის მცირე წილიც. ეს კი წარმოადგენს სითბურ გამოსხივებას, ვინაიდან ვარსკვლავთა ატმოსფეროების შემადგენელი პლაზმა თერმოდინამიკურ წონასწორობასთან მიახლოებულ მდგომარეობაში იმყოფება. ნორმალურ გალაქტიკათა სპექტრი შესაძლებელია საკმაოდ კარგი მიახლოებით აღიწეროს, როგორც ვარსკვლავთა სპექტრების (პლანკის ფუნქცია პლუს სპექტრული ხაზები) სუპერპოზიცია.

ნორმალური გალაქტიკისაგან განსხვავებით, გალაქტიკას ეწოდება აქტიური, თუ მისი გამოსხივებული ენერგიის მნიშვნელოვანი ნაწილის გენერირება ხდება მის ცენტრალურ, კომპაქტურ ნაწილში, რომელსაც აქტიური გული ეწოდება. აქტიურ გულებს გააჩნიათ ენერგიის გაცილებით განვრცობილი განაწილება ვიდრე ნორმალურ გალაქტიკებს. თუ ამ უკანასკნელთა ელექტრომაგნიტური სპექტრი განვრცობილია სიხშირეთა მხოლოდ 3-5 რიგზე (ინფრაწითელი-ულტრაიისფერი;  $\nu \sim 10^{12}-10^{15}$  ჰერცი) აქტიური გულები ასხივებენ სიხშირეთა 15-19 რიგის ფარგლებში - გრძელტალღოვანი რადიოგამოსხივებიდან დაწყებული ტერაელექტრონვოლტი ენერგიის მქონე ფოტონებით დამთავრებული ( $\nu \sim 10^8-10^{27}$  ჰერცი) და თან თითოეული რიგის ფარგლებში ენერგიის განაწილება სიხშირეების მიხედვით თითქმის მუდმივია. ეს კი მიუთითებს, რომ აქტიური გულის მიერ გამოსხივებული ენერგია არ შეიძლება იყოს სითბური წარმოშობისა და მისი გენერაცია ხდებოდეს ვარსკვლავებში. ასე რომ, უნდა გვქონდეს ენერგიის სულ სხვა წყაროები და გამოსხივების არასითბური მექანიზმები (Piranomonte, S. et al.2007). გალაქტიკათა აქტიური გულები გამოირჩევიან თვისებათა (სპექტრი, ნათობა, გულის ნათობის ფარდობა ვარსკვლავური ნაწილის ფარდობასთან და ა. შ) მეტად ვრცელი დიაპაზონით და იყოფიან ოთხ სხვადასხვა კლასად:

- ✓ ბლაზარები
- ✓ კვაზარები
- ✓ სეიფერტის გალაქტიკები
- ✓ რადიო გალაქტიკები

სადისეტრაციო კვლევის ობიექტები მიეკუთვნებიან ბლაზართა კლასს, რომლებიც წარმოადგენენ (ელიფსურ) გალაქტიკათა აქტიური გულების ერთ-ერთ ყველაზე ექსტრემალურ ობიექტებს როგორც ნათობის, ისე გენერირებული ფოტონების სრული დიაპაზონის სიდიდის თვალსაზრისით. დღეისათვის ფართოდ მიღებული მოდელის მიხედვით, ისინი მოიცავენ ზემასიურ შავ ხვრელებს, აკრეციულ დისკებს, რელატივისტურ ჯეტებს და წარმოადგენენ გიგანტურ კოსმოსურ ლაბორატორიებს, რომლებიც საშუალებას გვაძლევენ დავაკვირდეთ სხვადასხვა რელატივისტურ ეფექტებსა და მაღალენერგიულ მოვლენებს ბუნებრივ პირობებში. დღეისათვის ფართოდ მიღებული ჰიპოთეზის თანახმად, ბლაზართა დაკვირვებული მახასიათებლები გამოწვეულია იმ გარემოებით, რომ მათი ერთ-ერთი ჯეტი მომართულია ჩვენკენ (Blandford & Rees 1978 and references therein), ან ქმნის მცირე კუთხეს მხედველობის სხივის მიმართ (ნახ. 1.1).

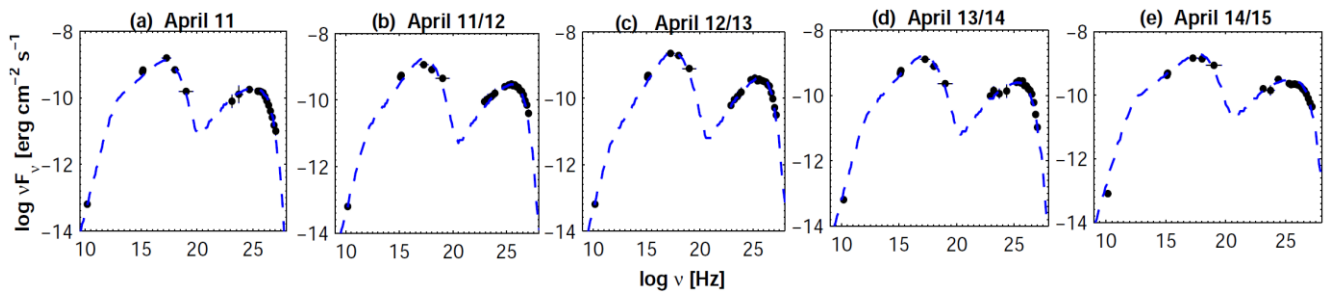


ნახ. 1.1 ბლაზარის აგებულების სქემა.

მკვლევარები გამოყოფენ ბლაზართა ქვეკლასებს, მათ ოპტიკურ სპექტრში ფართო ემისიური ხაზების "სიძლიერისა" და "სისუსტის" მიხედვით, შესაბამისად:

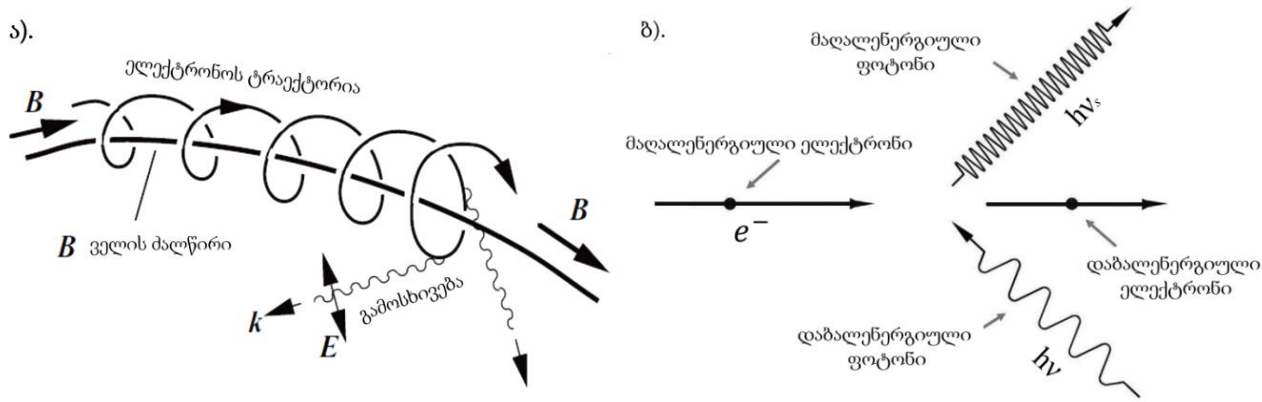
- ✓ ე.წ ბრტყელსპექტრიანი რადიო-კვაზარები (FSRQs), მათ ზოგჯერ ოპტიკურად ძლიერ ცვალებად კვაზარებად ან ძლიერ პოლარიზებულ კვაზარებადაც მოიხსენიებენ.
- ✓ ლაცერტიდები (BL Lacs ). მათი სახელწოდება წარმოსდგება მათი ისტორიულად პირველი წარმომადგენლის *BL Lacertae* - საგან, რომელიც 1929 წელს აღმოაჩინეს ხვლიკის თანავარსკვლავედში, თუმცა მისი გარეგალაქტიკური ბუნება მხოლოდ 1974 წელს იქნა დადგენილი. ამის შემდეგ აღმოჩენილი იქნა ასეულობით ანალოგიური ბუნების სხვა ობიექტიც.

ბლაზართა გამოსხივების სპექტრები, რომლებიც უდავოდ არასითბური წარმოშობის არიან, საყოველთაოდ მიღებული  $\text{Log} \nu - \text{Log} \nu F_\nu$  რეპრეზენტაციის შემთხვევაში უჩვენებენ ორ ფართო პიკს: ერთი მათგანი დაიკვირვება ინფრაწითელ-ულტრაიისფერ/რენტგენულ უბანში, ხოლო მეორე რენტგენულ-გამა დიაპაზონში (ნახ. 1.2).



**ნახ. 1.2** ბლაზარ Mrk 421-ის გამოსხივების ენერჯის სპექტრული განაწილების (SED) ნიმუშები, მისი 2013 წლის მაღალი აქტივობის პერიოდში ( Kapanadze, B. et al. 2016).

დღეისათვის ფართოდაა მიღებული, რომ დაბალენერგიული კომპონენტი წარმოადგენს ჯეტის პლაზმაში არსებული მაგნიტური ძალწირების ირგვლივ მბრუნავი (ულტრა)რელატივისტური ელექტრონების სინქროტრონულ გამოსხივებას, ხოლო მაღალენერგეტიკული კომპონენტის წარმოშობა კვლავ დავის საგანს წარმოადგენს. ყველაზე მეტად აღიარებული ჰიპოთეზის თანახმად, ბლაზართა შესაბამისი ფოტონების გენერაცია უნდა ხდებოდეს ულტარელატივისტურ ელექტრონებზე დაბალენერგიული ფოტონების კომპტონის უკუ-გაბნევის გზით. (ნახ. 1.3 ა). და ბ. ).



**ნახ. 1.3** ა). სინქროტრონული გამოსხივებისას, ელექტრონი სპირალურად ბრუნავს მაგნიტური ველის ძალწირის ირგვლივ და წარმოქმნის პოლარიზებულ გამოსხივებას მიძრაობის გასწვრივ. ბ). კომპტონის უკუ-გაბნევის დროს ულტრარელატივისტური ელექტრონი გადასხივებს მასზე დაცემულ დაბალენერგიულ ფოტონს მაღალ ენერგიებზე.

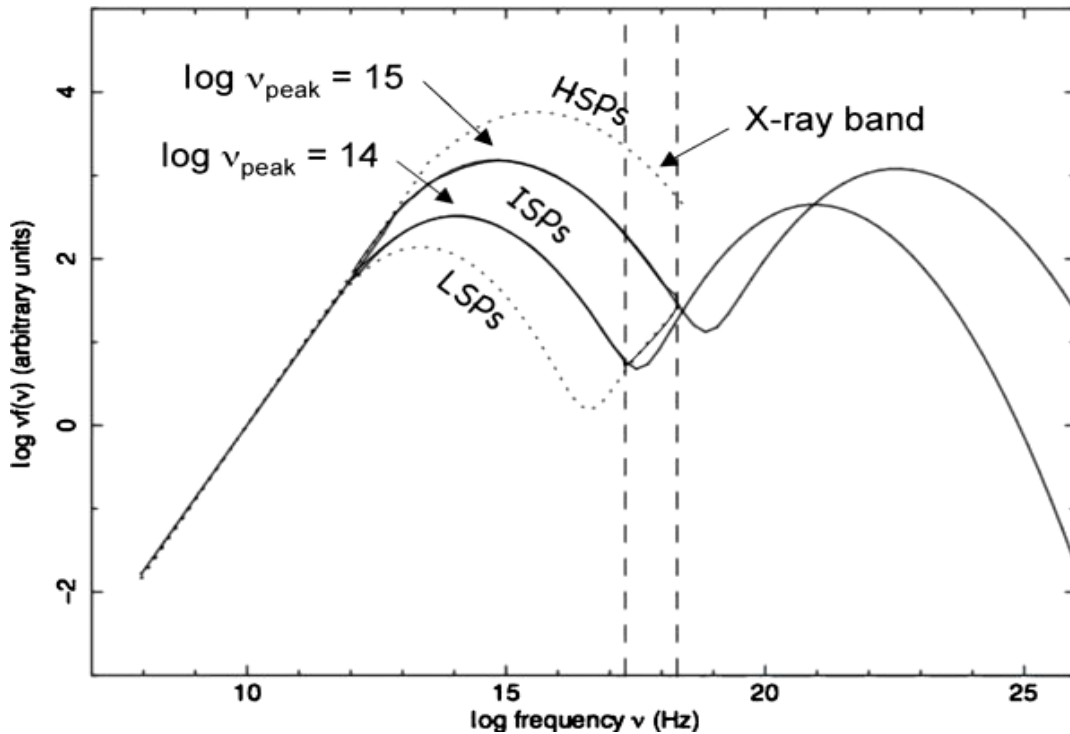
ენერგიის სპექტრულ განაწილების (SEDs) სინქროტრონული პიკის მდებარეობის მიხედვით ბლაზარები თავის მხრივ იყოფიან შემდეგ ქვე-კლასებად (Abdo, A. A. et al. 2010):

- ✓ დაბალენერგიული სინქროტრონულ პიკის მქონე ბლაზარები (**LSP**). ეს ისეთი წყაროებია, რომელთა სინქროტრონული გამოსხივების პიკი მდებარეობს სპექტრის დაბალ ენერგიებზე (მაგ. შორეულ ინფრაწითელ ან ინფრაწითელ უბანში ან  $\nu_{peak} \leq 10^{14}$  ჰც) და შესაბამისად, მათი რენტგენული გამოსხივების სპექტრი ბრტყელია ( $\alpha_x \approx 0.4-0.7$ ). იგი ასევე მოიცავს კომპტონის უკუგაბნევის კომპონენტის ზრდად ნაწილსაც (ნახ. 4).
- ✓ შუალედური სინქროტრონულ პიკის მქონე ბლაზარები (**ISP**). ეს ისეთი წყაროებია, რომელთა სინქროტრონული გამოსხივების პიკი მდებარეობს სპექტრის "შუალედურ" ენერგიებზე ( $10^{14} \text{ ჰც} \leq \nu_{peak} \leq 10^{15} \text{ ჰც}$ ). ამ შემთხვევაში რენტგენული უბანი მოიცავს "კუზების" ორივე ნაწილს, როგორც სინქროტრონული გამოსხივების "კუდს", ასევე კომპტონის უკუგაბნევის კომპონენტის აღმავალ ნაწილს (ნახ. 4).



- ✓ მაღალენერგიული სინქროტრონული პიკის მქონე ბლაზარები (HSP). ეს ისეთი ობიექტებია, რომელთა გამოსხივებელი ნაწილაკები აჩქარებას განიცდიან უფრო მაღალ ენერგიებზე, ვიდრე დაბალენერგიული პიკის მქონე (LSP) ობიექტების შემთხვევაში. მათი სინქროტრონული პიკი აღწევს ულტრაიისფერ ან უფრო მაღალ ენერგიებსაც ( $\nu_{peak} \geq 10^{15}$  ჰც; იხ. ნახ. 1.4).

(A. A. Abdo et al. 2009)



ნახ. 1.4 სხვადასხვა ტიპის ბლაზართა განსაზღვრება, მათი გამოსხივების ენერგეტიკულ განაწილებაში (SED) სინქროტრონული პიკის ( $\nu_{peak}^s$ ) მდებარეობის მიხედვით.

### 1.1. სინქროტრონული გამოსხივება

სინქროტონული გამოსხივების შემთხვევაში  $E = \gamma m_e c^2$  ენერჯის მქონე ელექტრონი ასხივებს მოძრაობის მიმართულებით  $1/\gamma$  რადიანი კუთხის ფარგლებში, ხოლო მისი მახასიათებელი სიხშირე განიმარტება შემდეგნაირად:

$$v_{syn} = \frac{1}{2\pi} \gamma^2 \frac{eB}{m} \sin\phi \quad (1.1)$$

სადაც  $B$  მაგნიტური ველის ინდუქციაა,  $e$  - ელექტრონის მუხტი, ხოლო  $\phi$  - კუთხე ელექტრონის სიჩქარის ვექტორსა და მაგნიტური ველის ძალწირს შორის (ე.წ. პიტჩ-კუთხე),  $\gamma$  - ელექტრონის შესაბამისი ლორენცის მამრავლი. ასეთი სიმძლავრის მაგნიტური ველები მიღებულია გამოსხივების ენერგეტიკული განაწილების მოდელირების მეშვეობით (Massaro, E. et al. 2004; Tramacere, A. et al. 2007). ამ უკანასკნელ შემთხვევას კი ადგილი აქვს მაშინ, როდესაც ნაწილაკთა მოძრაობა შემოსაზღვრულია მაგნიტური ველის მიერ და შემოსაზღვრულობის ეფექტურობა კლებულობს გირაციის რადიუსთან ერთად.

იმისათვის, რომ სინქროტონული გამოსხივების ნაკადის სიხშირეების მიხედვით განაწილების ფუნქციას ჰქონდეს ხარისხოვანი სახე  $F_\nu \sim \nu^{-\alpha}$ , რაც დაიკვირვება სხვადასხვა ასტროფიზიკური გარემოს შემთხვევაში (სინქროტონულ გამოსხივებას არ გააჩნია სპექტრული ხაზები), საჭიროა რომ გამომსხივებელი ელექტრონების ენერჯების მიხედვით განაწილებაც ასევე აღიწერებოდეს ხარისხოვანი ფუნქციის სახით. კერძოდ, იმ ელექტრონთა რაოდენობა, რომელთა ენერჯიები ხვდებიან  $E, E + dE$  ინტერვალში, გვაძლევს შემდეგი სახის დამოკიდებულებას:

$$N(E)dE \propto E^{-s} \quad (1.2)$$

რომლის ინდექსი  $s$ , ფოტონთა  $\alpha$  ინდექსთან შემდეგ დამოკიდებულებაშია:

$$s = (\alpha + 1)/2 \quad (1.3)$$

ანუ ელექტონთა ენერგეტიკული ფუნქციის მაჩვენებელი განსაზღვრავს გამოსხივებულ სინქროტონულ ფოტონთა სპექტრის ფორმასაც.

## 1.2. კომპტონის უკუ-გაბნევა

როდესაც  $\gamma$  - დოპლერის მამრავლის მქონე ულტრარელატივისტური ელექტონი (მისი სიჩქარე  $v \rightarrow c$ ) ხვდება დაბალენერგიულ ფოტონს, მათი "შეჯახება" იწვევს ფოტონის სიხის  $\nu_0$  სიხშირის გაზრდას დაახლ.  $\gamma^2\nu_0$  - მდე (ზუსტი კოეფიციენტი დამოკიდებულია გაბნევის გეომეტრიაზე) ანუ ხდება ფოტონის ენერჯის გაზრდა  $\gamma^2$ -ჯერ. განასხვავებენ ორ რეჟიმს, ე.წ. ტომსონისა (Thomson) და კლეინ-ნიშინას (Klein-Nishina) რეჟიმებს, განსხვავება კი მდგომარეობს შემდეგში: ჩვენ ვირჩევთ ათვლის ისეთ სისტემას, რომელშიც ელექტონი უძრავ მდგომარეობაშია და ვითვლით "შემოსული" ფოტონის ენერჯიას, თუ ეს უკანასკნელი მცირეა ვიდრე  $mc^2$ , მაშინ გვაქვს ტომსონის რეჟიმი. ამ დროს ელექტონის "უკუცემა" ფოტონზე (მიუხედავად იმისა, რომ იგი ყოველთვის არსებობს) იმდენად მცირეა, რომ შეგვიძლია უგულვებელყოთ. საპირისპირო შემთხვევაში კი (როდესაც შემოსული ფოტონის ენერჯია აღემატება  $mc^2$ -ს), ჩვენ ვიმყოფებით "კლეინ-ნიშინას" რეჟიმში, რომლის დროსაც შეუძლებელია უგულვებელყოთ ელექტონის "უკუცემა" ფოტონზე. ორივე ამ რეჟიმის დროს ადგილი აქვს ფოტონის ენერჯის გაზრდას, მიუხედავად იმისა, რომ ყოველთვის არსებობს დაჯახებათა კუთხის ისეთი სიტუაციები, როდესაც გაფანტული ფოტონი კარგავს თავისი ენერჯის ნაწილს. აჩქარებით მოძრავი ელექტონი ცხადია ასხივებს სინქროტრონულ ფოტონებსაც, მაგრამ ამ პროცესის შემთხვევაში იგი გაცილებით ნაკლებ ენერჯიას კარგავს ვიდრე კომპტონის უკუ-გაბნევის შემთხვევაში. ამ პროცესის წყალობით რადიო-ფოტონი შესაძლოა გახდეს ოპტიკური, რენტგენული ან გამა-ფოტონიც კი. აღსანიშნავია, რომ კომპტონის უკუ-გაბნევა შეიძლება განიცადოს არა მარტო რადიო, არამედ უფრო მაღალი ენერჯის მქონე ფოტონმაც, თუ დაჯახებაში მონაწილე ნაწილაკის ენერჯია გაცილებით აღემატება მის ენერჯიას. კომპტონის უკუ-გაბნევას რომ ჰქონდეს ადგილი ასევე საჭიროა, რომ გარემოს გააჩნდეს საკმარისად მაღალი სიმკვრივე, რათა მოხდეს კონტაქტი ელექტონებსა და ფოტონებს შორის, ასეთ გარემოში მოძრაობისას რელატივისტურ ელექტონს მოუხდება დიდი რაოდენობით დაბალენერგიულ ფოტონებთან შეჯახება.

ენერგიისა და იმპულსის მომენტის შენახვის კანონებიდან გამომდინარე, ელექტრონთა ენერგიის დაკარგვის სიჩქარე ყოველ წამში კომპტონის უკუ-გაბნევის შედეგად, მოიცემა შემდეგი სახით:

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)_{IC} = -\frac{4}{3}\sigma_T c \beta^2 \gamma^2 u_{ph} \quad (1.4)$$

სადაც  $\sigma_T = 6.65 \times 10^{-29} \text{ მ}^{-2}$  წარმოადგენს ე.წ. ტომსონის განიკვეთს,  $c$  – სინათლის სიჩქარეს ვაკუუმში,  $\beta = v/c$ ,  $v$  – ელექტრონის სიჩქარეს, ხოლო  $u_{ph} \equiv n_{ph} h\nu_{av}$  – ფოტონთა ენერგიის სივრცული სიმკვრივეა ( $n_{ph}$  - ფოტონთა რაოდენობა  $1 \text{ სმ}^3$  -ში, ხოლო  $\nu_{av}$  -მათი საშუალო სიხშირე).

## თავი 2. კვლევის აქტუალურობა

ბლაზართა გამოსხივების სპექტრულ კვლევას უდიდესი მნიშვნელობა აქვს იმისათვის, რომ მოხდეს მათ არასითბურ გამოსხივებაზე "პასუხისმგებელი" ნაწილაკებისა და გამოსხივებული ფოტონების ენერგიების მიხედვით განაწილების ხასიათის დადგენა, საკვლევი ობიექტების ანთებების ეპოქებში. დარტყმითი ტალღის ფრონტზე ფერმის პირველი ტიპის მექანიზმის გზით ნაწილაკთა აჩქარების პროცესში მათი გამოსხივების ენერგიის როგორც ხარისხოვანი, ისე ლოგარითმულ-პარაბოლური (LP) სახით განაწილების მიღებაა შესაძლებელი და შეუძლიათ გამოიწვიონ ანტიკორელაცია  $E_p$  (ენერგიის პიკისა) და  $b$  (სპექტრის სიმრუდის) პარამეტრებს შორის.

ვინაიდან ლაცერტიდების შემთხვევაში დაფიქსირებული მაღალენერგიული გამოსხივების ძალიან სწრაფი ცვალებადობა ნიშნავს მათში გამოსხივების მეტად კომპაქტური არეების არსებობას (რომლებიც უნდა მდებარეობდნენ ცენტრალური ზემასიური შავი ხვრელების მახლობლად), გამოსხივების მრავალსიხშირული ცვალებადობის შესწავლა გვადლევს ამ რელატივისტური ობიექტების უშუალო სიახლოვეს მიმდინარე მასების აკრეციასა და გამოტყორცნასთან დაკავშირებული არასტაბილური პროცესების შესწავლის უნიკალურ შესაძლებლობას. აღსანიშნავია, რომ ეს პროცესები შესაძლოა პირდაპირ იყვნენ დაკავშირებული ლაცერტიდების არასითბური გამოსხივების გენერაციის მექანიზმებთან. გარდა ამისა, ტალღის ურთიერთქმედებას ჯეტში არსებულ არაერთგვაროვნებებთან შეუძლია გამოიწვიოს ხანმოკლე რენტგენული ანთებები და ერთ დღე-ღამეზე ნაკლები ხანგრძლივობის ფლუქტუაციები (მიკროცვალებადობები). ასეთი მოვლენების აღმოჩენა კი ჩვენ საშუალებას გვადლევს შევზღუდოთ ჯეტის იმ არეების ზომები სადაც ფორმირდება ცვალებადი გამოსხივება  $R \leq ct_{var}\delta$  დამოკიდებულების მეშვეობით (სადაც  $\delta$  წარმოადგენს ჯეტის შესაბამის დოპლერის მამრავლს). ვინაიდან ბლაზართა ყველაზე შიდა ნაწილების სტრუქტურული კომპონენტების გარჩევა შეუძლებელია პირდაპირი დაკვირვებების გზით, გამოსხივებული ნაკადის ცვალებადობის კვლევა წარმოადგენს მძლავრ საშუალებას მათი

ყველაზე შიდა ნაწილების (რომლებიც წარმოადგენენ სამყაროს ერთ-ერთ ყველაზე ექსტრემალურ "ადგილებს") შესწავლის თვალსაზრისით.

ბლაზარების გამოსხივების ცვალებადობა შესწავლილია სხვადასხვა ავტორთა მიერ (იხ. Abdo, A. A. et al. 2010; Acciari, V. A. et al. 2009; Acciari, V. A. et al. 2011; Raiteri, C. et al. 2010; Krawczynski, H. et al. 2004; და ა.შ.), თუმცა ამ ავტორების მიერ შემოთავაზებული სპექტრული პარამეტრების ურთიერთ დამოკიდებულების ანალიზიდან მოცემული ანთების შემთხვევაში ნაწილაკთა მაღალ ენერგიებამდე აჩქარების საერთო მექანიზმის დადგენა ჯერჯერობით მაინც ვერ ხერხდება.

## 2.1. ბლაზარების გამოსხივებაში მაღალენერგიული პიკის წარმოშობა

ბლაზართა გამოსხივებაში მაღალენერგიული პიკის წარმოშობის შესახებ არსებობს შემდეგი სხვადასხვა "ურთიერთ-კონკურენტული" ფიზიკური მოდელები: (I) სინქროტრონული ფოტონების კომპტონის უკუ-გაბნევა იმავე პოპულაციის ელექტრონების მიერ (Synchrotron self-Compton, SSC; Marscher & Gear 1985); (II) ე.წ. გარე კომპტონური მოდელი, როდესაც გარემომცველი ფოტონები განიფანტებიან ჯეტის ელექტრონების მიერ (EC, Dermer et al. 1992); (III) ადრონული პროცესები (იხ. მაგ. Mannheim & Biermann 1992). ამასთან ერთად არსებობს უამრავი გადაუჭრელი საკითხი, რომელიც დაკავშირებულია ბლაზართა ყველაზე შიდა არეების სტრუქტურასთან, ჯეტების შემადგენელ ნაწილაკებთან (ლეპტონები ადრონების წინააღმდეგ), ექსტრემალურად მაღალენერგიული პროცესების შედეგად ულტრა-რელატივისტურ ენერგიებამდე აჩქარებული ნაწილაკების ბუნებასთან, იმ არასტაბილური პროცესების ფიზიკური თვისებებთან, რომელიც იწვევს ობიექტის "ბრწყინვალების" ცვალებადობებს და ა.შ.

მაღალენერგიული პიკის მქონე ბლაზარების (HBLs) რენტგენული გამოსხივება შესაძლებელია აიხსნას, როგორც მაღალენერგიული ელექტრონების სინქროტრონული გამოსხივება, ეს უკანასკნელი კი ძალიან სწრაფად კარგავენ რენტგენული ფოტონების

წარმოსაქმნელად საჭირო ენერგიას (Massaro et al. 2004). გამოსხივების დროში ცვალებადობისა და მათი რეტგენული სპექტრის დეტალური ანალიზი გვაძლევს მნიშვნელოვან ინფორმაციას ახლადაჩქარებული ნაწილაკების ფოტონთან ურთიერთქმედებისა და შემდგომი გადასხივების პროცესის შესახებ. უფრო მეტიც, ასეთი კვლევები საშუალებას გვაძლევს დავადგინოთ სარწმუნო არასტაბილური პროცესები, რომლებიც პასუხისმგებელია ნაწილაკების აჩქარებაზე და დაკვირვებულ დროით/სპექტრულ ცვალებადობებზე. კერძოდ, რენტგენული ელექტრონების ენერგიის ლოგარითმულ-პარაბოლური განაწილებიდან მიღებული სპექტრული (*b*) სიმრუდე შესაძლებელია განვითარდეს რელატივისტური დარტყმითი ტალღის ფრონტთან ფერმის პირველი მექანიზმის აჩქარების გზით (Massaro et al. 2004 and references therein), გარდა ამისა, სპექტრული სიმრუდე შესაძლებელია დაკავშირებული იყოს სტოხასტურ (ფერმის მეორე რიგის) აჩქარებასთანაც, ჯეტის ტურბულენტურ არეებში რელატივისტური დარტყმითი ტალღის ფრონტის ახლოს (Tramacere et al. 2009), თუმცა ასეთი მექანიზმი გულისხმობს შედარებით ნაკლებ სპექტრულ სიმრუდეს, ფერმის პირველი მექანიზმისაგან განსხვავებით (Massaro et al. 2011).

გამოსხივებული ნაკადის ცვალებადობის ხასიათის დადგენა საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ გარკვეული დასკვნები ამ ცვალებადობათა გამომწვევი ფიზიკური მექანიზმის შესახებ. პერიუდულობის მქონე ცვალებადობა შეაძლებელია დაკავშირებული იყოს ორჯერადი სისტემის ზემასიურ შავი ხვრელების არსებობასთან ან დარტყმითი ტალღის ჯეტში გავრცელებასთან "ჰელიკალურ" მაგნიტურ ველში (Rani et al. 2009). ხანგრძლივი ცვალებადობა, რომელიც დადებით კორელაციაშია ხანმოკლე, ერთ დღე-ღამეზე ნაკლები ხანგრძლივობის (IDV) მიკროცვალებადობებთან, მიუთითებს ე.წ "დარტყმითი ტალღა ჯეტში" -სცენარის არსებობაზე (shock-in-jet) (Sokolov et al. 2004; Kapanadze et al. 2018a) და ა.შ. რეალური მოდელი შეიძლება შეირჩეს მრავალტალღოვანი ცვალებადობისა (MWL) და მრავალსიხშირული (სპექტრის სხვადასხვა უბნებს შორის) კორელაციის ინტენსიური შესწავლის გზით: ე.წ. ერთზონიანი "SSC" -მოდელი გულისხმობს თითქმის ერთდროულ ცვალებადობას სინქროტრონულ და მაღალენერგიულ სიხშირეებზე. მრავალზონიანი "SSC" და ადრონულ მოდელებს კი

შეუძლიათ ახსნან უფრო რთული ცვალებადობები და მრავალტალღოვანი არაკორელაციები (Fossati et al. 2008). ამ მხრივ, მნიშვნელოვანი პროგრესია მიღწეული ახლომდებარე, რენტგენულად კაშკაშა, მაღალენერგიული პიკის მქონე HBL-ბლაზარებისთვის (see, Aleksic et al. 2015a, Aliu et al. 2014 etc.), ხოლო შორეული HBLs - სთვის ეს საკითხი ჯერ კიდევ ნაკლებადაა შესწავლილი. სწორედ ამიტომ, ასეთი ობიექტებისა და მათში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების შესახებ ჩვენი წარმოდგენის გაზრდა ძალიან მნიშვნელოვანია სტატისტიკური მნიშვნელობის დასკვნების გამოსატანად.



### თავი 3. საკვლევი ობიექტები და ამოცანები

1-ცხრილში მოყვანილია სადოქტორო კვლევის ფარგლებში, საკვლევი ობიექტები მათი ყველაზე გავრცელებული სახელწოდებებით, შესაბამისი ეკვატორული კოორდინატები, წითელი წანაცვლებები და მათ მიმართ თანამგზავრ "სვიფტის" მიერ შესრულებული დაკვირვებების რაოდენობა. 1-დან მე-7 ობიექტის ჩათვლით, კვლევები ჩატარებულია ერთ შრომაში, ხოლო მე-8, მე-9 და მე-10 ობიექტებს მიძღვნილი აქვთ ცალ-ცაკლე შრომები, რომელთა ძირითადი შედეგები წარმოდგენილია მე-6 თავში.

**ცხრილი 1.** საკვლევი ობიექტთა ნუსხა

№	ობიექტის სახელწოდება	$\alpha$	$\delta$	$z$	N(Swift)
1	BZBJ0033-1921	00 33 34.2	-19 21 33	> 0.506	6
2	BZBJ0204-3333	02 04 12.8	-33 33 42	0.617	4
3	BZBJ1137-1710	11 37 55.4	-17 10 42	0.600	16
4	BZBJ1422+5801	14 22 38.9	+58 01 55	0.638	14
5	BZBJ1503-1523	15 03 40.6	-15 41 13	> 0.497	14
6	BZBJ1756+5522	17 56 15.9	+55 22 18	> 0.520	6
7	BZBJ1517+6525	15 17 47.59	+65 25 23.3	0.702	32
8	1ES 2344+514	23 47 04.80	+51 42 18	0.044	71
9	Mrk 421	11 04 27.314	+38 12 31.80	0.031	109
10	1ES 1959+650	19 59 59.852	+65 08 54.65	0.047	77

#### 3.1 საკვლევი ობიექტები

(ამ მიმოხილვაში არ განვიხილავ ჩვენს მიერ გამოქვეყნებულ მონაცემთა შედეგებს)

BZB J0033-1921, ტოკიოს ასტრონომიული ობსერვატორიის ტელესკოპის მიერ (Kondo et al. 1984) პირველად იყო იდენტიფიცირებული, როგორც ულტრაიისფერ გამოსხივებაზე უფრო მაღალი ენერჯის მქონე ობიექტი და მას ეწოდა როგორც KUV 003111938. მოგვიანებით, თანამგზავრ ROSAT-ის მიერ იგი დააფიქსირეს, როგორც კაშკაშა რენტგენული წყარო და მოხდა მისი იდენტიფიკაცია, როგორც ლაცერტიდი Bauer et al. (2000). შემდგომში Piranomonte, et al. (2007)-ის მიერ მოხდა ობიექტამდე სავარაუდო მანძილის განსაზღვრა, წითელი წანაცვლებით  $z = 0.610$ , რომელიც დაფუძნებული იყო ევროპის სამხრეთული ობსერვატორიის (ESO) 3.6 მეტრიანი ტელესკოპის დაკვირვებების ანალიზზე. ობიექტი უჩვენებდა ძალიან სუსტ ბრტყელ სპექტრს. მანძილის ეს მნიშვნელობა არ დადასტურდა 6DFGS-ის (6dF Galaxy Survey) მიერ (Jones et al. 2009), რომლის მიხედვითაც  $z$  განისაზღვრა როგორც 0.764. ობიექტამდე მანძილი საბოლოო შეფასება მოხდა Pita et al. (2014)-ის მიერ ESO-ს Very Large Telescope (VLT)-ზე დამონტაჟებული რენტგენული სპექტროგრაფის მეშვეობით და მიღებული იყო მნიშვნელობა  $0.506 \leq z \leq 1.54$ . ობიექტი პირველად დაფიქსირდა გამა უბანში თანამგზავრ *Fermi*-ზე არსებული LAT-ტელესკოპის მიერ (Abdo et al. 2009). 2012 წლის ივლისში მაღალენერგიული სტერეოსკოპული სისტემის მიერ (HESS) ობიექტი განისაზღვრა, როგორც მაღალენერგიული გამა გამოსხივების წყარო (VHE,  $E > 100$  გეე) და შეფასებული იქნა, როგორც ერთერთი ყველაზე შორეული ლაცერტიდი სპექტრის ამ უბანში (Bicherini et al. 2012).

ობიექტები, BZB J0204-3333 და BZB J1137-1710 პირველად იდენტიფიცირებულნი იყვნენ Bauer et al. (2000)-ის მიერ ROSAT Bright Source Catalog (RBSC)-სა და NRAO VLA Sky Survey (NVSS)-ის შორის, სპექტრის სხვადასხვა უბანში აღმოჩენილი კორელაციის გზით, მათი შეფასებებიდან რენტგენული ნაკადი ღებულობდა მნიშვნელობებს  $F_{0.1-2.4\text{კეე}}(2.2 - 2.4) \times 10^{-12} \text{ cgs}$  (აქ აბრევიატურა *cgs* შეესაბამება, ერგი  $\text{cm}^{-2} \text{წმ}^{-1}$  მნიშვნელობას). BZB J0204-3333-მდე მანძილი განისაზღვრა როგორც  $z = 0.617$  (Giommi et al. 2005), ხოლო BZBJ

1137-1710-ის ოპტიკური იდენტიფიკაცია მოხდა Piranomonte et al.(2007)-ის მიერ, რომელმაც მიიღო მნიშვნელობა  $z = 0.600$ .

BZB J1422+5801, პირველად დაფიქსირებული იყო "Einstein Slew Survey"-ის ფარგლებში, ხოლო მისი ოპტიკური იდენტიფიკაცია მოხდა Bade, Fink & Engels (1994)-ის მიერ, მისი 0.1 – 2.4 კეე სპექტრი კარგად აღიწერებოდა მარტივი ხარისხოვანი განაწილებით საიდანაც მიიღებოდა მნიშვნელობები  $\Gamma = 2.06$  და  $F_{0.1-2.4კეე} = 2.24 \times 10^{-12} cgs$  (Brinkmann & Siebert 1994).  $z = 0.638$  პირველად განსაზღვრული იყო Bade et al. (1998)-ის მიერ. ეს ობიექტი ასევე დაფიქსირებული იყო Fermi-LAT-ით და შედის First "Fermi-LAT Catalog"-ში (1FHL; Abdo et al. 2010).

ობიექტი BZB J1503-1523, აღმოჩენილი იქნა თანამგზავრ ROSAT-ის მიერ, ხოლო შემდგომ, სპექტრის გამა უბანში "Energetic Gamma Ray Experiment Telescope"-ის მიერ (EGRET) (300 მეე-300 გეე) და იგი შევიდა "Second EGRET " კატალოგში (Mattox et al. 1997). მოგვიანებით Bauer et al.(2000)-ის მიერ მოხდა მისი ოპტიკური იდენტიფიკაცია, ობიექტის წითელი წანაცვლების ქვედა საზღვარი ( $z \geq 0.497$ ) დადგენილი იყო Piranomonte et al. (2007)-ის მიერ.

BZB J1517+6525 პირველად დაფიქსირეს 1977-1978 წლებში, თანამგზავრ HEAO-1-ის მეშვეობით "NRL Large Area Sky Survey" (LASS) მიმოხილვის ფარგლებში და შევიდა "A-1 X-ray source" კატალოგში (Wood et al. 1984). ეს ობიექტი ასევე დაფიქსირებული იყო თანამგზავრ HEAO-2-ის მიერ (Einstein Observatory) და შედის "*Einstein Slew Survey*"-ში, როგორც ლაცერტიდი 1ES 1517+656 (Elvis et al. 1992). ROSAT-ის დაკვირვებებმა 2-10 კეე უბანში გამოავლინა ანთება  $1.3 \times 10^{-11}$  ერგი  $cm^{-2} s^{-1}$  მნიშვნელობითა და ხისტი სპექტრით  $\Gamma = 2.44$ . (Wolter et al. 1998). BZBJ1517+6525, რენტგენულ და გამა უბანში (50კეე-10მეე) დაფიქსირებული იყო თანამგზავრ "*OSSE*"-ის მიერ (McNaron-Brown et al. 1995) მაშინ, როდესაც იგი ჯერ კიდევ არ იყო აღმოჩენილი EGRET-ის მიერ 100 მეე -ზე მაღალ უბანში (Fichtel et al. 1994).  $z = 0.702$  წითელი წანაცვლების მნიშვნელობა მიღებული იყო "Calar Alto"-ს 2.2 მეტრიანი ტელესკოპური დაკვირვებებით Beckmann, Bade, & Wurkitz (1999)-მიერ. ოპტიკურ R უბანში წარმოებული დაკვირვებებით, რომელიც შესრულდა "Torino"-დან Raiteri et al. (1998)-ის მიერ გამოვლინდა, რომ ობიექტმა განიცადა მინიმუმ 3

გრძელპერიოდიანი (დაახლოებით 3 წელის ხანგრძლივობის) ოპტიკური ანთება, რომელიც იცვლებოდა  $R = 15.84 - 16.72$  მაგნიტუდის საზღვრებში. ობიექტი დაფიქსირებული იყო LAT-ის მიერ და შეტანილია 1FHL კატალოგში (Abdo et al. 2010). LAT-ის 2 წელზე მეტი ხანგრძლივობის დაკვირვებიდან (Vovk & Neronov (2013))-ის მიერ ვერ მოხერხდა ნაკადის სწრაფი, ერთი დღე-ღამის რიგის ცვალებადობის დაფიქსირება. რაც შეეხება BZB J1756+5522 -ს, ამ ობიექტამდე მანძილი შეფასებული იყო Bade et al. (1998) -ის მიერ, მნიშვნელობით  $z > 0.520$ .

1ES 2344+514, პირველად რენტგენულ ენერგიებზე დაფიქსირებული იყო Einstein Slew Survey-ის ფარგლებში 0.2-4 კეე უბანში, წითელი წანაცვლებით  $z = 0.44$  (Perlman, E. S., et al. 1996). თანამგზავრ *BeppoSAX*-ის მიერ განხორციელებულმა დაკვირვებებმა 1996 წლის დეკემბერში, შვიდი დღის განმავლობაში გამოავლინა ცვალებადობა 2-10კეე უბანში (Tramacere et al. 2007). მისი რენტგენული სპექტრი კარგად აღიწერებოდა მარტივი ხარისხოვანი განაწილებით, შესაბამისი ფოტონ-ინდექსით  $\Gamma \approx 1.8 - 2.3$ . (Nilsson, K. et al. 2007). 1ES 2344+514-ის გამოსხივება შესწავლილ იყო მრავალსიხშირული კლევის ფარგლებში სხვადასხვა ავტორთა მიერ (Godambe et al. 2007; Albert et al. 2007; Acciari et al. 2011; Aleksić et al. 2013).

Mrk 421, ASCA-ს მიერ 1994 წელს წარმოებული დაკვირვებების დროს 2-10 კეე უბანში განიცდიდა ძლიერ ცვალებადობას, რომელიც ორმაგდებოდა  $\sim 12$  სთ ინტერვალში (Takahashi et al. 1996), მისი რენტგენული სპექტრი იცვლებოდა ისე, რომ ხისტ რენტგენულ უბანში (2-10 კეე) ანთება ან სიკაშკაშის კლება წინ უსწრებდა რბილ (0.3-2 კეე) უბანში დაკვირვებულს. 1996-2003 წლებში ჩატარებულმა RXTE/ASM (Rossi X-ray Timing Explorer/All-Sky Monitor) დაკვირვებებმა გამოავლინეს სხვადასხვა ხანგრძლივობის ანთებები (Cui 2004), ხშირი იყო თვეების რიგის ანთებებიც. ასევე გამოვლენილი იყო მრავალი ხანმოკლე ანთება და ერთ საათზე ნაკლები ხანგრძლივობის მიკროცვალებადობებიც. *BeppoSAX*-ის მიერ 1997 წელს წარმოებულმა დაკვირვებებმა გამოავლინა 3 კეე-ზე მაღალი სიხშირის შესაბამისი ნაკადის, დაახლოებით ორი რიგის ცვალებადობა (Guainazzi et al. 1999). Maraschi et al. (1999)-ში კი გამოვლენილ იქნა საათის რიგის ანთებები *BeppoSAX*-ის 1998 წლის აპრილში მიღებულ მონაცემებზე დაყრდნობით.

RXTE/PCA (Proportional Counter Array) (2-60 კეე) და RXTE/HETXE (The High Energy X-ray Timing Experiment) (15-250 კეე) მიმღებების მიერ 2001 წლის განმავლობაში ჩატარებულმა ერთ კვირიანმა დაკვირვებებმა გამოავლინეს ანთებები, ნახევარ საათში რენტგენული ნაკადის ~30% მატებით დაწყებული დაახლოებით  $3 \times 10^5$  წამში ნაკადის გაათმაგებით დამთავრებული, რომლებიც ძლიერ კორელაციაში მოდიოდნენ  $\gamma$ -ანთებებთან (Fossati et al. 2008). თანამგზავრ Suzaku-ის მიერ 2006 წლის 28 აპრილს წარმოებული დაკვირვებების დროს, რენტგენულმა ნაკადმა (0.6-60 კეე) განიცადა ვარდნა დაახლოებით 50%-ით 6 საათის განმავლობაში, რასაც მოჰყვა ნაკადის ზრდა ~35% – ით ხოლო სპექტრულმა დაკვირვებებმა გამოავლინეს არა მარტო სპექტრული სიმრუდის გადახრა მარტივი-ხარისხოვანი ფორმიდან, არამედ მისი ცვალებადობაც (Ushio et al. 2009). Acciari et al. (2009)-მიერ XMM-Newton-ის (0.5-10 კეე) დაკვირვებებზე დაყრდნობით 2006 და 2008 წლებში, ობიექტის ძლიერი რენტგენული ანთებების დროს გამოვლენილ იქნა, ერთ საათზე ნაკლები ხანგრძლივობის მიკროცვალებადობები.

Mrk 421 ხშირად წარმოადგენს მკვლევართა სამიზნეს, მრავალსიხშირული (MWL) კვლევების ფარგლებში (იხ. მაგ: Macomb et al. 1995; Fossati et al. 2008; Acciari et al. 2011; Aleksic et al. 2015a; Baloković et al. 2016). აღნიშნულმა კვლევებმა გამოავლინა ამ ობიექტის რენტგენული და მაღალენერგიულ გამოსხივებათა მეტად საინტერესო თვისებები, რომლის ანალიზმაც ძალზედ გაამდიდრა ჩვენი ზოგადი წარმოდგენა ბლაზარების ბუნების შესახებ.

1ES 1959+650, 2000 წელს ჩატარებული RXTE/PCA დაკვირვებების დროს, ობიექტი ავლენდა რენტგენული ნაკადის ცვალებადობას 4 თვეზე მეტი დროის ხანგრძლივობით. ასევე გამოვლენილი იქნა ნაკადის 60%-იანი ფლუქტუაციებიც 3.5 დღის განმავლობაში (Giebels et al. 2002). 2002 წლის 18 მაისიდან 14 აგვისტომდე წარმოებული RXTE/PCA დაკვირვებებით დაფიქსირდა რამდენიმე ხანმოკლე ანთება (Krawczynski et al. 2004). იმავე მიმღების მიერ 2003 წლის აპრილ-მაისში წარმოებულმა დაკვირვებებმა გამოვლინა, როგორც ერთი თვის ხანგრძლივობის, ასევე დღეების რიგის ცვალებადობები (Gutierrez et al. (2006)). Suzaku-სა და Swift-ის მიერ 2006 წლის მაისში წარმოებული დაკვირვებების დროს ობიექტი განიცადა სიკაშკაშის სწრაფ ვარდნას 150 კ წამის განმავლობაში, გარდა

ამისა, დაიკვირვებოდა 2-10 კეე უბნის შესაბამისი ნაკადის 2 რიგით ზრდა 10 დღეში. დაფიქსირებული იყო სინქროტრონული პიკის წანაცვლება ხისტ რენტგენულ უბნისაკენ (Tagliaferri et al. 2008). ობიექტის მრავალსიხშირული გამოსხივება შესწავლილი იყო 2012 წელს VERITAS-ს (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) და Swift-ის დაკვირვებებით Aliu et al. (2014) -ის მიერ. *Fermi* LAT-ისა და "ჩერენკოვის" სხვადასხვა ტიპის ტელესკოპების (FACT, MAGIC, VERITAS) მონაცემთა ანალიზით, რომელიც შესრულებული იყო Buson et al. (2016) -ის მიერ მიუთითებდა ობიექტის (2016 წლის 27 აპრილის) აქტივობაზე.

### 3.2 კვლევის ამოცანები

*ამოცანა 1. ხანგრძლივი რენტგენული ანთებების კვლევა.*

ხანგრძლივი რენტგენული ანთებების (ორ თვეზე მეტი დროითი მასშტაბის) გამოსავლენად ყოველი ობიექტისათვის ვაგებთ სიკაშკაშის მრუდებს სხვადასხვა მისიების დაკვირვებებიდან მიღებული დღე-ღამეზე გასაშუალებული 0.3-10 კეე. ნაკადების მეშვეობით. შევისწავლით საკვლევ ობიექტთა ცვალებადობის ხასიათს (პერიოდულია თუ ირეგულარული) და შემდეგ შედარებით კარგად გამოკვეთილი ანთებებისთვის ვადგენთ დროით მასშტაბებს, გამოსხივების ნაკადის მინიმალურ და მაქსიმალურ მნიშვნელობებს (მათ ფარდობას), ცვალებადობის ფარდობითი ამპლიტუდებს, ნაკადის ცვალებადობის ჯერადობას, ანთებისას გამოვავლენთ სიკაშკაშის გაორმაგებისა და განახევრების უსწრაფეს დროით მასშტაბებს (თუ ასეთ მოვლენებს ადგილი აქვთ კონკრეტული ანთებისას). ანთების მსვლელობის დროს შევისწავლით ანთებათა ევოლუციას, ხისტ(2-10კეე) და რბილ(0.3-2კეე) რენტგენული ნაკადებს, ფოტონთა სპექტრულ ინდექსს, სიხისტის მაჩვენებელს, SED-ის მაქსიმუმის მდებარეობას და ვაგებთ შესაბამის ჰისტოგრამებს. "სიხისტის მაჩვენებლი-გამოსხივების ნაკადი"-სიბრტყეების შესწავლა შესაძლებლობას გვაძლევს ერთმანეთს შევადაროთ ანთებისას

გამომსხივებელ ნაწილაკთა (ელექტრონები) აჩქარებისა და მათი შემდგომი „გაციების“ დროითი მასშტაბები იმის მიხედვით, თუ რომელ მოცემულ "სიბრტყეებში" დაიკვირვება ანთების ევოლუცია, საათის ისრის მოძრაობის მიმართულებით (CW–"მარჯუჭი") თუ მის საწინააღმდეგოდ (CCW–"მარჯუჭი"). ყოველივე ეს კი ჩვენ საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ გარკვეული დასკვნები, გამოსხივების პროცესში მიმდინარე სხვადასხვა ფიზიკური მოდელებიდან უპირატესის არსებობის შესახებ.

### *ამოცანა 2. ხანმოკლე რენტგენული ანთებების კვლევა.*

ისევე როგორც წინა ამოცანის შემთხვევაში, თითოეული ხანმოკლე რენტგენული ანთებების დროს რომელიც გრძელდება რამდენიმე დღიდან – 2 თვემდე, შევისწავლით ცვალებადობის მახასიათებელ ყველა პარამეტრს. ამ ამოცანის შესრულებისას ვიყენებთ ერთ დღე-ღამეზე გასაშუალოებულ ნაკადებს და ვაგებთ შესაბამის სიკაშკაშის მრუდებს. შევისწავლით ხანმოკლე რენტგენული ანთებების კორელაციას ხანგრძლივ სიკაშკაშის მდგომარეობასთან. ამგვარი კვლევა მეტად მნიშვნელოვანია თითოეული ობიექტისათვის სიკაშკაშის სხვადასხვა სტადიებზე ნაკადის საშუალო სიჩქარის დასადგენად.

### *მოცანა 3. დღეების რიგის ცვალებადობების კვლევა*

ამ შემთხვევაში შევისწავლით ისეთი რიგის ცვალებადობებს, რომელიც მხოლოდ რამდენიმე დღე გრძელდება, ასეთი დროითი მასშტაბის ანთებითი პროცესის ევოლუცია რიგ შემთხვევებში ატარებს არათანაბარ ხასიათს, სიკაშკაშის ზრდისა და კლების სიჩქარეები მკვეთრად განსხვავდებიან ანთების სხვადასხვა ეტაპებზე. დღეების რიგის ცვალებადობების შესწავლა საშუალებას გვაძლევს გამოვავლინოთ ნაკადთა ძალიან სწრაფი ცვალებადობები, ისეთები, რომლებიც მხოლოდ რამდენიმე საათი გრძელდება. მოცემული ამოცანის განხორციელების მიზნით ვიყენებთ დღე-ღამეზე გასაშუალოებული

ნაკადებით აგებულ სიკაშკაშის მრუდებს და ვსწავლობთ სპექტრულ პარამეტრთა “ყოფაქცევებს” მოცემული ცვალებადობის დროს.

*ამოცანა 4. რენტგენული მიკროცვალებადობების კვლევა.*

ასეთი მიკროცვალებადობები განისაზღვრება, როგორც ერთ დღე-ღამეზე ნაკლები დროითი მასშტაბის მქონე ცვალებადობები. ამ მოვლენებისთვისაც ვსწავლობთ ცვალებადობის იმავე პარამეტრებს, რაც გვექონდა წინა ქვეამოცანების შემთხვევაში. გარდა ამისა, ამ დროს ვახდენთ ხანმოკლე ცვალებადობების (მიკროცვალებადობები, ხანმოკლე რენტგენული ანთებები) განაწილების შესწავლას, ხანგრძლივი ანთებებისა და ობიექტის სიმშვიდის (მკრთალი მდგომარეობა) ეპოქების მიმართ. ასეთი კვლევები ძალზედ მნიშვნელოვანია სამიზნე ობიექტში არსებული ყველაზე მცირე არაერთგვაროვნებებისა და ბლაზართა ყველაზე შიდა არეებში მიმდინარე ძალიან სწრაფი, არასტაციონარული პროცესების შესასწავლად.

*ამოცანა 5. სპექტრის სხვადასხვა უბანში არსებულ ცვალებადობებს შორის კორელაციის შესწავლა*

ცვალებადობის თითოეული ტიპისათვის (ხანგრძლივი და ხანმოკლე ანთებები, დღეების რიგის და მიკროცვალებადობები) ვახდენთ შესაბამისი "აქტივობის კოეფიციენტის" შესწავლას (Duty Cycle - დაკვირვების სრული დროისა და დროის იმ ნაწილის ფარდობა, რომლის განმავლობაშიც ობიექტი ამჟღავნებდა ცვალებადობას). სამუშაო სრულდება სპექტრული პარამეტრებისთვისაც. ამ შემთხვევაშიც ვადგენთ ენერგიის სპექტრული განაწილების მაქსიმუმის მდებარეობას, ფოტონთა ინდექსს, სიმრუდის პარამეტრს, სპექტრის სიხისტეს და შევისწავლით მათ შორის კორელაციებს. შევისწავლით რბილი (0.3-2 კევ) და ხისტი (2-10 კევ) რენტგენული ნაკადების კორელაციებს ერთმანეთთან და



სპექტრულ პარამეტრებთან, ასევე ურთიერთკორელაციებს სპექტრის სხვადასხვა უბნებს შორის. ასეთი კვლევების შედეგად, ჩვენ შეგვიძლია მივიღოთ მნიშვნელოვანი ინფორმაცია, ნაწილაკთა აჩქარების სხვადასხვა მექანიზმებს შორის უპირატესის შესახებ.

## თავი 4. კვლევის მეთოდისა

### 4.1. რენტგენული დაკვირვებების დროითი ანალიზი

რენტგენული სიკაშკაშის ცვალებადობების ძიების დროს, სიკაშკაშის მრუდების აგებას ვახდენთ ნაკადის დროის მიხედვით გარკვეული ინტერვალებით გასაშუალებას ისე, რომ მივიღოთ რაც შეიძლება ნაკლები სიგნალი-ხმაურთან ფარდობა. ობიექტის სიკაშკაშიდან გამომდინარე ვირჩევთ გასაშუალებას სხვადასხვა სიდიდის დროითი ინტერვალებით. ამ ოპერაციის წარმოება და ფონის გამოკლება ხდება *Xronos*-ის პროცედურა *Icurve*-ს მეშვეობით (იხ. მე-6 თავი). ნაკადის ცვალებადობის სანდოობის 99.9% დონეზე დადგენას კი ვახდენთ  $\chi^2$ -ტესტის მეშვეობით. ცვალებადობის დასახასიათებლად (Saito et al. 2013, ApJ, 766, 11-ის მიხედვით) ვიყენებთ სიკაშკაშის გაორმაგების მინიმალურ დროით მასშტაბს, რომელსაც ვითვლით:  $\tau_{d,h} = \Delta t \times \ln(2) / \ln(F_2 / F_1)$  მიხედვით, ან ვპოულობთ სიკაშკაშის ზრდისა და კლების დროით მასშტაბებს, მაქსიმუმის მომენტსა და ანთების ასიმეტრიულობას (Hayashida et al. (2015)-ის მიხედვით):

$$F(t) = F_0 + \frac{b}{e^{-(t-t_0)/\tau_{rise}} + e^{(t-t_0)/\tau_{fall}}} \quad (4.1)$$

ამ ფუნქციაში, ყოველი  $\tau_{rise}$  და  $\tau_{fall}$  შეესაბამება, სიკაშკაშის აღმავლობისა და დაცემის დროით მახასიათებლებს, ხოლო -  $t_0$  მაქსიმუმის მომენტს (იგი გამოსახავს ნამდვილ მაქსიმუმს მოლოდ სიმეტრიული სიკაშკაშისას), ზოგადად კი ანთების მაქსიმუმი ( $t_p$ ) შესაძლებელია აიხსნას ზედა ტოლობის პარამეტრების გამოყენებით შემდეგნაირად:

$$t_p = t_0 + \frac{\tau_{rise} \tau_{fall}}{\tau_{rise} + \tau_{fall}} \ln\left(\frac{\tau_{fall}}{\tau_{rise}}\right) \quad (4.2)$$

ყოველი გამოვლენილი ცვალებადობისათვის ვითვლით ცვალებადობის "ფარდობით ამპლიტუდას" და შესაბამის ცდომილებებს შემდეგნაირად (Vaughan, S., et al. 2003):

$$F_{\text{var}} = (S^2 - \overline{\sigma_{\text{err}}^2})^{1/2} / \overline{F}$$

$$\text{err}(F_{\text{var}}) = \left\{ \left( \sqrt{\frac{1}{2N} \frac{\sigma_{\text{err}}^2}{\overline{F}^2 F_{\text{var}}}} \right)^2 + \left( \sqrt{\frac{\sigma_{\text{err}}^2}{N} \frac{1}{\overline{F}}} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (4.3)$$

სადაც  $S^2$  - მონაცემთა დისპერსიაა,  $\overline{\sigma_{\text{err}}^2}$  - საშუალო კვადრატული გადახრა, ხოლო  $\overline{F}$  - ნაკადის საშუალო მნიშვნელობა. ნაკადის ცვლილებისას მისი კვაზი-პერიოდულობის გამოსავლენად პირველ რიგში ვაგებთ ლომბ-სკარგლის (Lomb–Scargle) პერიოდოგრამას (LSP; Lomb 1976; Scargle 1982), რომელიც წარმოადგენს ფურიეს-გარდაქმნის ტექნიკასა და გამოიყენება დროითი მწკრივების ( $g_n$ ) არათანაბარი განაწილებისას (VanderPlas 2018). გამოვლენილი პერიოდულობის არსებობის გადამოწმება შესაძლებელია ე.წ. შეწონილი ვეივლეტ Z-გარდაქმნის (WWZ-ის) მეთოდის გამოყენებით (Foster (1996)).

$$\text{WWZ} = \frac{(N_{\text{eff}} - 3)V_y}{2(V_x - V_y)} \quad (4.4)$$

სადაც  $N_{\text{eff}}$  არის ე.წ. მონაცემთა წერტილების ეფექტური რაოდენობა, ხოლო  $V_x$  და  $V_y$  შესაბამისად არიან:  $x(t)$  მონაცემებისა და  $y(t)$  ფუნქციის მოდელის შეწონილი ვარიაციები. თუ გვაქვს დროში თანაბრად განაწილებული დაკვირვებები, მაშინ ვიყენებთ PSD (Power Spectral Density) მეთოდს. ცვალებადობის დროით მასშტაბებს ვასწორებთ კოსმოლოგიურ ეფექტზე ( $H_0 = 72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ,  $\Omega_M = 0.26$  და  $\Omega_\Lambda = 0.74$ )(e.g., Dunkley et al. 2009), რომელთა მნიშვნელობები საზოგადოდ გამოიყენება თანამედროვე პრაქტიკაში.

მონაცემთა დამუშავებისას, პროგრამათა სპეციალური პაკეტის *XSPEC* -ის დახმარებით ვახდენთ სპექტრულ "არხთა" დაჯგუფებას იმგვარად, რომ მივიღოთ მინიმუმ 20 ფოტონი თითო ჯგუფში, რათა შეგვეძლოს  $\chi^2$  - სტატისტიკის გამოყენება. თუ ექსპოზიცია საკმაოდ ხანმოკლეა (ობიექტი მკრთალია), მაშინ ამ ბრძანებამ შესაძლოა მოგვცეს ფოტონთა ძალიან მცირე რაოდენობა და შედეგად მივიღოთ ძალიან მაღალი ცდომილებები მოცემულ სპექტრულ პარამეტრთა მნიშვნელობებისთვის. სანაცვლოდ ვიყენებთ კაშის სტატისტიკას (Cash Statistic), ხოლო მოდელის ვარგისიანობას ვადგენთ goodness-of-fit მეთოდის მეშვეობით. ყოველი ობიექტისათვის ვახდენთ გალაქტიკური წყალბადის მშთანთქმელი სვეტის  $N_H$  მნიშვნელობის ფიქსირებას, რომელიც კონკრეტული

ობიექტისათვის განსაზღვრულია Leiden/Argentine/Bonn (LAB) -ის მომობილვის მიხედვით (Kalberla et al. 2005).

#### 4.2. რენტგენული დაკვირვებების სპექტრული ანალიზი

სპექტრული ანალიზისას ჩვენ ვიყენებთ, როგორც მარტივ ხარისხოვან მოდელს (PL) (Takahashi et al.1996)

$$F(E) = KE^{-\Gamma} \quad (4.5)$$

(სადაც  $\Gamma$ -წარმოადგენს ფოტონ-ინდექსს სრულ 0.3-10კეე დიაპაზონში, ხოლო  $K$ -მანორმირებელ მამრავლს) ასევე ლოგარითმულ-პარაბოლურ (LP) მოდელს, შემდეგი სახით (Massaro et all. 2004):

$$F(E) = K\left(\frac{E}{E_1}\right)^{-(a+b \log(\frac{E}{E_1}))} \text{ ფოტონი } \text{სმ}^{-2} \text{წმ}^{-1} \text{კეე}^{-1} \quad (4.6)$$

(სადაც  $E_1=1$ კეე,  $a$  წარმოადგენს ფოტონ-ინდექსს 1 კეე-ზე ხოლო  $b$  სიმრუდის პარამეტრს,  $K$ -მანორმირებელ მამრავლს,  $E$  - ფოტონის ენერგიაა 0.3-10 კეე უბანში). ამ პარამეტრთა მნიშვნელობები მიიღება მოდელთან "მორგების" პროცესში. ენერგიის სპექტრული განაწილების  $E_p$  პიკის მდებარეობასა და ნაკადის მნიშვნელობას პიკზე ვითვლიდით შემდეგნაირად (Massaro et al. (2004):

$$E_p = 10^{(2-\alpha)/2b} \text{ კეე} \quad (4.7)$$

$$S_p = 1.6 \times 10^{-9} K 10^{(2-\alpha)^2/4b} \text{ ერგი } \text{მ}^{-2} \text{წმ}^{-1} \quad (4.8)$$

მიღებულ სპექტრული ანალიზის შედეგებს გამოვსახავთ შესაბამის ცხრილების სახით. თუ სპექტრი არ არის გამრუდებული, მაშინ სიმრუდის  $b$  პარამეტრი განისაზღვრება სანდოობის  $1\sigma$ -ზე დაბალ დონეზე და ხარისხოვანი მოდელი კარგად აღწერს სპექტრს, მაგრამ თუ სიმრუდე ზღვრულია ამ შემთხვევაშიც ვახდენდით სპექტრის "მორგებას" ლოგარითმულ-პარაბოლურ მოდელთან და შევისწავლიდით მიღებული  $\chi^2$ -

მნიშვნელობების განაწილებას ენერგიების მიხედვით (F-ტესტი). თუ ამ უკანასკნელმა უჩვენებდა გარკვეული "ტენდენციები" ენერგიის ცვლილებასთან ერთად, რომელსაც არ აქვს ადგილი მარტივ ხარისხოვანი მოდელირებისას, მაშინ ვთვლით, რომ სპექტრი მართლაც გამრუდებულია და  $b$ -ს მიღებულ მნიშვნელობებს ვიყენებთ შემდგომი ანალიზისათვის.

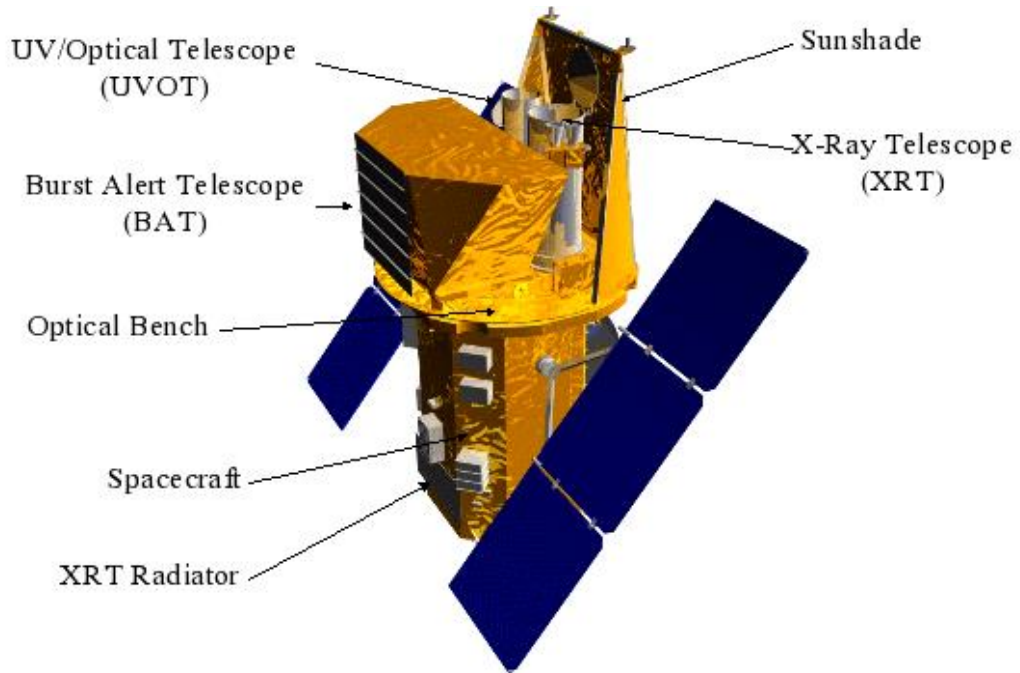
ნაკადის ცვალებადობისა და სპექტრულ პარამეტრთა განაწილების ხასიათის შესწავლას ვახდენდით კოლმოგოროვ-სმირნოვის ტესტის მეშვეობით და ვაგებთ შესაბამის ჰისტოგრამებს, სიმეტრიული განაწილების მაქსიმუმს ვპოულობთ გაუსისეული რეგრესიის მეშვეობით, ვითვლით მათ საშუალო მნიშვნელობებსა და ვარიაციებს. არასიმეტრიული განაწილების შემთხვევაში კი მის მაქსიმუმს ვპოულობთ ბეტა ან ლოგ-ნორმალური ფუნქციის მოდელირების მეშვეობით. ვითვლით მათ საშუალო და მედიანურ მნიშვნელობებს, ასიმეტრიის სიდიდესა და ვარიაციას. ორ სიდიდეს შორის კორელაციას ვეძებთ 99% სანდოობის დონით, რისთვისაც ვაგებთ "გაზნევის მრუდეს" და ვპოულობთ შესაბამის კორელაციის პირსონისეულ  $r$ -კოეფიციენტს და  $p$ -შანსს.

## თავი 5. "სვიფტის" რენტგენული ტელესკოპი (Swift XRT-Telescope)

### 5.1. თანამგზავრი "სვიფტი"

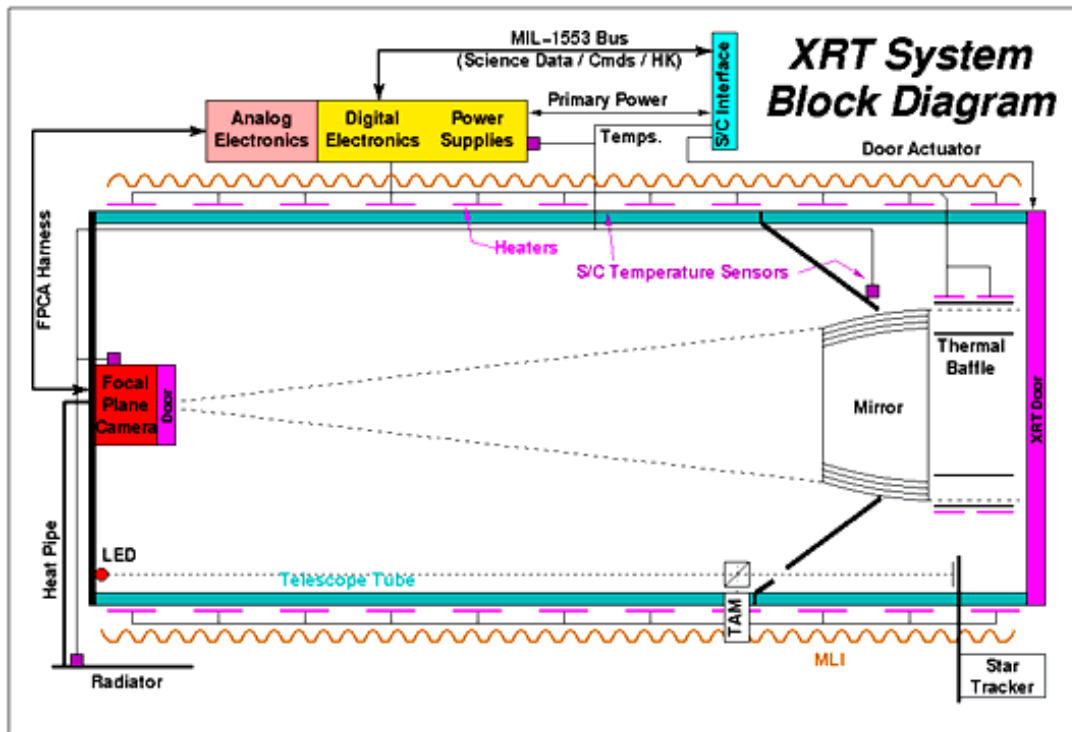
თანამგზავრი Swift-ი (Neil Gehrels *Swift* Observatory) წასას მიერ გაშვებული იყო 2004 წელს 20 ნოემბერს (მიმდინარე ეტაპზე მისია ამოწურულია) მისიის მთავარი სამეცნიერო ამოცანა გამა გაელვებების აღმოჩენა, მათი კვლევა და წარმომავლობის დადგენაა.

თანამგზავრზე დამოტაჟებული გამა გაელვების აღმოჩენი ტელესკოპი ახორციელებს ცის მონიტორინგს და გაელვების აღმოჩენის შემთხვევაში გადართავს ხომალდს ავტონომიურ რეჟიმში, გაელვების რენტგენულ და ულტრაიისფერ/ოპტიკური ტელესკოპის მხედველობის არეში მოსაქცევად (ნახ. 5.1). ასეთი ტიპის ავტონომიური ფუნქციონირება საშუალებას იძლევა წარმოებულ იქნას დაკვირვება გაელვების აღმოჩენიდან 20-70 წამში. რენტგენული ტელესკოპის დაკვირვებებს შეუძლიათ გამოავლინონ გამოსხივების ხაზები, რომლებსაც შეუძლიათ გამა-გაელვების წარმომშობი არის სტრუქტურასა და მის შემადგენლობაზე მოგვაწოდონ მნიშვნელოვანი ინფორმაცია.



**ნახ. 5.1** თანამგზავრი სვიფტი და სხვადასხვა ინსტრუმენტების განლაგება მასზე

Swift-ის რენტგენული სარკე იყენებს FM3 სარკეთა ერთობლიობას, რომელიც შექმნილია და დაკალიბრებულია JET-X-პროგრამისათვის. იგი შედგება 12 კონცენტრული ოქროთი დაფარული ელექტროფორმირებული ნიკელის გარსისგან, ფოკუსური მანძილით 3500 მმ. გარსების სიგრძე 600 მმ. ხოლო დიამეტრი 191 და 300 მმ- მდეა. სარკეების წერტილის განაწილების ფუნქცია და ეფექტური ზედაპირი გაიზომა სხვადასხვა ენერგიებისა და დაცემის კუთხეებისათვის. მისი ბოლო კალიბრაცია მოხდა 2000 წლის ივლისში (ნახ. 5.2)



ნახ. 5.2 Swift-ის რენტგენული ტელესკოპის (JET-X Wolter I) სქემა

*Swift XRT-ის მუხტთკავშირიანი მიმღების ძირითადი მახასიათებლები:*

- მიმღების ტიპი: e2v CCD-22
- მიმღების ფორმატი: 600x600 პიქსელი
- პიქსელის ზომა: 40 x 40 მკმ
- პიქსელის ზომა: 2.36 სეკუნდი/პიქსელი
- ხედვის ველი: 23.6 x 23.6 არკ მინუტი
- წერტილის განვრცობის ფუნქცია: 18 სეკუნდი 1.5 კევ-ზე, 22 სეკუნდი 8.1 კევ-ზე.
- დამიზნების სიზუსტე: 3 სეკუნდი
- დროითი გარჩევადობა: 0.14 მწმ, 1.8 მწმ ან 2.5 წმ.
- ენერგეტიკული ზღვრები: 0.2-10 კევ.
- ენერგეტიკული გარჩევადობა: 140 ევ. 5.9 კევ-ზე.
- ეფექტური ზედაპირი: ~ 125 სმ<sup>2</sup> 1.5 კევ, ~20 სმ<sup>2</sup> 8.1 კევ



- მგრძობიარობა:  $2 \times 10^{-14}$  ერგი  $\text{cm}^{-2} \text{წმ}^{-1}$  104 წამში.

*რენტგენული ტელესკოპის ფუნქციონირების რეჟიმები:*

XRT -ს აქვს ვადასხვა ფუნქციონირების რეჟიმები და მათი გამოყენება დამოკიდებულია ობიექტის სიკაშკაშეზე.

✓ **გამონასახის რეჟიმი:** მოცემულ რეჟიმში მიმღები მუშაობს, როგორც ოპტიკური. ამ რეჟიმში კრებს დაგროვილ მუხტებს და კითხვა მიმდინარეობს რენტგენული გამოსხივების ამოცნობის გარეშე. მომავალში ეს მონაცემები არ აგენერირებენ სპექტროსკოპიულ მონაცემებს, მაგრამ აფიქსირებენ გაელვების ზუსტ მდებარეობას და კარგად აფასებენ ნაკადს.

✓ **ავტომატური რეჟიმი:** იმისათვის, რომ თანამგზავრმა სვიფთმა მოახდინოს მყისიერი რეაგირება ახალ მიზნებზე, ამისათვის საჭიროა, რომ ინსტრუმენტებმა იმუშაონ ავტომატურ რეჟიმში. ტელესკოპი შექმნილია ისეთნაირად, რომ შეძლოს ავტომატურად ფუნქციონირება და გადართვა სხვადასხვა რეჟიმებს შორის.

✓ **ფოტოდოდის რეჟიმი:** ეს რეჟიმი გამოიყენება ძალიან კაშკაშა ობიექტების დროში ცვალებადობის დასადგენად. ამ რეჟიმისას ხდება მონაცემების თითოეული პიქსელიდან მოსული ინფორმაციის დროის დადგენა და პარალელური და მიმდევრობითი რეგისტრიდან ინფორმაციის ამოღება.

✓ **ფანჯრული დროითი (Windowed Timing) რეჟიმი:** რეჟიმი 200 სვეტისგან შემდგარი ფანჯრის (ასევე დასაშვებია ფანჯრის სხვა ზომა) საშუალებით ახდენს ცენტრალური 8 მინუტის ფანჯრის გარდაქმნას. ინფორმაცია შემოსაზღვრულია ერთი მხრიდან, მაგრამ სვეტები მორიგეობით ენაცვლებიან ერთმანეთს და მთლიანობაში წარმოქმნიან სრულ გამონასახს. 200 სვეტისაგან შემდგარი ფანჯრისთვის ამ რეჟიმის დროითი გაფართოება 1.8 მწმ-ს შეადგენს. ზემოთხსენებული რეჟიმი ხელსაყრელია, როდესაც ნაკადი 5000 mCrab-ზე ( $1 \text{Crab} = 2.4 \times 10^8$  ერგი  $\text{cm}^{-2} \text{წმ}^{-1}$ ) მცირეა და მინიმალური პილაპი (pileup) 1000 mCrab-ის ნაკადის დროს აქვს. FITS ბინარული ფაილების (რომლების

შეიცავენ ინფორმაციას 1 განზომილებიანი მდებარეობის, მოსვლის დროის, ენერჯის შესახებ) დამუშავება დედამიწაზე ხორციელდება.

✓ **ფოტონთა-თვლის (Photon Counting) რეჟიმი:** ფოტონთა-თვლის (Photon Counting) რეჟიმი: შეიცავს როგორც სრულ გამონასახის, ასევე სპექტროსკოპიულ ინფორმაციას, მაგრამ დროითი გარჩევადობა მხოლოდ 2,5 წამია. თვლის რეჟიმი იყენებს მიმღების "ნორმალურ" წაკითხვის თანმიმდევრობას, რომლის დროსაც მთლიანი მიმღების წაკითხვა ხდება ყოველ 2.5 წამში. ეს რეჟიმი მოსახერხებელია, როდესაც ნაკადი 1 mCrab-ზე ნაკლებია. FITS ფაილში არსებული მონაცემთა დამუშავება დედამიწის ზედაპირზე ხდება.

## 5.2 დაკვირვებული მასალის დამუშავება

*HEAsoft* წარმოადგენს მაღალი-ენერჯიების მონაცემთა დამუშავების ძირითად პროგრამათა სისტემას, რომელიც თავის მხრივ მოიცავს *FTOOLS*, *XSPEC*, *Ximage*, *Xronos* პაკეტებს (მათი შესაბამისი დეტალური ინსტრუქციები კი სხვადასხვა ფორმატში ხელმისაწვდომია ვებ-გვერდზე <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/lheasoft/>), რომელთა საშუალებითაც შესაბამისად ხდება სხვადასხვა ოპერაციები დაკვირვებათა ფაილების მიმართ, სპექტრული, გამოსხივების ნაკადის დროში ცვალებადობისა და გამონასახის ანალიზი.

*HEAsoft*-ს მოვიპოვებთ *HEASARC*-დან (NASA's Archive of Data on Energetic Phenomena) და თან შევარჩევთ ქვე-პაკეტებს, რომლებიც შეესაბამებიან თანამგზავრ *Swift*-ს. კვლევის ჩატარებისათვის აუცილებელი "ნედლი" დაკვირვებითი მასალის მიღება რომელიც ხელმისაწვდომია *HEASARC*-დან ნებისმიერი მკვლევარისათვის.

*Swift*-*XRT* დაკვირვებების შემთხვევაში მივმართავდით *xrtpipeline* პროგრამას (რომელიც შედის *HEAsoft*-ის შემადგენლობაში), იგი ქმნის სპექტრებსა და გამონასახებს "ნედლი" დაკვირვებითი მასალის ფილტრაციის სტანდარტული კრიტერიუმებისა და კალიბრაციის ბაზის უახლესი ვერსიის გამოყენების შედეგად. შემდეგ ვქმნით საკვლევი

ობიექტისა და ფონის შესაბამის სიკაშკაშის მრუდებსა და სპექტრებს extract curve და extract spectrum პროცედურების მეშვეობით.

დაკვირვებული მასალის ჩამოსატვირთად შევდივართ ვებ გვერდზე:

<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/W3Browse/w3browse.pl>

- ველში: Object Name or Coordinates: ვწერთ ობიექტის სახელწოდებას (მაგ. *Mrk421*), განყოფილებაში What missions and catalogs do you want to search? მოცემულია თანამგზავრების ჩამონათვალი სადაც მოვნიშნავთ Swift-ს.
- განყოფილებაში What types of information do you want to search for? მოვნიშნავთ Archived data and observations და შემდეგ ვირჩევთ Detailed Mission/Catalog Search.
- ახლადგამოტანილ გვერდზე ავირჩევთ ბმულს: Swift Master Catalog და ვირჩევთ Submit Search

ახლადგამოტანილ გვერდზე ვირჩევთ ბმულს: swiftmaster: Swift Master Catalog. გამოვა ცხრილი, სადაც ვირჩევთ დაკვირვებას შესაბამისი საინდენტიფიკაციო ნომრით (მაგ.00030352001). მეორე სვეტში ვირჩევთ ბმულს სახელით "D". ახალ გვერდზე მოვნიშნავთ სექციებს XRT All Data (xrt) და Auxil Data (auxil) შემდგომ ვირჩევთ TAR Selected Products. გამოტანილი ბმულის <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/FTP/retrieve/w3browse/w3browse-317121.tar> საშუალებით გადმოვწერთ დასამუშავებელ მასალას.

Linux-ის გარემოში ვხსნით ტერმინალს და მასში ვწერთ "heainit" (მოცემულ კომპიუტერზე უკვე დაყენებულია Heasoft-ი და მისი გაშვება ხდება ამ ბრძანების მეშვეობით) (შემდგომში გამოყენებულ ბრძანებათა დეტალური აღწერა იხილეთ: [http://swift.gsfc.nasa.gov/analysis/xrt\\_swguide\\_v1\\_2.pdf](http://swift.gsfc.nasa.gov/analysis/xrt_swguide_v1_2.pdf)). შემდეგ ვახდენთ ზემოთხსენებულ სამივე ეტაპის განხორციელებას xrtpipeline სკრიპტის მეშვეობით:

```
xrtpipeline indir=/home/bk/swift/421/ 00030352001outdir=/home/bk/swift/421/ 30352001prod  
steminputs=35031002 stemoutputs=DEFAULT srcra=110427srcdec=38.1231 runaspect=no  
aberration=no exprpcgrade=0-12 seedxrtcalpci=-1457 randomizexrtcalpci=yes picorrtype=TOTAL  
savepinom=no phamin=0 createexpomap=yes useexpomap=yes cleanup=no clobber=yes
```

*addcol=no cleancols=no correctlc=yes exitstage=3 obsmode=ALL usesrcdethkproc=yes datamode=ALL >& /home/bk/swift/421/pipexrt27f.log*

ამ დროს ხორციელდება დაკვირვებითი მასალის დამუშავების სამი ძირითადი ეტაპი:

**I-ეტაპი:** "წედლი" დაკვირვებითი მასალის კალიბრაცია სვიფტის საკალიბრაციო ბაზაში არსებული ფაილების, თანამგზავრის პოზიციური ინფორმაციისა და ინსტრუმენტული ფაილების საფუძველზე. მიიღება პირველი დონის კალიბრირებული ფაილები.

კალიბრაცია დამოკიდებულია მასალის მიღების დროს გამოყენებულ რეჟიმზე და მოიცავს რამდენიმე საფეხურს.

- 1) ცის კოორდინატების გამოთვლა
- 2) ბაიესის (სიჩუმის ხმაური "bias") გამოკლება
- 3) ცუდი პიქსელის (სვეტის) მონიშვნა
- 4) ცხელი პიქსელის იდენტიფიკაცია
- 5) ფოტონების მოსვლის დროის რეკონსტრუქცია
- 6) "მოვლენების" რეკონსტრუქცია
- 7) ფოტონის ენერჯის კალიბრაცია

**II-ეტაპი:** კალიბრირებული მონაცემების "გაფილტვრა" სპეციფიკური პარამეტრების მიხედვით (მუხტოკავშირიანი მიმღების ტემპერატურა, დასაკვირვებელი ობიექტის კუთხე მზის მიმართ და ა.შ.). შედეგად ვღებულობთ მეორე დონის გაწმენდილ "მოვლენათა" ფაილებს. მონაცემთა გაფილტვრის ეტაპი: აგენერირებს გასუფთავებულ ფაილებს, რომლებიც მეცნიერულ მოთხოვნებთან შესაბამისობაში არიან მოყვანილნი.

"გაფილტვრის" კრიტერიუმები შესაძლებელია დაჯგუფებულ იქნას სამ კატეგორიად:

*თანამგზავრის პოზიციური პარამეტრები:*

- *ELV* >= 30 *Elevation Angle* - კუთხური დაშორება სამხრეთ ატლანტიკური ანომალიიდან.
- *BR\_EARTH* >= 120 *Bright Earth Angle* - კუთხე დედამიწის ცენტრის მიმართულებასთან.

- $UN\_ANGLE \geq 45$  Sun Angle - კუთხური დაშორება მზის მიმართულებაზე.
- $MOON\_ANGLE \geq 14$  Moon Angle - კუთხური დაშორება მთვარის მიმართულებაზე.

ინსტრუმენტული პარამეტრები:

- $CCDTemp \geq -102$  &  $CCDTemp \leq -47$  CCD temperature- მუხტოკავშირიანი მიმღების ტემპერატურა.
  - $Vod1 \geq 29.8$  &  $Vod1 \leq 30.25$  Output Drain Voltage for Amp 1- პირველი გამაძლიერებლის გამომავალი ძაბვა.
  - $Vod2 \geq 29.30$  &  $Vod2 \leq 29.80$  Output Drain Voltage for Amp 2- მეორე გამაძლიერებლიდან გამომავალი ძაბვა.
  - $Vrd1 \geq 16.40$  &  $Vrd1 \leq 16.80$  Reference Voltage for Amp 1- პირველი გამაძლიერებლის საბაზისო ძაბვა
  - $Vrd2 \geq 16.45$  &  $Vrd2 \leq 16.90$  Reference Voltage for Amp 2- მეორე გამაძლიერებლის საბაზისო ძაბვა.
  - $Vsub \geq -0.1$  &  $Vsub \leq 0.1$  Substrate Bias Voltage- პიქსელის „საფენის“ ბაიესის ძაბვა.
- $Vbackjun \geq -0.1$  &  $Vbackjun \leq 0.1$  Back Junction Bias Voltage- უკუგადასვლის ბაიესის ძაბვა.

"მოვლენათა" მახასიათებლები:

- ხარისხი 0-2 (WT რეჟიმისათვის), 0-5 (PD რეჟიმისათვის), 0-12 (PC რეჟიმისათვის)
- სტატუსი ("კარგი" მოვლენა) STATUS==b0 მოცემული დაკვირვებისათვის

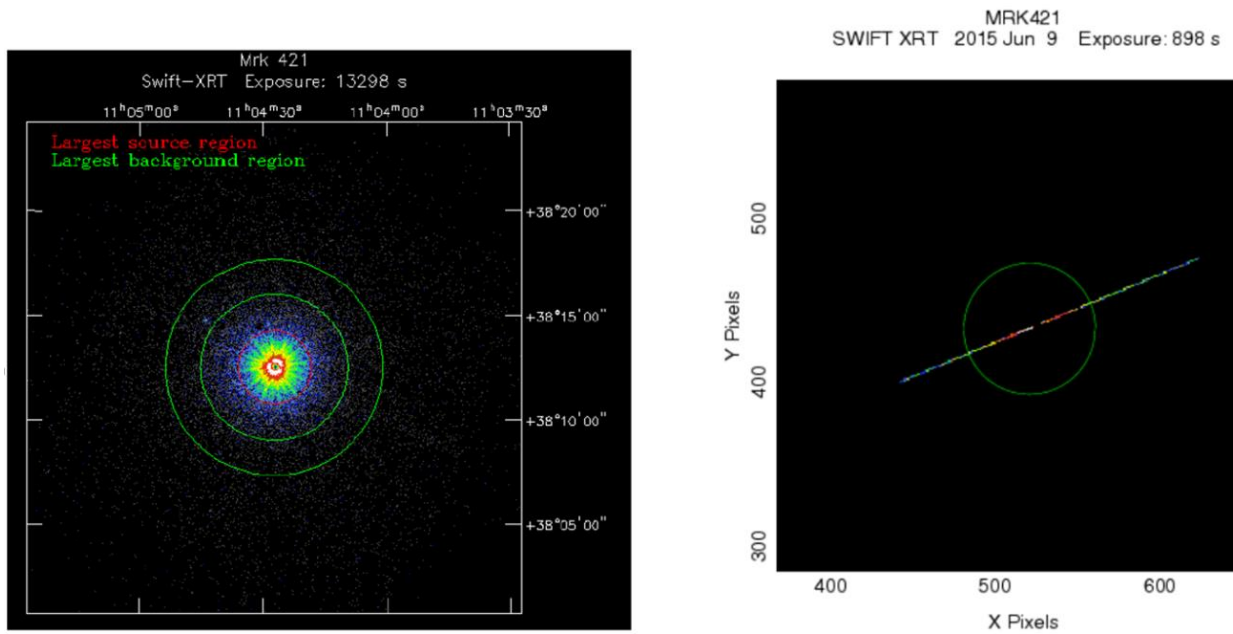
ინსტრუმენტული და პოზიციური პარამეტრები ინახება (mkf) გაფართოების მქონე "ფილტრის ფაილში". ზემოთმოყვანილი ფილტრაციის კრიტერიუმების საფუძველზე ხდება დროის "კარგი" (Good Time Intervals (GTIs) ) ინტერვალების შერჩევა, ხოლო ამ უკანასკნელთა საფუძველზე კი ხდება მოვლენათა ფაილიდან სიკაშკაშის მრუდისა და სპექტრის გენერაცია.

*III-ეტაპი:* სტანდარტული მაღალი დონის სამეცნიერო პროდუქტების (სპექტრების, სიკაშკაშის მრუდების, გამონასახების) გენერაცია მეორე დონის მოვლენების ფაილებიდან. პროგრამა Xrtproducts:

- ქმნის მაღალი დონის პროდუქტებს: გამონასახებს, სპექტრებს და სიკაშკაშის მრუდებს. თუ მოხდა სპექტრების წარმოქმნა იგი ასევე აგენერირებს შესაბამის ARF ფაილებს xrtmkarf -პროგრამის ის გამოყენებით. ყოველივე ეს ხორციელდება *HEASoft*-ის პაკეტი XSELECT-ის ფარგლებში (რომელიც შეგვიძლია გამოვიყენოთ ნებისმიერი თანამგზავრის მიერ მიღებული მასალისათვის).
- ამ ეტაპზე ასევე ხდება ექსპოზიციის რუკის შექმნა xrtexpomap -პროგრამის მეშვეობით. ექსპოზიციის რუკაზე მონიშნულია მუხტოკავშირიანი მიმღების ცუდი პიქსელები, ცხელი წერტილები, პოზიციის ცვლილება და თუ საჭიროა ტელესკოპის ვინეტირება. ამ რუკის საფუძველზე ხდება ამ ეფექტების კორექტირება xrtmkarf-პროგრამის საშუალებით.

შემდეგ ვახდენთ ფოტომეტრიული არეების შექმნას საკვლევი ობიექტისა და ფონისათვის *Ximage* პროგრამის გამოყენებით:

```
ximage cpd /xtk  
read/ecol=pi/emin=20/emax=1000/size=600 sw00030352001xwtw2po_cl.evt  
disp  
read/exposure/size=600 sw00030352001xwtw2po_ex.img
```



ნახ. 5.3 "Swift-XRT"-დან მიღებული Mrk421-ის რენტგენული გამონასახი, რომელიც შესრულებულია "ფოტონთა თვლის" (PC; მარცხნივ) და "ფანჯრული დროითი" (WT; მარჯვნივ) რეჟიმებში.

ნახ.5.3 -ის მარცხენა დაკვირვება შესრულებულია Photon Counting რეჟიმში, მიღებული გამონასახის შემდეგ შევარჩევთ საკვლევი ობიექტისა და ფონის ანათვლის გასაზომ არეებს circle/new ბრძანების მეშვეობით, ამ დროს კურსორი ხდება აქტიური და ვნიშნავთ მოცემულ არეებს, ვკმნით შესაბამის "რეგიონ"-ფაილებს:

```
ximage
cpd /xtk read/ecol=pi/emin=20/emax=1000/size=1200 sw00035025020xpcw3po_cl.evt
disp read/exposure/size=600 sw00035025020xpcw3po_ex.img
```

ამის შემდეგ ვებებთ ობიექტის გამონასახის ცენტრს შემდეგი ბრძანების მეშვეობით:

```
centroid/deriv
```

შემდეგ ვკმნით ობიექტის შესაბამის რეგიონ-ფაილს:

*cp sw00035025020xpcw3po.reg src\_pc.reg*  
*emacs src\_pc.reg*

ვირჩევთ კონცენტრულ რეგიონს, რომლის შიდა რადიუსი 3 პიქსელია, ხოლო გარე 20 პიქსელი. არის ცენტრი ემთხვევა ზემოთხსენებული ბრძანებით ნაპოვნ ცენტრს.

CIRCLE (438.40936,482.12280,40)  
-CIRCLE (438.40936,482.12280,5)

ცენტრალური 3 პიქსელი რადიუსის მქონე წრიული არეს ვჭრით იმიტომ, რომ 0.5 ანათვალი/წმ ნაკადის შემთხვევაში ადგილი აქვს გადაჯერების ეფექტს (Pile-up), როდესაც 2 ან მეტ დაბალენერგიულ ფოტონს მიმღები აღიქვავს, როგორც მათი ჯამური ენერგიის მქონე ერთ ფოტონს. შედეგად სპექტრი გამოდის რეალურთან შედარებით ხისტი, ხოლო ცენტრალურ "ინფიცირებულ" პიქსელებზე ანათვალი გვექნება გაცილებით დაბალი ვიდრე ნორმალური სიტუაციის შემთხვევაში. შემდეგ შევარჩევთ ფონის შესაბამის არეს:

*cp src\_pc.reg bgd\_*  
*pc.reg emacs bgd\_pc.reg*

ამჯერადაც ვირჩევთ კონცენტრულ არეს გამონასახის ცენტრის მიმართ, რომლის შიდა რადიუსი 80, ხოლო გარე 120 პიქსელია (დამოკიდებულია წყაროს სიკაშკაშეზე).

CIRCLE (438.40936,482.12280,120)  
-CIRCLE (438.40936,482.12280,80)

ამის შემდეგ ვამოწმებთ არეების განლაგებას:

*ximage cpd /xtk read/ecol=pi/emin=20/emax=1000/size=1200 sw00035025020xpcw3po\_cl.evt*  
*disp*  
*read/exposure/size=600 sw00035025020xpcw3po\_ex.img*  
*circle/disp src\_pc.reg*  
*circle/disp bgd\_pc.reg*

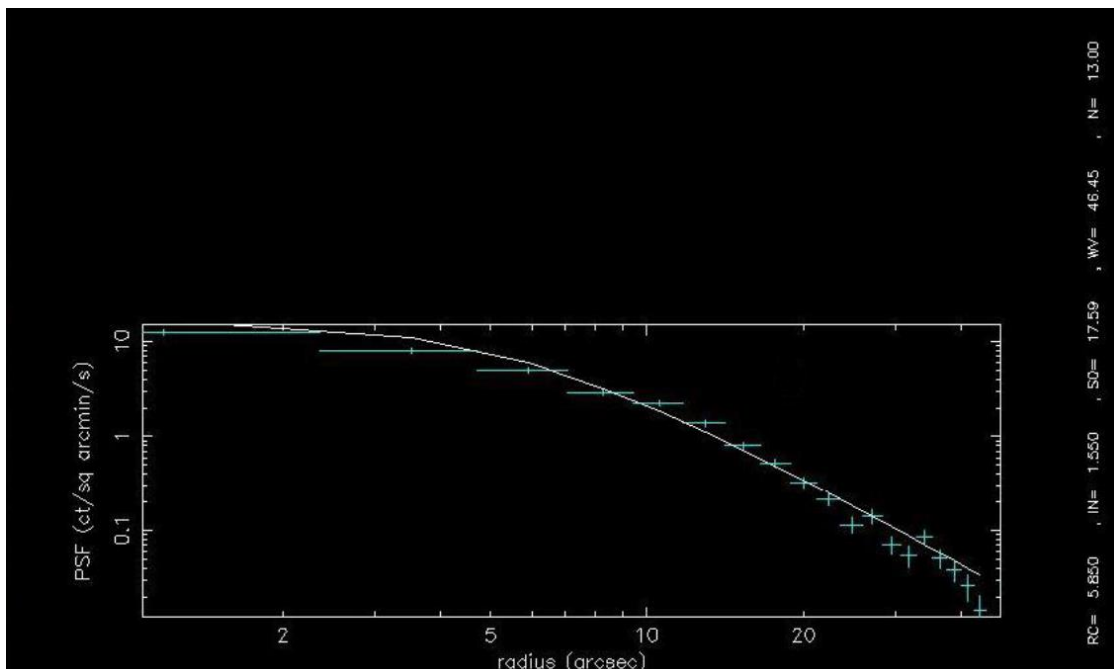


შემდეგ ვამოწმებთ მოცემულ არეში რამე კაშკაშა ობიექტი ან ცხელი პიქსელები ხომ არ არის შემდეგი ბრძანების საშუალებით:

```
detect/bright
```

ამის შემდეგ ვაზუსტებთ გადაჯერებული არის ზომას (3 პიქსელი აღებულია საორიენტაციოდ) და ამისათვის ვიყენებთ ქინგის მოდელს

```
psf/cur  
col of 1 2 3 4 6  
plot  
resca x 15 50  
mo king  
5.85 -1  
1.55 -1  
fit  
rescale x
```



მოცემული გამონასახი უჩვენებს, რომ ცენტრალურ 3 პიქსელზე ანათვლები უფრო დაბალია, ვიდრე გვექნებოდა გადაჯერების არარსებობის შემთხვევაში - ისინი

მდებარეობენ ქინგის მოდელის მიხედვით აღდგენილი გამონასახის (თეთრი უწყვეტი წირი) ფარგლებს გარეთ. ამის შემდეგ ვაზუსტებთ გამონასახის რეგიონ-ფაილს:

```
emacs src_pc.reg  
CIRCLE (438.40936,482.12280,40)  
-CIRCLE (438.40936,482.12280,6)
```

შემდეგ ვახდენთ საკვლევი ობიექტის სპექტრისა და სიკაშკაშის მრუდის ამოღებას:

```
xselect prefix=c  
set mission SWIFT  
yes  
read event sw00035025020xpcw3po_cl.evt ./  
set image sky  
extract curve expo=0.0  
filter region src_pc.reg  
filter grade 0-12  
extract curve expo=0.0  
save curve outfile=src_pc_sw00035025020xpcw3po.lc clobber=yes  
extract spectrum  
save spectrum outfile=src_pc_sw00035025020xpcw3po.pha clobber=yes  
extract event  
save event outfile=src_pc_sw00035025020xpcw3po.evt clobber=yes  
quit
```

იგივეს ვაკეთებთ ფონისთვისაც:

```
xselect prefix=c  
set mission SWIFT  
yes  
read event sw00035025020xpcw3po_cl.evt ./  
set image sky  
extract curve expo=0.0  
filter region bgd_pc.reg  
filter grade 0-12  
extract curve expo=0.0  
save curve outfile=bgd_pc_sw00035025020xpcw3po.lc clobber=yes  
extract spectrum  
save spectrum outfile=bgd_pc_sw00035025020xpcw3po.pha clobber=yes
```

```
extract event
save event outfile=sw00035025020xpcw3po.evt clobber=yes
quit
```

საკვლევი ობიექტის სიკაშკაშის მრუდს შევასწორეთ სხვადასხვა ეფექტზე (გადაჯერება, "ცხელი" და "ცივი" პიქსელები, კოსმოსური სხივები, ვინეტირება და ა. შ.)

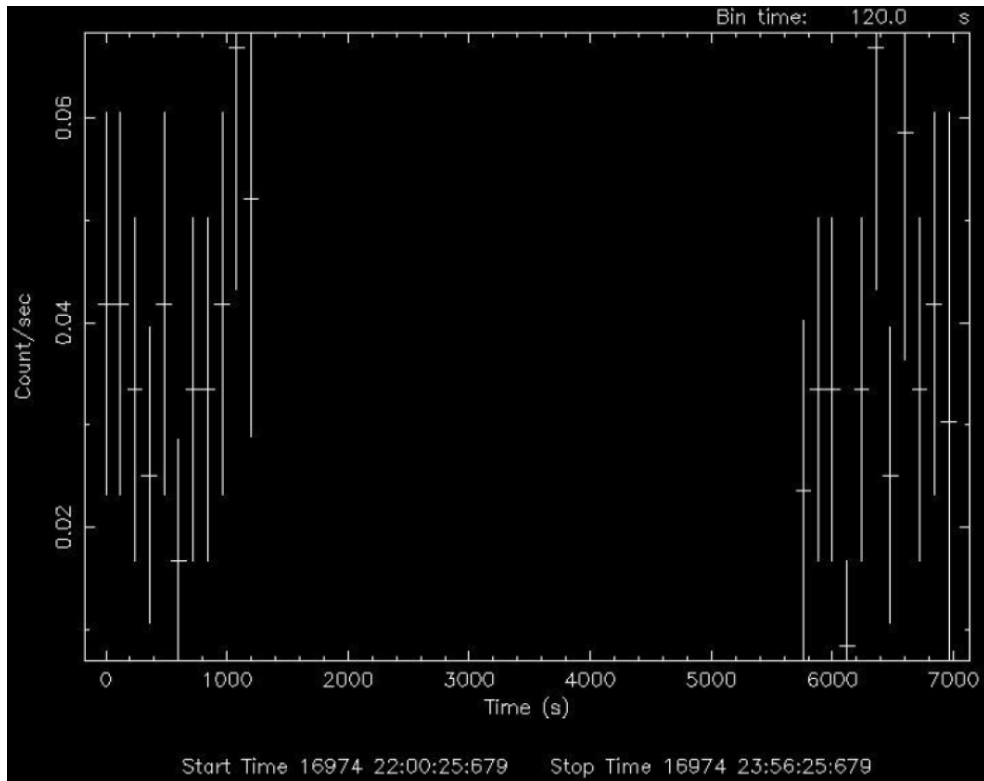
```
xrtlccorrlcfile=src_pc_sw00036231019xpcw3po.lcinstrfile=sw00036231019xpcw3po_rawinstr.img
.gzoutfile=src_pc_sw00036231019xpcw3po_corr.lccorrfile=src_pc_sw00036231019xpcw3po_corr
act.fits srcx=-1 srcy=-1 psffile=CALDB psfflag=yes energy=1.5 regionfile=none
attfile=sw00036231019sat.fits.gz hdf=sw00036231019xhdtc.hk outinstrfile=DEFAULT
infile=${file2} createinstrmap=no clobber=yes
```

იგივეს ვახდენთ ფონის სიკაშკაშის მრუდის მიმართაც:

```
xrtlccorr lcfile=bgd_pc_sw00036231019xpcw3po.lc
instrfile=sw00036231019xpcw3po_rawinstr.img.gz
outfile=bgd_pc_sw00036231019xpcw3po_corr.lc corrfile=${bgdprefix}_${pref}_corract.fits srcx=-
1 srcy=-1 psffile=CALDB psfflag=no energy=1.5 regionfile=none attfile=sw00036231019sat.fits.gz
34
hdf=sw00036231019xhdtc.hk outinstrfile=DEFAULT infile=${file2}
createinstrmap=noclobber=yes
```

შემდეგ ვახდენთ ფონისა და საკვლევი ობიექტის სიკაშკაშის მრუდების გრაფიკულ წარმოდგენას 120– წამიანი (2 წთ) დროითი ბიჯების მიხედვით. პირველ რიგში, ამ ოპერაციას ვასრულებთ ფონის მიმართ.

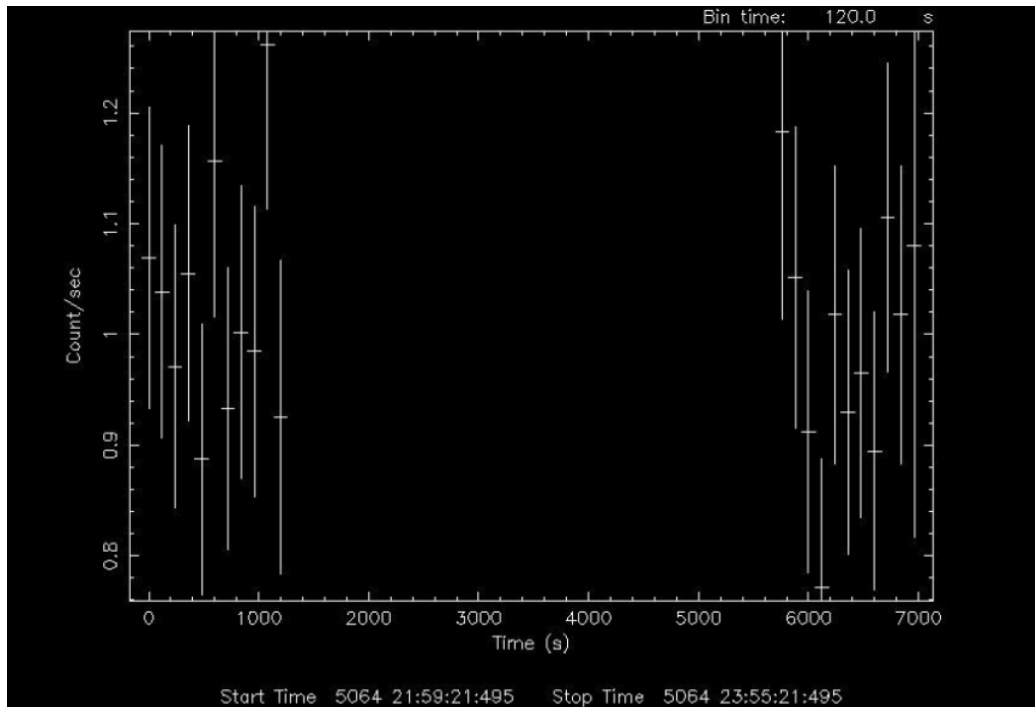
მივიღებთ შემდეგ გამონასახს:



ფონის ანათვლებს ვაკლებთ ობიექტისას და ვღებულობთ ამ უკანასკნელის სიკაშკაშის მრუდს 120-წამიანი ბიჯებით:

```
lcurve tunits=0 window="-" outfile="ciccio.flc" plot=yes plotdev="/xw" nbint=100000 nser=1
cfile1="src_pc_sw00036231019xpcw3po_corr.lc sd0.003 of" dtnb=120
we src_bgd_120s
```

მიღებული სიკაშკაშის მრუდი გამოიყურება შემდეგნაირად:



შესაბამის რიცხვით მონაცემებს ვინახავთ ფაილის სახით შემდგომი ანალიზისათვის. ამის შემდეგ ვახდენთ მოცემული დაკვირვების შესაბამისი სპექტრის ანალიზს. ჯერ ვახდენთ მის კორექტირებას სხვადასხვა ეფექტებზე და ვამზადებთ ანალიზისათვის

```
Xrtmkarf outfile=src_pc_sw00036231019xpcw3po.arf
phafile=src_pc_sw00036231019xpcw3po.pha srcx=-1 srcy=-1 psfflag=yes clobber=yes
sw00036231019xpcw3po_ex.img
fkeyprint src_pc_sw00036231019xpcw3po.arf resp
ln -s $CALDB/data/swift/xrt/cpf/rmf/swxpc0to12s6_20130101v014.rmf
grppha src_pc_sw00036231019xpcw3po.pha ciccio.tmp comm="chkey respfile
swxpc0to12s6_20130101v014.rmf & chkey ancfile src_pc_sw00036231019xpcw3po.arf & chkey
ba7ckfile bgd_pc_sw00036231019xpcw3po.pha & exit" clobber=yes
grppha ciccio.tmp src_pc_grp20.pha comm="bad 0-30 & group min 20 & sh all & exit"
clobber=yes
rm ciccio.tmp
```

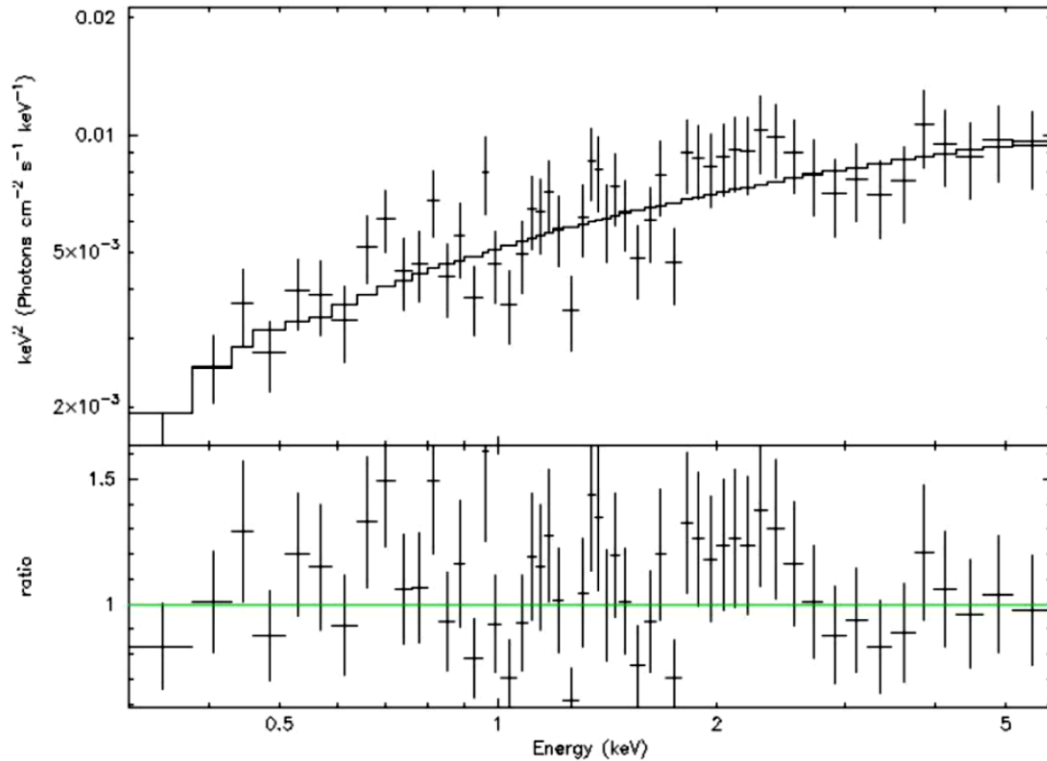
*XSPEC* პროგრამის მეშვეობით ხდება სპექტრული ანალიზი და თეორიული მოდელის შერჩევა და ვახდენთ სპექტრულ ანალიზს მოცემული მოდელის გამოყენებით (მოცემული სპექტრისათვის ოპტიმალური აღმოჩნდა ხარისხოვანი მოდელი (PL))

```
xspec  
data src_pc_grp20.pha  
cpd /xs  
setplot energy  
plot ldata  
ignore bad  
plot ldata  
model wabs(power)
```

ამის შემდეგ პროგრამას ინტერაქტიულ რეჟიმში ვაწვდით პარამეტრთა სხვადასხვა მნიშვნელობებს. პირველ რიგში იგი გვთხოვს გალაქტიკური წყალბადის მშთანთქმელი სვეტის მნიშვნელობას ( $N_H$ ), რომელსაც ვპოულობთ HEASARC-თან არსებული პროგრამის Total Galactic HI Column Density Calculator (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/Tools/w3nh.pl>) მეშვეობით და მიღებული რიცხვითი მნიშვნელობის შემდეგ მოვახდენთ თეორიული მოდელის "მორგებას" (fit) დაკვირვებულ სპექტრზე:

```
fit 10000  
pl ldata ratio  
pl eeufspec ratio
```

მივიღებთ შემდეგ გამონასახს:

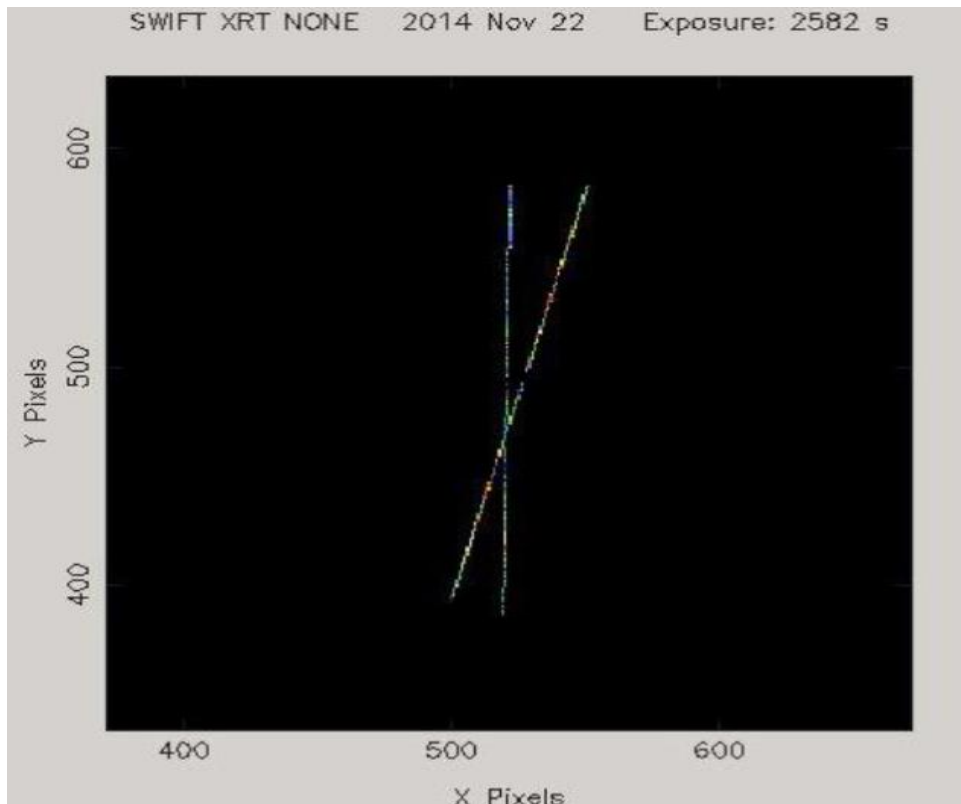


ქვედა პანელი გვაძლევს თითოეულ სიხშირეზე დაკვირვებული და თეორიული სპექტრული მნიშვნელობების ფარდობას ("ნარჩენები"). რადგან ეს ფარდობები პრაქტიკულად სიმეტრიულადაა განლაგებული 1-ის ირგვლივ ნიშნავს, რომ თეორიული მოდელი კარგად აღწერს დაკვირვებულ სპექტრს. გარდა ამისა დაყვანილი ხი-კვადრატი უდრის 1.065-ს 51-ის ტოლი თავისუფლების ხარისხით. რაც ასევე მიუთითებს გამოყენებული მოდელის მართებულობაზე.

editmod wabs\*cflux(pow) პროცედურის მეშვეობით ვახდენთ გამოსხივების ნაკადის მნიშვნელობის გამოთვლას სპექტრის 0.3–2, 2–10 და 0.3–10 კილოელექტრონვოლტ უბნებში ერგი/სმ<sup>2</sup>/წმ ერთეულებში, თან ვახდენთ მათ შესწორებას ჩვენი გალაქტიკის შთანთქმვაზე, სპექტრული პარამეტრებისა და ნაკადების მნიშვნელობებისათვის.

გარდა Photon Counting რეჟიმისა, ობიექტები ზოგიერთ შემთხვევაში დაკვირვებული იქნა Windowed Timing რეჟიმშიც, როდესაც ისინი უჩვენებდნენ შედარებით დაბალ სიკაშკაშეს. მოცემულ რეჟიმში დაკვირვებითი მასალა მოითხოვს განსხვავებულ დამუშავებას. მაგ. როდესაც თანამგზავრი სვიფტი საკვლევ ობიექტს აკვირდება ორი სხვადასხვა ორბიტის

შესრულებისას, შესაბამისი გამონასახები (ცალკეული წრფე თითოეული ორბიტისათვის) ერთმანეთის მიმართ ქმნიან კუთხეს, რაც შეუძლებელს ხდის გამოვიყენოთ ერთიდაიგივე რეგიონ-ფაილები თითოეული ორბიტისათვის. ასეთ დროს გამონასახი გამოიყურება შემდეგნაირად:

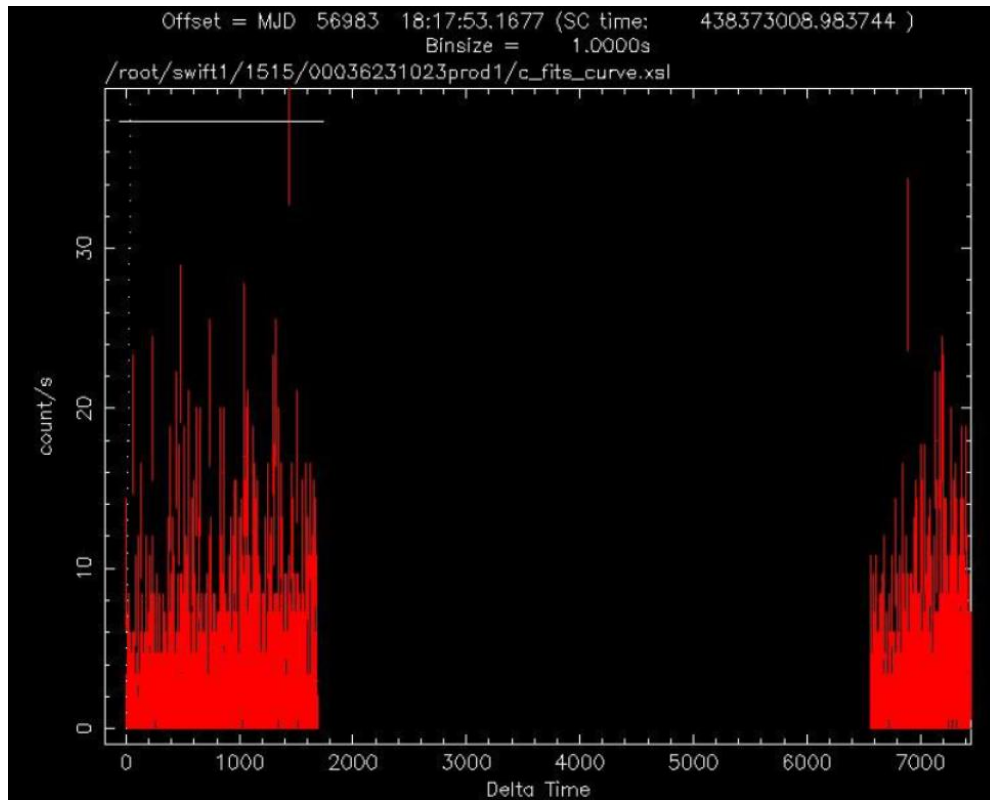


აქედან გამომდინარე, მოცემული დაკვირვების შესაბამისი event-ფაილი უნდა დავყოთ ორ ნაწილად (თითოეული ორბიტის შესაბამისად)

```
xselect prefix=c
read event sw00030352036xwtw2po_cl.evt ./
yes
extra curve expo=0.0
filter time cursor
```

მივიღებთ შემდეგ გამონასახს:





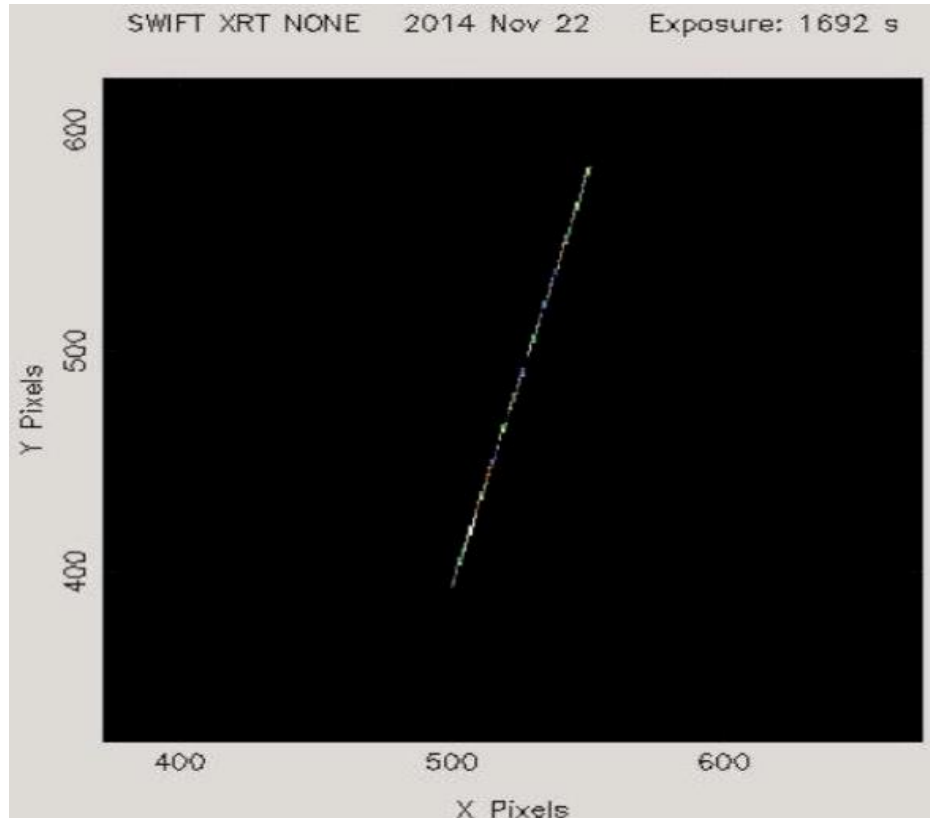
შემდეგ გამოვყოფთ პირველი ორბიტის შესაბამის გამონასახს (მარცხენა წითელი ფერის სექტორი) და მისგან ვქმნით ახალ event-ფაილს:

```

mv c_cursor_gti001.xsl orb1_wt.xsl
xselect prefix=c
set mission SWIFT
read event sw00030352036xwtw2po_cl.evt ./
extra curve expo=0.0
filter time file orb1_wt.xsl
extra event
save event orb1_wt_cl.evt clobber=yes
exit
fappend sw00030352036xwtw2po_cl.evt"+3" orb1_wt_cl.evt
xrtepomap infile=orb1_wt_cl.evt attfile=sw00030352036pat.fits.gz
hdfile=sw00030352036xhdtc.hk outdir=./ stemout=orb1_wt_cl clobber=yes
ximage
cpd /xtk
read/ecol=pi/emin=20/emax=1000/size=600 orb1_wt_cl.evt
disp
read/exposure/size=600 orb1_wt_cl_ex.img

```

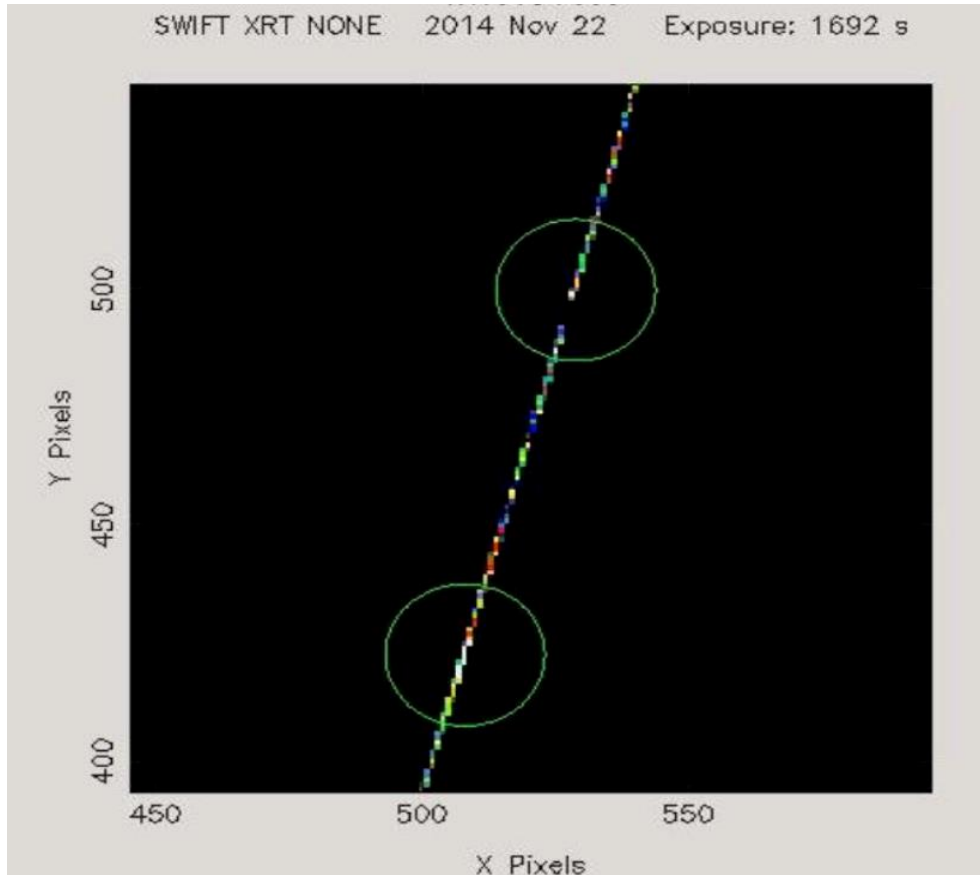
მივიღებთ პირველი ორბიტის შესაბამის დამოუკიდებელ გამონასახს:



შემდეგ ვქმნით საკვლევი ობიექტისა და ფონის შესაბამის რეგიონ-ფაილებს:

```
circle/new
mv orb1_wt_cl.reg orb1_wt.reg
emacs orb1_wt.reg
mv orb1_wt_cl.reg orb1_bgd_wt.reg
emacs orb1_bgd_wt.reg
ximage
cpd /xtk
read/ecol=pi/emin=20/emax=1000/size=600 orb1_wt_cl.evt
disp
read/exposure/size=600 orb1_wt_cl_ex.img
circle/disp orb1_wt.reg
circle/disp orb1_bgd_wt.reg
```

ვლელობთ შემდეგ გამონახას, სადაც მწვანე წრეებით მონიშნულია საკვლევო ობიექტისა და ფონის შესაბამისი ფოტომეტრული არეები.



შემდეგ ვახდენთ საკვლევო ობიექტის სპექტრისა და სიკაშკაშის მრუდის მიღებას.

```
xselect prefix=c
set mission SWIFT
yes
read event orb1_wt_cl.evt ./
set image sky
extract curve expo=0.0
filter region orb1_wt.reg
filter grade 0-2
extract curve expo=0.0
save curve outfile=src_wt_orb1.lc clobber=yes
extract spectrum
save spectrum outfile=src_wt_orb1.pha clobber=yes
```

```
extract event
save event outfile=src_wt_orb1.evt clobber=yes
quit
```

იგივეს ვაკეთებთ ფონისთვისაც:

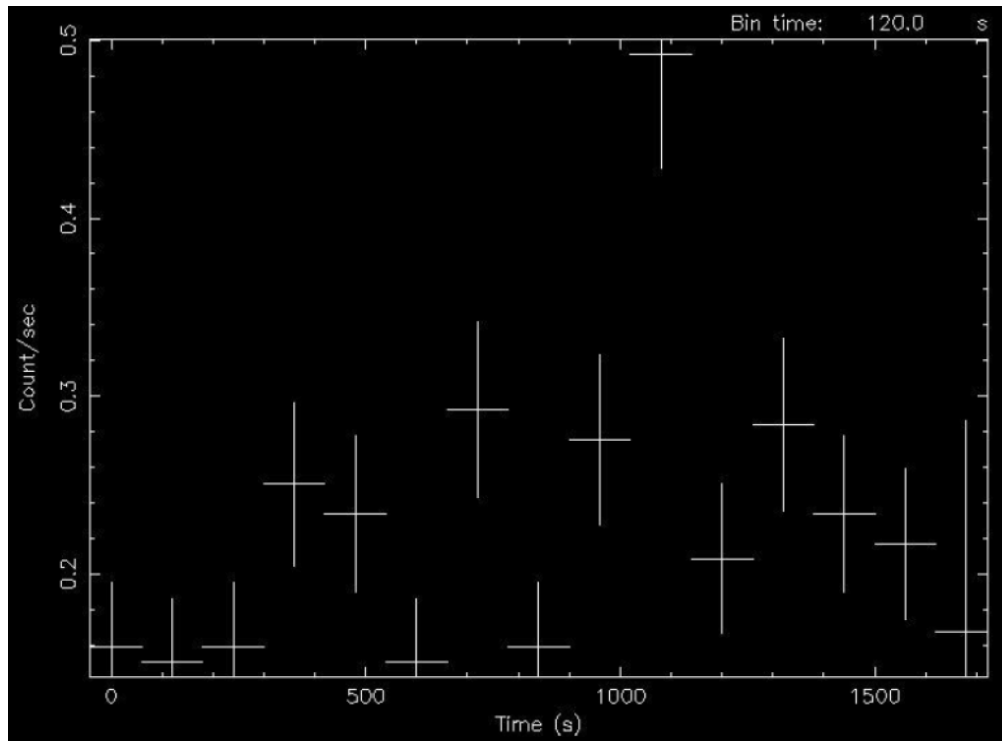
```
xselect prefix=c
set mission SWIFT
yes
read event orb1_wt_cl.evt ./
set image sky
extract curve expo=0.0
filter region orb1_bgd_wt.reg
filter grade 0-2
extract curve expo=0.0
save curve outfile=bgd_wt_orb1.lc clobber=yes
extract spectrum
save spectrum outfile=bgd_wt_orb1.pha clobber=yes
extract event
save event outfile=bgd_wt_orb1.evt clobber=yes
quit
```

საკვლევი ობიექტისა და ფონის შესაბამის სიკაშკაშის მრუდებს შევასწორეთ სხვადასხვა ეფექტზე:

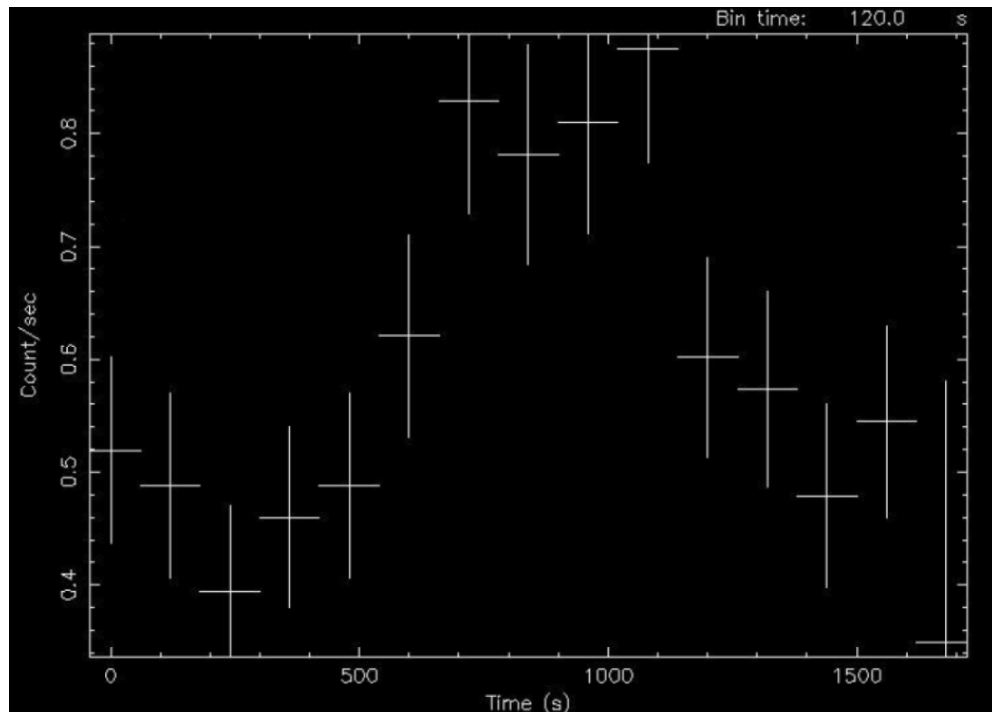
```
xrtlccorr lcfile=src_wt_orb1.lc instrfile=sw00030352036xwtw2po_rawinstr.img.gz
outfile=src_wt_orb1_corr.lc corrfile=orb1_corrfact.fits srcx=-1 srcy=-1 psffile=CALDB psfflag=yes
energy=1.5 regionfile=none attfile=sw00030352036sat.fits.gz hdfile=sw00030352036xhdtc.hk
outinstrfile=DEFAULT infile=${file2} createinstrmap=no clobber=yes
xrtlccorr lcfile=bgd_wt_orb1.lc
```

```
xrtlccorr lcfile=bgd_wt_orb1.lc instrfile=sw00030352036xwtw2po_rawinstr.img.gz
outfile=bgd_wt_orb1_corr.lc corrfile=${bgdprefix}_${pref}_orb1_corrfact.fits srcx=-1 srcy=-1
psffile=CALDB psfflag=no energy=1.5 regionfile=none attfile=sw00030352036sat.fits.gz
hdfile=sw00030352036xhdtc.hk outinstrfile=DEFAULT infile=${file2} createinstrmap=no
clobber=yes
```

მივიღებთ ფონის სიკაშკაშის მრუდს 120-წამიანი ბიჯით:



შემდეგ ვლებულობთ საკვლევი ობიექტის სიკაშკაშის მრუდს (ფონის ანათვლები გამოკლებულია):



გამოვთვლით მოცემული დაკვირვების შესაბამის ნაკადს (სიკაშკაშის მრუდებს, ვაგებთ Matlab-ის ფორმატში).

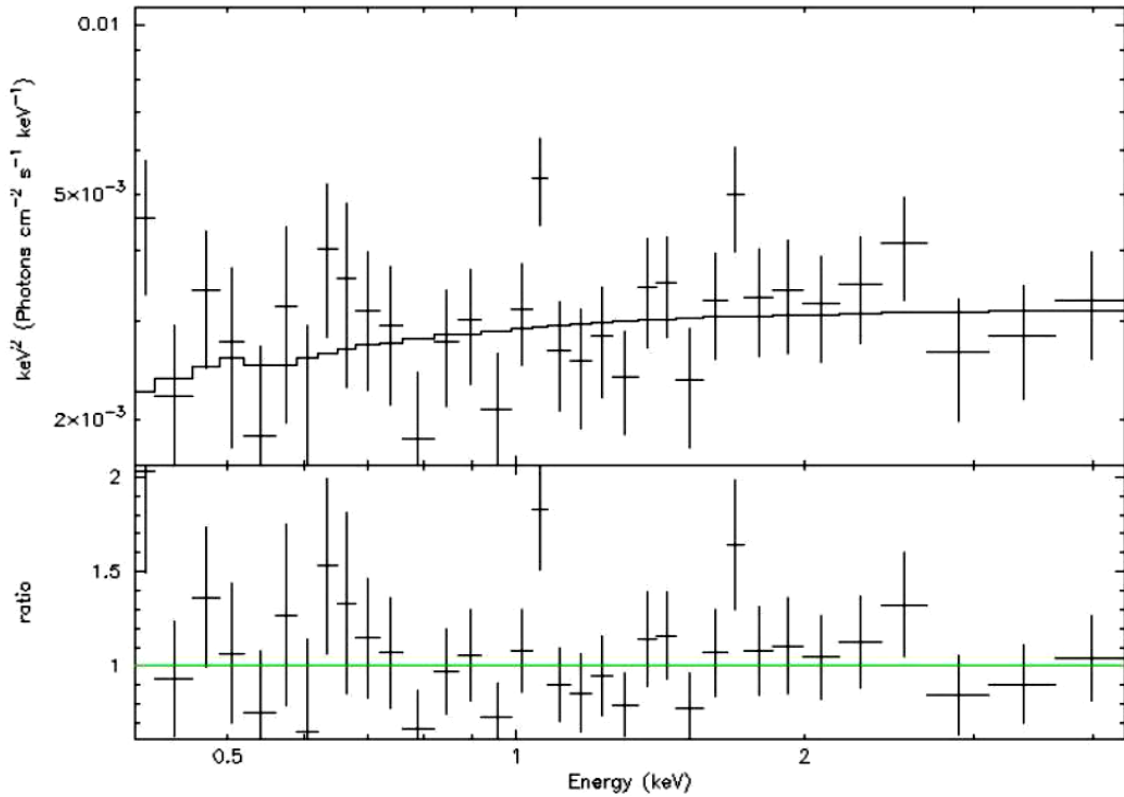
შემდეგ ვახდენთ იმავე დაკვირვების სპექტრულ ანალიზს. შესაბამის სპექტრი დაგვყავს ანალიზისათვის აუცილებელ სახემდე და ვქმნით დამხმარე ფაილებს:

```
xrtmkarf outfile=src_wt_orb1.arf phafile=src_wt_orb1.pha srcx=-1 srcy=-1 psfflag=yes
clobber=yes
sw00030352036xwtw2po_ex.img
fkeyprint src_wt_orb1.arf resp
ln -s $CALDB/data/swift/xrt/cpf/rmf/swxwt0to2s0_20010101v012.rmf
grppha src_wt_orb1.pha ciccio.tmp comm="chkey respfile swxwt0to2s0_20010101v012.rmf &
chkey ancrfile src_wt_orb1.arf & chkey backfile bgd_wt_orb1.pha & exit" clobber=yes
grppha ciccio.tmp src_wt_orb1.pha comm="bad 0-30 & group min 20 & sh all & exit" clobber=yes
rm ciccio.tmp
```

მოცემულ შემთხვევაში ოპტიმალური აღმოჩნდა ლოგარითმულ-პარაბოლური მოდელი (Log-Parabola) და ვახდენთ სპექტრულ ანალიზს მოცემული მოდელის გამოყენებით

```
xspec
data src_wt_orb1.pha
cpd /xserve
setplot energy
plot ldata
ignore bad
plot ldata
model wabs(logpar)
fit 100000
pl ldata ratio
```

მიღებული სპექტრი და მასზე მორგებული თეორიული მრუდი გამოიყურება შემდეგნაირად:



ქვედა პანელი მოიცავს მოდელირების "ნარჩენებს" ენერგიის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის. პროგრამა გამოთვლის სპექტრული პარამეტრების მნიშვნელობებს. შემდეგ გამოვთვლით მოცემული სპექტრული ანალიზის შესაბამის ნაკადის მნიშვნელობებს 0.3-2 კევ, 2-10 კევ და 0.3-10 კევ დიაპაზონებში, რომელიც "განთავისუფლებულია" გალაქტიკური შთანთქმისაგან (იხ. მაგ. ცხრილი 4 შესაბამისი მნიშვნელობებისათვის):

*editmod wabs\*cflux(logpar)*

იგივე პროცედურას ვიმეორებთ მეორე ორბიტის შესასაბამისი დაკვირვებისთვისაც.

## თავი 6. კვლევების ძირითადი შედეგები და დასკვნები

### 6.1. "სვიფტის" დაკვირვებები, შვიდ შორეულ მაღალენერგიული პიკის მქონე ლაცერტიდზე

(Publication: **Astrophysics and Space Science**, Volume 365, Issue 4, article id.66 (2020))

შვიდი შორეული ( $z \geq 0.5$ ), ამ დრომდე ნაკლებად გამოკვლეული ლაცერტიდის დროითმა ანალიზმა, რომელიც დაფუძნებული იყო 2006 წლის აგვისტოდან 2015 წლის ივლისამდე "Swift-XRT"-ის მიერ წარმოებული დაკვირვებების საარქივო მასალაზე დაყრდნობით, გამოავლინა რენტგენული გამოსხივების მრავალგვარი ცვალებადობა 0.3-10 კეე უბანში, დაწყებული 1 დღიანი ფლუქტუაციებიდან დამთავრებული რამდენიმე თვის ხანგრძლივობის დროითი მასშტაბის მქონე ცვალებადობებით ( იხ. ცხრილი 2. და ნახ. 6.1)

*(აქ წარმოდგენილი ნახაზებისა და ცხრილების სრულად გაცნობა შესაძლებელია შესაბამის სტატიებში, რომელიც ხელმისაწვდომია ქვემოთ მითითებული ბმულების მეშვეობით)*



**ცხრილი 2.** სვიფტის რენტგენული ტელესკოპის მიერ წარმოებული დაკვირვებების დროითი ანალიზის შედეგები (ამონარიდი სტატიიდან). პირველი სვეტი მოიცავს კონკრეტული დაკვირვებების საიდენტიფიკაციო ნომერს; მეორე და მესამე სვეტებში მოყვანილია დაკვირვების დასაწყისისა და დასასრულის მსოფლიო დრო; მეოთხე სვეტში დაკვირვების დასაწყისის შესაბამისი მოდიფიცირებული იულიუსისეული დრო; მეხუთე სვეტი მოიცავს კონკრეტული დაკვირვების შესაბამის „კარგი დროითი ინტერვალის“ (Good Time Interval) ხანგრძლივობას; მეექვსე სვეტში მოცემულია თითოეული დაკვირვების შესაბამისი რენტგენული გამოსხივების ნაკადი ცდომილებებთან ერთად; მეშვიდე სვეტში მოცემულია დროითი "ბიჯის" სიდიდე, რომელიც გამოყენებულია შესაბამისი სიკაშკაშის მრუდის ასაგებად; მერვე სვეტში მოყვანილია მოცემული დაკვირვების შესაბამისი დაყვანილი "ხი-კვადრატის" მნიშვნელობები და თავისუფლების ხარისხი (დაკვირვების მსვლელობისას სიკაშკაშის ცვალებადობის გამოსავლენად); ბოლო სვეტი გვაძლევს ინფორმაციას იმის შესახებ, ჰქონდა თუ არა ადგილი სიკაშკაშის ცვალებადობას მოცემული დაკვირვების განმავლობაში: V-ნიშნავს, რომ ობიექტი განიცდიდა ცვალებადობას, ხოლო NV- არა.

ObsID (1)	Obs. Start (UTC) (2)	Obs. End (UTC) (3)	MJD (4)	Exp.(s) (5)	Mean Flux (6)	Bin Size (s) (7)	$\chi^2$ /d.o.f. (8)	Var. (9)
J0033–1921								
00037546001	2008-11-09 03:47:01	2008-11-09 05:02:19	54718.2	1657	0.23(0.02)	60	1.303/26	NV
00037546002	2008-11-11 15:34:00	2008-11-11 19:56:39	54720.6	2946	0.26(0.01)	60	0.696/47	NV
00037546003	2008-11-13 00:59:00	2008-11-14 00:24:22	54722.0	2837	0.18(0.02)	60	1.251/39	NV
00037546004	2008-11-15 15:38:01	2008-11-16 00:47:06	54724.7	3940	0.24(0.01)	60	0.888/61	NV
00038359001	2009-02-01 23:12:00	2009-02-02 23:29:28	54863.9	3397	0.12(0.02)	60	0.976/18	NV
00038359002	2009-05-08 00:08:01	2009-05-08 23:43:55	54959.0	4769	0.53(0.03)	60	1.131/22	NV
J0204–3333								
00091397001	2012-04-26 03:41:01	2012-04-26 11:42:18	56043.2	2484	0.20(0.02)	60	1.249/40	NV
00091397002	2012-04-27 10:01:01	2012-04-27 23:05:25	56044.4	5031	0.20(0.01)	60	0.808/81	NV
00091397003	2012-04-29 11:56:00	2012-04-30 23:29:04	56045.5	8642	0.24(0.01)	60	1.100/100	NV
00091397004	2012-05-01 00:34:01	2012-05-01 08:05:38	56048.0	3725	0.26(0.01)	60	0.660/60	NV
J1137–1710								
00091402001	2013-01-19 16:51:59	2013-01-19 17:01:26	56311.7	321	0.35(0.06)	60	0.632/4	NV
00091402002	2013-02-03 09:35:59	2013-02-03 10:29:36	56326.4	321	0.16(0.03)	60	1.042/4	NV

BZB J0033–1921: ობიექტი სვიფტის რენტგენული ტელესკოპის მიერ 2008 წლის 9 ნოემბრიდან 2009 წლის 8 მაისის შუალედში დაკვირვებული იყო 19-ჯერ, სრული ექსპოზიციით დროით 19.5 კ წმ. ამ პერიოდში 0.3-10 კეე ნაკადმა გამოავლინა ძლიერი ხანგრძლივი რენტგენული ცვალებადობა, ნაკადის მნიშვნელობათა მაქსიმუმი-

მინიმუმთან ფარდობით 4.5. 2009 წლის 1 თებერვლიდან 8 მაისამდე პერიოდში კი დაფიქსირდა ხანმოკლე რენტგენული ანთება მნიშვნელობით  $F_{\max}/F_{\min} = 4.5$  (ნახ. 6.1a). ობიექტზე დაკვირვების პერიოდში მიკროცვალებადობა არ გამოვლენილა.

BZB J0204–3333: ეს მაღალენერგიული ლაცერტიდი 4-ჯერ გახდა სვიფტის სამიზე 2012 წლის 26 აპრილიდან 2012 წლის 1 მაისის შუალედში, 19.9 კ წმ სრული ექსპოზიციის დროით. ამ პერიოდში ობიექტმა გამოავლინა რენტგენული ცვალებადობები  $\Delta F_{0.3-10\text{კეე}} = 0.06 \pm 0.02 \text{ cts s}^{-1}$ ,  $F_{0.3-10\text{კეე}}^{\max} = 0.26 \text{ cts s}^{-1}$  მნიშვნელობებით. დაკვირვების პერიოდში მცირე მასშტაბიანი რენტგენული ცვალებადობები არ დაფიქსირებულა (ნახ. 6.1b).

BZB J1137–1710: ობიექტი სვიფტის მიერ დაკვირვებული იყო 16-ჯერ, 2013 წლის 19 იანვრიდან 2015 წლის 13 მარტამდე შუალედში, სრული ექსპოზიციის დროით 20.7 კ წმ. აღნიშნულ პერიოდში 0.3-10 კეე ნაკადი იყო ძლიერ ცვალებადი  $F_{\max}/F_{\min} \sim 4$  მნიშვნელობით (ნახ. 6.1c). ხანმოკლე და ერთ დღე-ღამეზე ნაკლები დროითი მასშტაბის ცვალებადობები ამ პერიოდში არ დაფიქსირებულა.

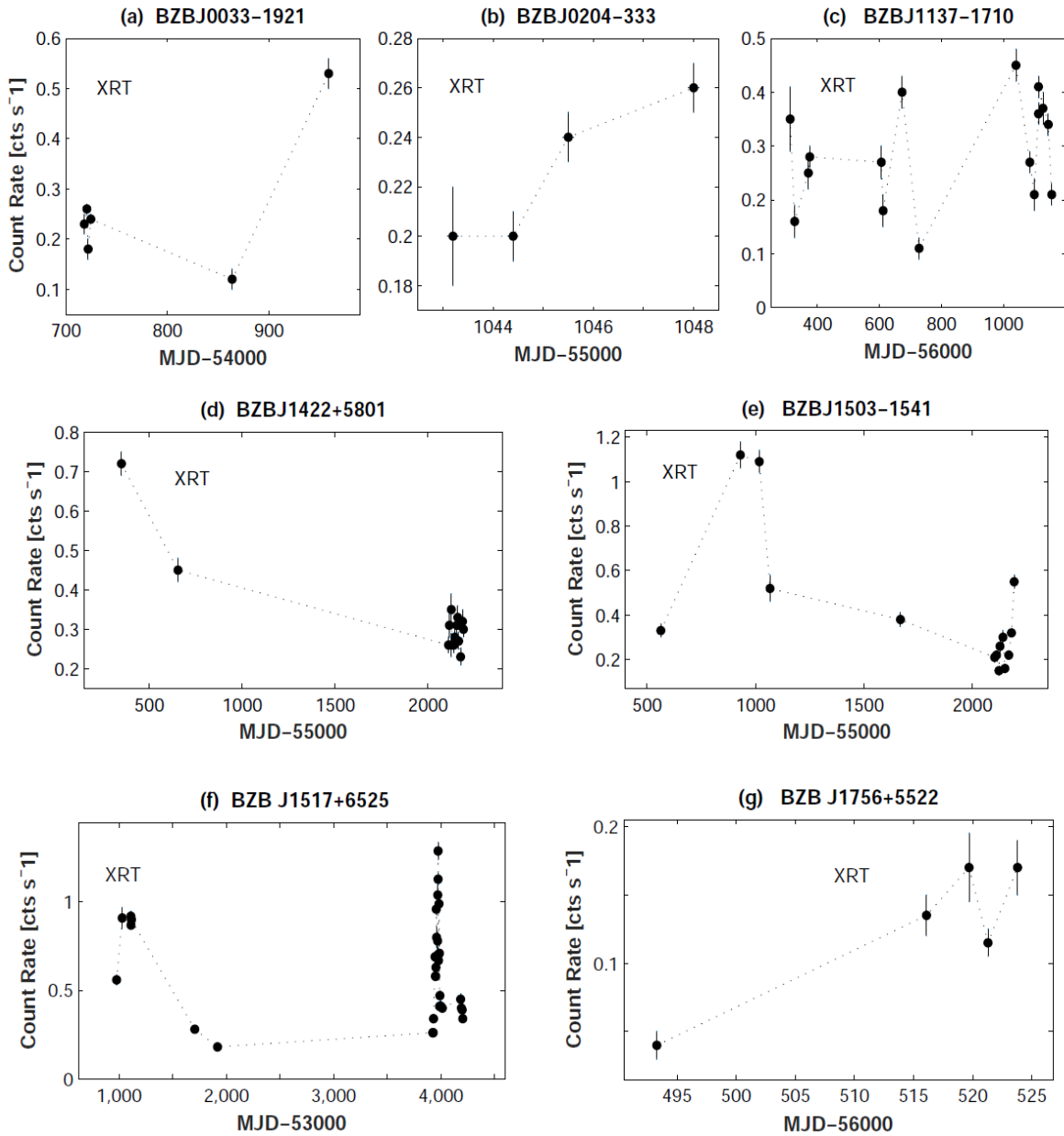
BZB J1422+5801: 2010 წლის 3 ივნისიდან 2015 წლის 17 ივნისამდე ეს ობიექტი სვიფტის მიერ, დაკვირვებული იყო 14-ჯერ, 21.4 კ წმ სრული ექსპოზიციის დროით. ამ პერიოდში 0.3-10 კეე ნაკადმა გამოავლინა ცვალებადობა, მაქსიმუმი-მინიმუმთან ფარდობით 3.1. 2015 წლის 29 მარტიდან 2015 წლის 17 ივნისი შუალედში დაფიქსირდა რენტგენული სიკაშკაშის დაეცემა  $F_{\max}/F_{\min}=2.8$  მნიშვნელობით (ნახ. 6.1d). დაკვირვების განმავლობაში გამოვლინდა, როგორც ხანმოკლე, ასევე ერთ დღე-ღამეზე ნაკლები დროითი მასშტაბის მიკროცვალებადობაც.

BZBJ1503–1523: თანამგზავრ სვიფტის მიერ, 4.5 წლის მანძილზე, ამ ობიექტზე თოთხმეტი რენტგენული დაკვირვების განმავლობაში 0.3-10 კეე უბანში გამოვლინდა ძლიერი ცვალებადობა, მაქსიმუმი-მინიმუმთან ფარდობით 7.5 (ნახ. 6.1e). ამ პერიოდში ასევე გამოჩვენდა მიკროცვალებადობის ერთი შემთხვევა.

BZBJ1517+6525: ეს ექსტრემალურად მაღალი ენერჯის პიკის მქონე ობიექტი 32-ჯერ იყო დაკვირვებული სვიფტის რენტგენული ტელესკოპის მიერ 2006 წლის 29 აგვისტოდან 2015 წლის 2 ივლისის შუალედში, სრული ექსპოზიციის დროით 129 კ წმ. ამ დროს 0.3-10 კეე ნაკადი იყო ძლიერ ცვალებადი,  $F_{\max}/F_{\min} = 7.2$  (ნახ. 6.1f). 2014 წლის 25 სექტემბრიდან

2014 წლის 22 დეკემბრამდე, სვიფტთან ერთად ჩვენმა TiO დაკვირვებებმა გამოავლინა ძლიერი რენტგენული ანთება მაქსიმუმი-მინიმუმთან ფარდობით  $\sim 5$ , რომელსაც თან ახლდა მოკლეპერიოდიაანი,  $\sim 2$  კვირის დროითი მასშტაბის მქონე, დაბალი ამპლიტუდის ანთებები.

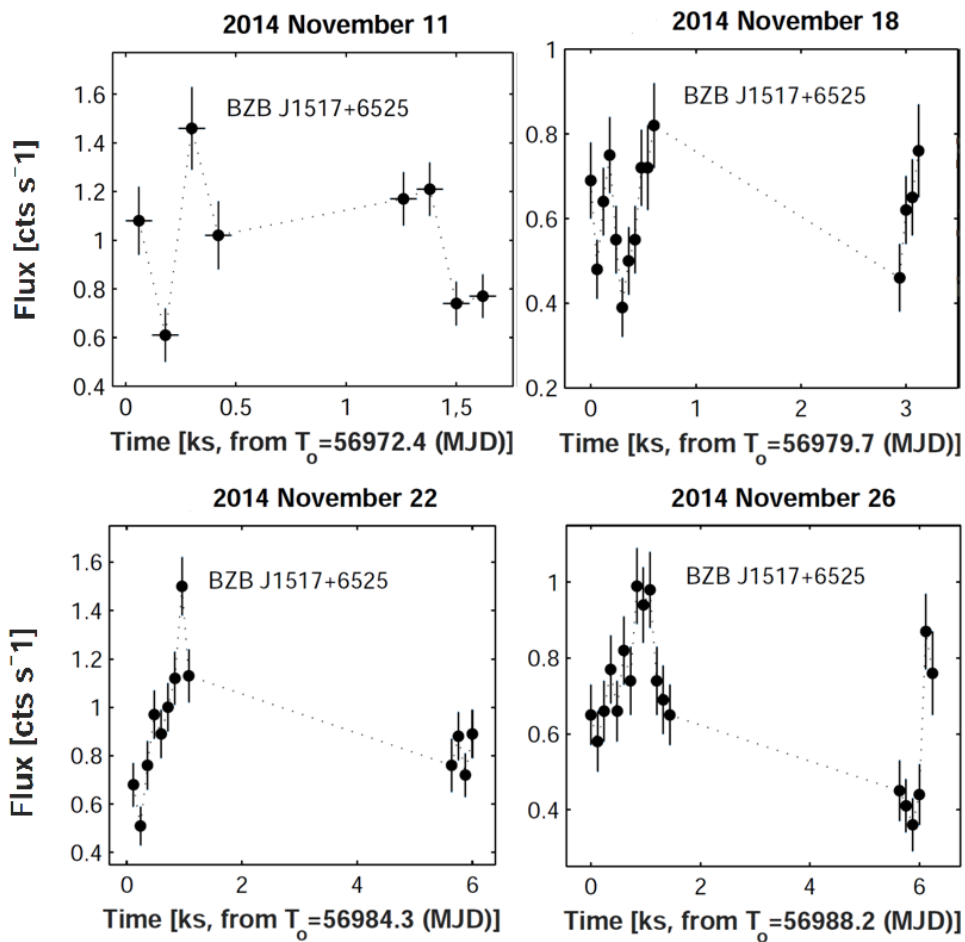
BZB J1756+5522: ობიექტი სვიფტის XRT ტელესკოპის მიერ დაკვირვებული იყო 5-ჯერ 2013 წლის ივლისი-აგვისტოს შუალედში, როდესაც 0.3-10 კეე ნაკადი იყო ძლიერ ცვალებადი.  $F_{\max}/F_{\min} \sim 4$  (ნახ. 6.1გ). ობიექტზე დაკვირვების განმავლობაში ხანმოკლე რენტგენული ანთებები და მიკროცვალებადობები არ დაფიქსირებულა.



**ნახ. 6.1** საკვლევი ობიექტების 0.3-10 კეე სიკაშკაშის მრუდები, მიღებული სვიფტის რენტგენული ტელესკოპის 2006 წლის აგვისტოდან 2015 წლის ივლისამდე წარმოებული დაკვირვებებით.

Sokolov et al. (2004)-ისა და სხვების მიხედვით, გრძელპერიოდული რენტგენული ანთებები შესაძლებელია დაკავშირებული იყოს ბლაზარის ჯეტში რელატივისტური დარტყმითი ტალღის გავრცელებასთან, რომელიც იწვევს ჯეტის ნივთიერების ძლიერ გაცხელებას. გარდა ამისა, ცნობილია, რომ რელატივისტურ ჯეტში დარტყმითი ტალღის

გავრცელებისას, მისი ფრონტისა და ჯეტის პლაზმაში არსებული მცირე მასშტაბიან არაერთგვაროვნებებს (სავარაუდოდ ტუტულეზური წარმოშობის) შორის ურთიერთქმედებამ შესაძლებელია გამოიწვიოს ძალიან სწრაფი ანთებები და ერთ დღე-დამეზე ნაკლები დროითი მასშტაბის ფლუქტუაციები (Marscher 2014; Mizuno et al. 2014), ჩვენს მიერ 4-ჯერ იყო ასეთი შემთვევა დაკვირვებული BZBJ1517+6525-ის ძლიერი ანთებისას, როგორც მოსალოდნელია ზემოთხსენებული სცენარიდან.



**ნახ. 6.2** 0.3-10 კევ მიკროცვალებადობის (IDVs) მრუდები, მიღებული სვიფტის რენტგენული ტელესკოპის მიერ BZBJ1517+6525 -ზე დაკვირვებისას.

0.3-10კევ უბანში ერთ დღე-დამეზე ნაკლები ხანგრძლივობის ძალიან სწრაფმა ანთებამ, რომელიც 1000 წმ-ზე ნაკლებ დროში ნაკადის გაორმაგებისგან შედგებოდა, ჩვენ

საშუალება მოგვცა გამოგვეთვალა ბლაზარის ჯეტის გამომსხივებელი არის სივრცული მასშტაბი (ე.ი. ტურბულენტური არაერთგვაროვნების ზომის მასშტაბი) შემდეგნაირად (Saito et al. 2013):

$$R \leq \frac{c\tau_d \Gamma_{em}}{1 + Z}$$

სადაც  $\tau_d$  -ნაკადის გაორმაგების დროა,  $\Gamma_{em}$  - გამომსხივებელი ზონის ლორენცის ფაქტორი.  $\Gamma_{em} = 10$  მნიშვნელობაზე დაყრდნობით მოვიღეთ შემდეგი მნიშვნელობა  $R \leq 1.11 \times 10^{14}$  სმ. აღსანიშნავია, რომ 32 რენტგენული დაკვირვებიდან 28 შემთვევაში BZBJ1517+6525-მა არ გამოავლინა ცვალებადობა 99% სანდოობის დონით, რომელიც შესაძლებელია დაკავშირებული იყოს ტელესკოპის დაკვირვებების შეზღუდულ ხანგრძლივობასთან და ასევე სიგნალი/ხმაურის ფარდობის მცირე მნიშვნელობასთან, საკვლევი ობიექტის მშვიდ სტადიაში.

ზოგადად, BZBJ1517+6525 იყო საკმაოდ პასიური ერთ დღე-ღამეზე ნაკლები დროითი რიგის ცვალებადობის შემთხვევებში. მიუხედავად მისი ყველაზე მაღალი სიკაშკაშის მდგომარეობისა (იხ. მაგ. დაკვირვება: ObsID 00036231003, ექსპოზიციით: 6500 წმ., რომელიც მოიცავდა 4 რენტგენულ ორბიტას, 0.3-10კეე უბანში ჰქონდა 0.9 ანათვალი/წმ მნიშვნელობა, რომელიც 2-ჯერ აღემატება ამ ობიექტზე სრული რენტგენული დაკვირვების საშუალო მნიშვნელობას), "აქტივობის კოეფიციენტი" რომელიც შეესაბამება ზემოთხსენებულ 4 მიკროცვალებადობას იყო 7.1 %, ეს მაჩვენებელი კი მნიშვნელოვნად დაბალია სახვა ახლომდებარე ლაცერტიდების იგივე მნიშვნელობასთან შედარებით, მაგ. ეს მნიშვნელობა უდრიდა 55%-ს Mrk501-სთვის 2014 წლის მარტი-აპრილის პერიოდში წარმოებული რენტგენული დაკვირვებების დროს (Kapanadze et al. 2017), 2013 წლის იანვარ-მაისში Mrk 421-მა გამოავლინა ძალიან ძლიერი მიკროცვალებადობა, როდესაც აღნიშნული აქტივობის კოეფიციენტი Swift-ისა და *NuSTAR*-ის დაკვირვებების დროს შესაბამისად იყო 83% და 99%, (Kapanadze et al. 2016a).

BZBJ1517+6525-ის დაბალი აქტივობის კოეფიციენტის მაჩვენებელი შესაძლებელია დაკავშირებული იყოს ბლაზარის ჯეტში სუსტად განვითარებულ ტურბულენტობებთან, რომელიც შესაბამისად იწვევს მცირე მასშტაბიან არაერთგვაროვნებების სიმცირეს, თუმცა

ასეთ დაშვებას "სიფრთხილით" უნდა მოვეკიდოთ, რადგან Mrk421 და Mrk501 ხასიათდებიან გაცილებით უკეთესი დაკვირვებათა მინუმებით და უფრო მაღალი სიგნალი/ხმაურთან ფარდობით (საშუალოდ 10-ჯერ უფრო მაღალია Mrk 501-სთვის იგივე დროითი ბიჯების შემთხვევაში და კიდევ უფრო მაღალი Mrk421-სთვის). უფრო მეტიც, დაკვირვებული ცვალებადობების დროითი მასშტაბები შემცირებულია  $1 + z$  წითელი წანაცვლების ეფექტით (Romero et al. 1999) რომელსაც შეუძლია ხელი შეუშალოს სწრაფი რენტგენული ცვალებადობების გამოვლენას, დიდი წითელი წანაცვლების მქონე BZBJ1517+6525-ის დროში შეზღუდული დაკვირვებებისათვის.

ჩვენი საკვლევი ობიექტებისთვის 0.3-10 კეე ნაკადის მიკროცვალებადობა დაკვირვებული იყო მხოლოდ J1422+5801-სა და J1503-1523-ის შემთხვევებში, (თითო შემთხვევა თითო ობიექტზე)  $DC = 8.6 - 11.1 \%$ , დანარჩენი ხუთი ობიექტის დაკვირვებებში მიკროცვალებადობა არ დაფიქსირდა.

სიგნალი/ხმაურთან ფარდობის დაბალი მნიშვნელობისა და სუსტი დაკვირვებების პარალელურად, საკვლევი ობიექტებისათვის მიკროცვალებადობების არარსებობა შესაძლებელია დაკავშირებული იყოს ობიექტების გამოსხივებაში დოპლერის ფაქტორის მაღალ მნიშვნელობასთან, რომელიც ხელს უშლის დაბალი ამპლიტუდის მქონე ფლუქტუაციების გამოვლენას (რადგანაც, დოპლერის ეფექტის სიძლიერე  $\delta$  მნიშვნელობით ამცირებს დაკვირვებული ცვალებადობის დროით მასშტაბებს) თუმცა, ეს დაშვება ნაკლებად სარწმუნოა ჩვენი ობიექტებისათვის, რადგანაც მათ გამოავლინეს ექსტრემალურად მაღალი იზოტროპული გამოსხივება 0.3-10 კეე ენერჯის უბანში (იხ. ცხრილი 3), კერძოდ  $L_{0.3-10 \text{ კეე}} = 8.9 \times 10^{45} - 8.9 \times 10^{46}$  ერგი/წმ.

**ცხრილი 3.** 0.3-10 კეე უბნის იზოტროპული გამოსხივების შედარებები, სამიზნე ობიექტებისა და სხვა ახლომდებარე კაშკაშა ლაცერტიდებს შორის (გამოყენებულია 0.3-10 კეე ანთებები შემდეგი არებული შრომებიდან: Kapanadze et al. 2016a, 2016b, 2017, 2018a, 2018b). (2) სვეტში მოყვანილია, ობიექტებამდე მანძილები. (3) სვეტში ერთეულები მოცემულია cgs სისტემით.

Sources (1)	$D_L$ (Mpc) (2)	$\log L_{0.3-10keV}$ (3)
J0033-1921	3643.3	46.01-46.32
J0204-3333	3694.4	46.10-46.24
J1137-1710	3570.7	46.11-46.47
J1422+5801	3848.6	46.11-46.55
J1503-1523	>2842.4	>45.90
J1517+6525	4326.9	46.09-46.95
J1535+5320	3936.13	45.95-46.02
J1756+5522	>3001.7	> 45.85
Mrk 421	136.6	43.95-46.18
1ES 1959+650	214.4	44.51-45.94
Mrk 501	150.3	44.55-45.35

მიუხედავად იმისა, რომ ორ სამიზნე ობიექტისათვის (J1503-1523 და J1756+5522) აქ მოყვანილია მათი რენტგენული გამოსხივების ქვედა ზღვრები, დაბალი დოპლერის ეფექტის შემთხვევაშიც კი (მაგ. ჯეტის არასათანადო დახრილობისას, გამოსხივებელი ზონის ძირითადი მასის დაბალ სიქჩარესთან ერთად) ასეთი ექსტრემალური გამოსხივებები ვერ დაიკვირვება. ჩვენს სამიზნე ობიექტებს აღმოაჩნდათ მნიშვნელოვნად უფრო მაღალი ნათობები, ვიდრე სხვა ახლომდებარე ლაცტერტიდებს გააჩნიათ. მხოლოდ 2013 წლის აპრილში უპრეცედენტოდ მაღალი ანთებისას გამოავლინა Mrk421-მა  $L_{0.3-10\text{კეე}}$  სიდიდის უფრო მაღალი მნიშვნელობა, ვიდრე  $10^{46}$  cgs (Kapanadze et al. 2016a). სვიფტის რენტგენული ტელესკოპიდან მიღებული 0.3-10 კეე სპექტრი ჩვენს საკვლევ ობიექტებისთვის კარგად აღიწერებოდა ლოგარითმულ-პარაბოლური მოდელით. ეს კი მიუთითებს ისეთი ფიზიკური პროცესების არსებობაზე, რომელიც მყარდება შესაბამისი



ენერჯის მქონე რენტგენული ელექტრონების ლოგარითმულ-პარაბოლური განაწილებისას (Massaro et al. 2004, 2011) (ცხრილი 4)

**ცხრილი 4.** სვიფტის რენტგენული ტელესკოპით წარმოებული სამიზნე ობიექტების დაკვირვებების სპექტრული ანალიზის შედეგები (ამონარიდი სტატიიდან), რომელიც წარმოებულია მარტივ-ხარისხოვანი და ლოგ-პარაბოლური ფუნქციებით.

ObsId	$\Gamma$ or $a$	$b$	$E_p$	$1000 \times K$	$\chi^2/d.o.f.$	$\log F_{0.3-2\text{keV}}$	$\log F_{2-10\text{keV}}$	$\log F_{0.3-10\text{keV}}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
J0033–1921								
37546001	2.13(0.13)	-	-	1.61(0.12)	0.790/8	-11.340(0.034)	-11.421(0.089)	-11.078(0.043)
37546002	2.29(0.09)	-	-	1.73(0.10)	1.159/10	-11.308(0.025)	-11.509(0.061)	-11.096(0.027)
37546003	2.14(0.12)	-	-	1.58(0.11)	0.665/7	-11.340(0.028)	-11.409(0.085)	-11.072(0.042)
37546004	2.30(0.09)	0.49(0.31)	0.49(0.16)	1.74(0.11)	1.204/12	-11.325(0.022)	-11.768(0.108)	-11.192(0.034)
38359002	2.11(0.05)	0.55(0.15)	0.79(0.13)	3.42(0.13)	1.207/50	-11.055(0.014)	-11.366(0.044)	-10.882(0.018)
J0204–3333								
91397002	1.79(0.07)	-	-	1.23(0.06)	1.254/20	-11.450(0.024)	-11.339(0.045)	-11.109(0.028)
91397003	1.73(0.06)	0.55(0.15)	1.76(0.28)	1.69(0.06)	1.151/47	-11.373(0.015)	-11.435(0.042)	-11.102(0.021)
91397004	1.70(0.07)	-	-	1.53(0.08)	1.011/22	-11.385(0.023)	-11.178(0.042)	-10.969(0.027)
J1137–1710								
33638001	1.65(0.12)	0.89(0.34)	1.57(0.57)	3.64(0.25)	0.984/13	-11.046(0.028)	-11.195(0.091)	-10.810(0.042)
33638002	1.64(0.12)	0.88(0.31)	1.60(0.53)	1.87(0.13)	0.658/15	-11.308(0.027)	-11.445(0.080)	-11.070(0.038)
33638004	1.73(0.08)	-	-	2.41(0.14)	0.932/10	-11.160(0.028)	-11.027(0.052)	-10.787(0.030)

კერძოდ, ჩვენს მიერ მიღებული შედეგი უჩვენებდა სპექტრულ პარამეტრთა შემდეგ საზღვრებს:  $a = 1.27(0.10)$ - $2.30(0.09)$ ,  $b = 0.12(0.08)$ - $1.19(0.27)$ ,  $E_p = 0.49(0.09)$ - $3.39(0.97)$ .

როგორც ცნობილია, სპექტრული სიმრუდე სინქროტრონული გამოსხივების ენერჯის განაწილებაში მოსალოდნელია მაშინ, როდესაც ადგილი აქვს ნაწილაკთა აჩქარების შემდეგ მექანიზმებს: (i) ელექტრონები იძენენ ენერჯიას დარტყმითი ტალღის ფრონტთან ფერმის პირველი რიგის აჩქარებებით (ე.წ. "ენერჯიაზე დამოკიდებული აჩქარების ალბათობათა პროცესი" (EDAP); Massaro et al. 2004); (ii) მეორეს მხრივ "მოხრილი" სპექტრული განაწილება შესაძლებელია დამყარდეს სტოხასტური აჩქარების დროსაც, რომელიც წარმიქმნება ჯეტში არსებული მაგნიტურ ტუბულენტობებიდან დარტყმითი ტალღის ფრონტთან ახლოს (Tramacere et al. 2009), თუმცა ისეთ შემთხვევაში მოსალოდნელია შედარებით ნაკლები სპექტრული სიმრუდეები ( $b \sim 0.3$ ) (Massaro et al.

2011) რასაც ძირითადად არ ჰქონია ადგილი ჩვენი საკვლევი ობიექტების შემთხვევაში. ეს შედეგები და ის ფაქტი, რომ ჩვენი ობიექტები იყვნენ პასიურები საათების რიგის ცვალებადობის შემთხვევაში, რაც შესაძლოა დაკავშირებული იყოს ჯეტში ტურბულენტური არეების მცირე რაოდენობებთან, საშუალებას გვაძლევს გავაკეთოთ დასკვნა, რომ წარმოდგენილ პერიოდებში, სტოხასტური აჩქარება არ ასრულებდა მნიშვნელოვან როლს ჩვენი საკვლევი ობიექტებისთვის. სპექტრული სიმრუდის წარმოშობა ჩვენს სამიზნე ობიექტების შემთხვევაში შესაძლებელია დაკავშირებული იყოს ნაწილაკთა ფერმის პირველი რიგის აჩქარებასთან რელატივისტური დარტყმითი ტალღის ფრონტის ახლოს, რომელიც არ გამორიცხავს უფრო დიდი სპექტრული სიმრუდეების გამოვლენასაც (Massaro et al. 2004).

ჩვენ ვერ გამოვრიცხავთ დაბალი მნიშვნელობის სპექტრული სიმრუდეების არსებობას სამიზნე ობიექტების იმ "ღარიბი" სპექტრებისთვის (d.o.f.  $\lesssim 15$ ), რომელებიც მარტივი ხარისხოვანი ფუნქციის (PL) "ბიჯებისთვის" კარგ სტატისტიკას უჩვენებდნენ. შესაბამისად, ჩვენს დაშვებას იმის შესახებ, რომ სტოხასტური აჩქარება ნაკლებად იყო მნიშვნელოვანი ჩვენი საკვლევი ობიექტებისთვის სამომავლოდ საჭიროებს რენტგენული დაკვირვებების ინტენსიურ მონიტორინგს, მათი დეტექტირება მაღალი ანთების ეპოქებში საშუალებას მოგვცემს 0.3-10 კეე უზნიდან ამოვიღოთ ისეთი სპექტრები, რომლებიც შეიცავენ ფოტონთა მაღალ რაოდენობას, რაც აუცილებელია გამრუდებული სპექტრის არსებობისა თუ არასრსებობის შესახებ ინფორმაციისათვის და უფრო "მყარი" დასკვნის გამოტანისათვის.

აღსანიშნავია, რომ BZB J1517+6525-მა უჩვენა 12 ისეთი მარტივ-ხარისხოვანი განაწილების სპექტრი, რომელიც არ იყო სუსტი და იგი ნამდვილად ხასიათდებოდა სპექტრული სიმრუდის არარსებობით. შესაბამისად, მათი წარმოშობა თავიდანვე უკავშირდებოდა შესაბამისი ენერგიის მქონე რენტგენული ელექტრონების შესაბამის განაწილებას. ასევე აღსანიშნავია, რომ ახლომდებარე ლაცერტიდებიც ზოგიერთ შემთხვევაში ასევე ამჟღავნებენ სპექტრული ენერგიის მარტივ-ხარისხოვან განაწილებას, მათ სპექტრებში სიმრუდის აღმოსაჩენად საჭირო ფოტონების საკმარისი რაოდენობით. ასეთი სიტუაციები ხშირად დაიკვირვებოდა 2005-2008 წლების განმავლობაში Mrk 421-ის

შემთხვევაში, როდესაც 0.3-10 კეე სპექტრის 28% კარგად ერგებოდა მარტივ-ხარისხოვან მოდელს (Kapanadze et al. 2018a), აქედან კი ჩვენ ვასკვნით, რომ ახლომდებარე ლაცერტიდების მსგავსად, BZB J1517+6525 -ის ჯეტისათვის ყოველთვის არ არის დამახასიათებელი ისეთი მაგნიტური ველი, როდესაც მის მიერ ნაწილაკის დაჭერის ეფექტურობა მცირდება მის აჩქარებადი ნაწილაკის ენერჯის ზრდასთან ერთად და შედეგად, მყარდება ნაწილაკთა ხარისხოვანი განაწილება ენერჯების მიხედვით.

სამმა ობიექტმა ((J1422+5801, J1137-1710 და J1517+6525) გამოავლინა "სიკაშკაშის ზრდისას სიხისტის ზრდის ტენდენციის" სპექტრი მათი რენტგენული ანთების პერიოდებში. მსგავსი ყოფაქცევა გამოვლენილია სხვა ახლომდებარე ლაცერტიდების შემთხვევებშიც (იხ. მაგ. Tramacere et al. 2009; Kapanadze et al. 2018a,b,c). იგივე ტენდენცია არ გამოიკვეთა შედარებით უფრო ძლიერი სპექტრის მქონე J1503-1523-სთვის, რომელიც უჩვენებდა სპექტრული სიხისტის როგორც შემცირებას, ასევე მატებას ნაკადის ზრდასთან ერთად. ასეთი სპექტრული ცვლილებები კი შესაძლებელია დაკავშირებული იყოს ანთებისას "რბილი" რენტგენული კომპონენტის თანმიმდევრულად წარმოქმნასთან, რაც "შერბილებასთან" ერთად იწვევს 0.3-10 კეე სპექტრში სიკაშკაშის მატებასაც (Kapanadze et al. 2018a).

## 6.2. 1ES 2344+514 ლაცერტიდის კვლევა "სვიფტის" დაკვირვებებზე დაყრდნობით

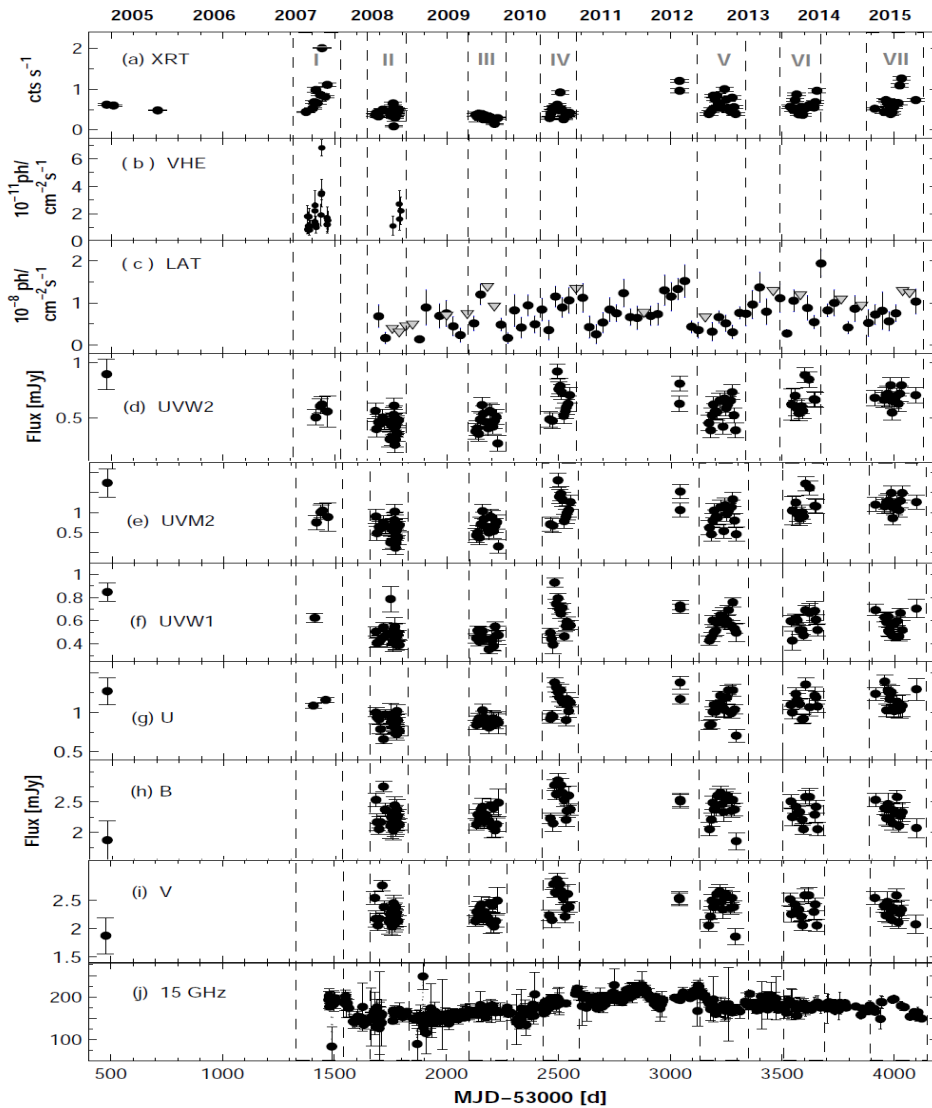
(Publication: **Astrophysics and Space Science**, Volume 362, Issue 10, article id.196, 14 pp. (2017))

1ES 2344+514 ( $z = 0.044$ ) სვიფტის რენტგენული ტელესკოპის მიერ 2005 წლის 19 აპრილიდან 2015 წლის 16 მარტამდე დაკვირვებული იყო 93 -ჯერ, სრული ექსპოზიციით 163.2 კ წმ. ამ პერიოდის განმავლობაში 0.3-10 კეე უბანში ობიექტმა გამოავლინა ძლიერი ხანგრძლივი რენტგენული ცვალებადობა ნაკადის მაქსიმუმისა და მინიმუმის ფარდობით 13.3. (ნახ. 6.3, ცხრილი 5) თუმცა, ეს ობიექტი იყო ძლიერ პასიური ერთ დღე-ღამეზე

ნაკლები რიგის დროითი მასშტაბის ცვალებადობისას. გამოვლიდა IDV-ის მხოლოდ 3 შემთხვევა  $3\sigma$  სანდოობის დონით. მიკროცვალებადობის შესაბამისი აქტივობის კოეფიციენტი იყო 4.2%. აღსანიშნავია, რომ ეს მნიშვნელობა გაცილებით ნაკლებია სხვა ლაცერტიდებთან შედარებით (იხ. მაგ. Kapanadze et al. 2016a და Kapanadze et al. 2016b).

დაკვირვებებში მიკროცვალებადობის სიმცირე შესაძლებელია დაკავშირებული იყოს ობიექტისათვის დოპლერის ფაქტორის მაღალ მნიშვნელობასთან, რომელიც იწვევს დაკვირვებული ცვალებადობის დროითი მასშტაბის შემცირებას  $t_{var}^{obs} = t_{var}^{int} / \delta$  (სადაც  $t_{var}^{obs}$  ცვალებადობის დროითი მასშტაბია,  $\delta$  - პეტის გამომსხვივებელი არის უძრავ სისტემაში) და დაკვირვებული ნაკადის მცირე გაძლიერებას  $F_v^{obs} \propto \delta^3 F_v^{em}$ .

სხვა კარგად შესწავლილი ლაცერტიდებისაგან განსხვავებით 1ES 2344+514 ავლენდა რენტგენული სპექტრის სიმრუდის ნაკლებობას. მხოლოდ შვიდმა სპექტრმა უჩვენა მნიშვნელოვანი სიმრუდე:  $b = 0.36-0.83$ ,  $a = 1.36-1.87$ ,  $E_p = 1.35-6.03$  კეე. 0.3-10 კეე სპექტრის ძირითადი რაოდენობა კარგად ერგებოდა მარტივ-ხარისხოვან მოდელს,  $\Gamma = 1.44-2.21$  მნიშვნელობით. ლოგარითმულ-პარაპოლური სპექტრის სიმცირე ნაწილობრივ შესაძლებელია დაკავშირებული იყოს იმ ფაქტთან, რომ ამ ობიექტის რენტგენული დაკვირვებები ძირითადად იძლეოდა "ღარიბ" სპექტრებს, რომელიც ხელს უშლის სპექტრის სიმრუდის გამოვლენას მათი დიდი ცდომილებების გამო. მიუხედავად ამისა არ გამოავლენილა სპექტრული სიმრუდე არც ზოგირთი "მდიდარი" 50-ზე მეტი "ბიჯის" მქონე სპექტრების შემთხვევაშიც. ამიტომ, ჩვენ შეგვიძლია გავაკეთოთ დავასკვნა, რომ 2005-2015 წლის განმავლობაში, ობიექტის რენტგენულ გამოსხივებაზე პასუხისმგებელი ელექტონების ენერჯის მიხედვით განაწილების სიმრუდე, არ იყო ყოველთვის მნიშვნელოვანი.



**ნახ. 6.3** ბლავარ 1ES 2344+514-ის სიკაშკაშის მრუდები, მიღებული სვიფტის რენტგენული ტელესკოპის მეშვეობით წარმოებული დაკვირვებებიდან (0.3-10 კეე) (ზედა პანელი) იმავე პერიოდის სხვა, საჯაროდ ხელმისაწვდომ მრავალტალღოვან დაკვირვებებთან ერთად: VHA (VERITAS, MAGIC; b პანელი), მაღალ-ენერგიული (LAT; c პანელი), ულტრაიისფერი (UVW2-UVW1 უბნები; d და f პანელები), ოპტიკური ((U-V; g და i პანელები), რადიო (OVRO; j პანელი). რუხი სამკუთხედები c პანელზე დგანან 0.3-300 კეე ნაკადის ზედა ზღვრებთან, დაკვირვების  $3\sigma$  -ზე დაბალი მნიშვნელობისათვის. სიკაშკაშის მრუდების ასაგებად გამოყენებულია ერთ დღე-ღამეზე გასაშუალებული დროითი ბიჯები, გარდა LAT მონაცემისა (ერთ თვიანი დროითი ბიჯები). ვერტიკალური წყვეტილი სვეტები აღნიშნავენ ჩვენს მიერ წარმოებული დაკვირვების დროის პერიოდებს.

1ES 2344+514 ხშირად უჩვენებდა კორელაციის სიმცირეს რენტგენულ და ულტრაიისფერ/ოპტიკური უბნების ცვალებადობების მიმართ. რენტგენულ ანთებებს ხშირად არ ახლდა "გააქტიურება" დაბალ სიხშირეებზე, რაც იძლევა საფუძველს ვივარაუდოთ გამოსხივების არეში ერთზონიანი-SSC სცენარის არსებობა, ეს შედეგი შესაძლებელია დაკავშირებული იყოს, ობიექტის მამომსხივებელ არეში გამომსხივებელი ელექტრონების ორი განსხვავებული პოპულაციის არსებობასთან, რომლებიც შესაბამისად წარმოქმნიან რენტგენულ და ულტრაიისფერ/ოპტიკურ გამოსხივებებს.

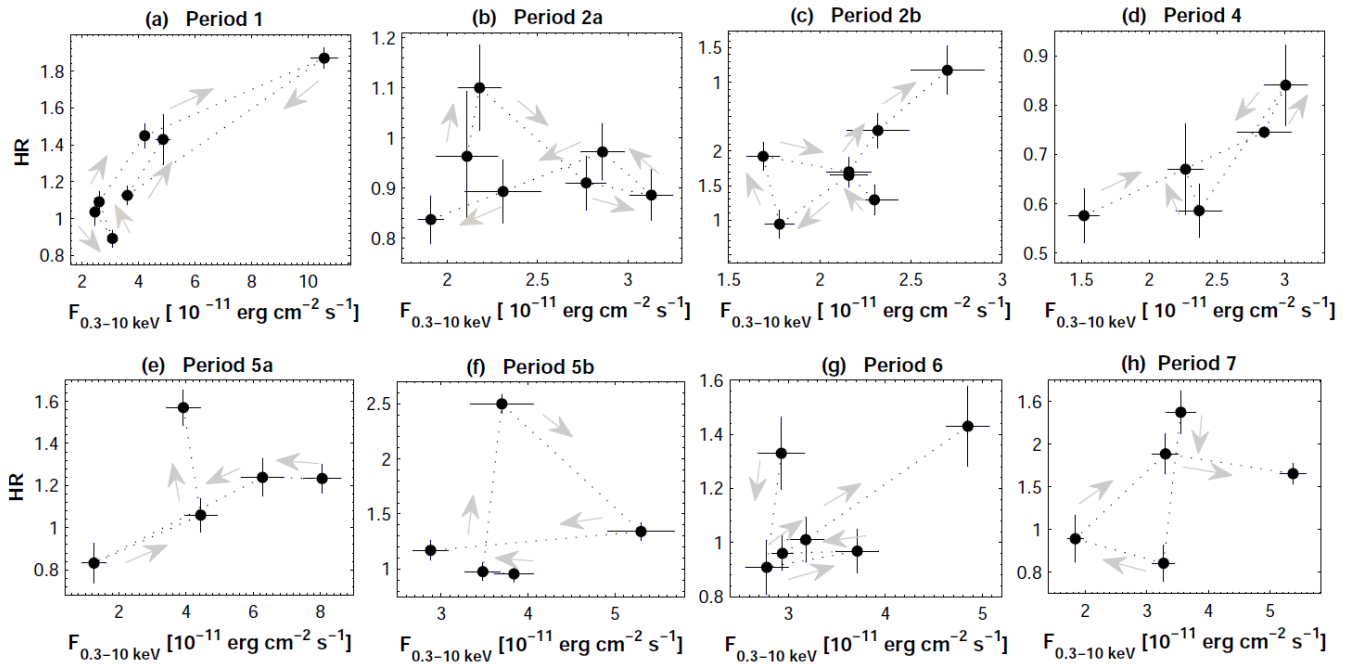
**ცხრილი 5.** სვიფტის რენტგენული და UVOT ტელესკოპების დაკვირვებები, სხვადასხვა პერიოდებში (1 სვეტი). (2) სვეტი; მოცემულ პერიოდებში რენტგენულ ანთებათა რაოდენობები; (3)-(6) სვეტები შესაბამისად: 0.3-10 კევ ნაკადის მაქსიმუმი (ფოტონი/წმ ერთეულში), ნაკადის მაქსიმუმი/მინიმუმთან ფარდობა და ყოველი ანთებისათვის ცვალებადობის ფარდობითი ამპლიტუდა პროცენტებში (სიდიდიეთა დიაპაზონი მოცემულია როდესაც  $N_{fl} > 2$ ); (7)-(12) სვეტები: ნაკადის მაქსიმუმი/მინიმუმთან ფარდობა UVOT უბანში.

Per. (1)	Dates (2)	XRT				UVOT					
		$N_{fl}$ (3)	$F_{max}$ (4)	$R$ (5)	$F_{var}$ (6)	$R_{uvw2}$ (7)	$R_{uvm2}$ (8)	$R_{uvw1}$ (9)	$R_u$ (10)	$R_b$ (11)	$R_v$ (12)
1	2007 Sep 27 - 2008 Jan 1	1	2.24	4.87	61.1	-	1.21	-	1.09	-	-
2	2008 Aug 2 - Nov 14	3	0.53 - 0.61	1.75 - 2.03	14.5 - 23.6	2.44	2.41	2.00	1.55	1.35	1.37
3	2009 Oct 25 - 2010 Jan 31	1	0.43	2.87	24.5	1.51	2.37	1.58	1.28	1.22	1.20
4	2010 Sep 21 - 2010 Dec 19	1	1.04	3.85	40.6	2.09	1.97	2.08	1.53	1.33	1.15
5	2012 Apr 23 - Dec 30	2	1.25, 1.04	1.32, 2.67	18.5, 28.3	2.00	2.10	1.65	1.97	1.44	1.15
6	2013 Sep 1 - Dec 29	1	0.89	2.47	37.5	1.55	1.30	1.44	1.35	1.23	1.16
7	2014 Sep 14 - 2015 Mar 16	1	1.26	3.23	35.7	1.60	1.63	1.51	1.38	1.26	1.18

"ჰისტერიზების" ანალიზი "ფარდობითი სიხისტე-გამოსხივების ნაკადი" (HR-flux) სიბრტყეში, ძალზედ ეფექტურია კონკრეტული რენტგენული ანთების გამოსაკვლევად, გამომსხივებელი ელექტრონების აჩქარების ( $\tau_{acc}$ ), სინქროტონული გაციებისა ( $\tau_{cool}$ ) და ნაკადის ცვალებადობის ( $\tau_{var}$ ) დროთი მასშტაბების შესადარებლად (Cui 2004).

- საათის ისრის მიმართულების მარყუჯი (CW),  $\tau_{syn} \gg \tau_{var} \gg \tau_{acc}$ , ან  $\tau_{syn} \gg \tau_{acc} \gg \tau_{var}$ . ასეთ შემთხვევაში, რენტგენული სპექტრი ხდება რბილი, ნაკადის კლების ფაზაში და ხისტი აღმავალ ფაზაში, რაც მაჩვენებელია იმისა, რომ ცვალებადობა რენტგენული სპექტრის ხისტ უბანში დროში უსწრებს "რბილ" სიხშირეებზე არსებულს ანთების როგორც აღმავალ, ისე კლების შესაბამის ფაზებში.
- საათი ისრის მიმართულების საწინააღმდეგო მარყუჯი (CCW),  $\tau_{syn} \approx \tau_{acc} \approx \tau_{var}$ . გვაძლევს ინფორმაციას იმის შესახებ, რომ ნაკადი ვრცელდება დაბალი სიხშირეებიდან მაღლისაკენ. ელექტრონები განიცდიან თანდათანობით აჩქარებას, ხოლო ნაკადის დაცემის ფაზა შეიძლება დამყარდეს ნაწილაკთა "თავის დაღწევის" ეფექტით და უნდა ვაკვირდებოდეთ "ხისტი დროში ჩამორჩენას" (Ravasio et al. 2004).

6.4-ნახაზზე წარმოდგენილია ჰისტორიები, რომლებიც ავაგეთ დაკვირებათა სხვადასხვა პერიოდებისათვის. a, c, f და h ნახაზები უჩვენებენ CW მარყუჯებს და ამიტომ, ამ შემთხვევაში მოსალოდნელია ე.წ. "რბილი დროში ჩამორჩენა" და პირიქით, CCW მარყუჯები მივიღეთ b, d და e -ს შემთხვევაში, შესაძლო "ხისტი დროში ჩამორჩენით", g-ს შემთხვევაში კი არ გამოვლინდა მკაფიო მარყუჯი.



**ნახ. 6.4** 1ES 2344+514 ის "HR-ნაკადი" სიბრტყეები, სხვადასხვა პერიოდებისათვის.

ჩვენს მიერ აგებული ჰისტორიების ანალიზმა აჩვენა, რომ ობიექტის რენტგენული ცვალებადობა კომპლექსურად იყო დამოკიდებული გამომსხივებელი ელექტრონების აჩქარებისა და შემდგომი "გაციების" დროით მასშტაბებზე და ეს დამოკიდებულება იცვლებოდა ანთებიდან ანთებამდე.

რენტგენული ნაკადის ცვალებადობა უჩვენებდა არასტაბილურ ხასიათს, სხვადასხვა ეპოქებში ანთებისას ამპლიტუდისა და ნაკადის მინიმუმის დონეთა ცვლილებით. ზოგ ეპოქაში რენტგენულ გაელვებას თან ახლდა გააქტიურება ულტრაიისფერ/ოპტიკურ უბანში, თუმცა ასევე ხშირად დაიკვირვებოდა კორელაციის არარსებობა დაბალსიხშირულ გამოსხივებასა და 0.3-10 კეე უბანს შორის. UVOT-ის დაკვირვებების დროს ნაკადის ცვალებადობა იყო ძლიერ შესუსტებული "მასპინძელი" გალაქტიკის ოპტიკური უბნის სიკაშკაშის ზეგავლენით, რომელიც იზრდება ტალღის სიგრძის პროპორციულად (~90 პროცენტით R-უბანში, იხ. Nilsson et al. 2007).

1ES 2344+514 იყო ძლიერ სუსტი LAT უბანში 3σ სანდოობის დონეზე 63 შემთხვევაში ერთ თვიანი დროითი "ბიჯების" დროს, ავლენდა ძლიერ 0.3-300 გეე ცვალებადობას



$F_{max}/F_{min}=14.9$  მნიშვნელობით და ბოლოს 1ES 2344+514-ის მაღალენერგიული გამოსხივების მონაცემები ხელმისაწვდომი იყო მხოლოდ 2006 წლის 7 ოქტომბრიდან 2008 წლის 24 ნოემბრამდე პერიოდისათვის, რომელმაც უჩვენა ძალიან დიდი ცვალებადობა ~ 7 -ის ტოლი ფაქტორით.

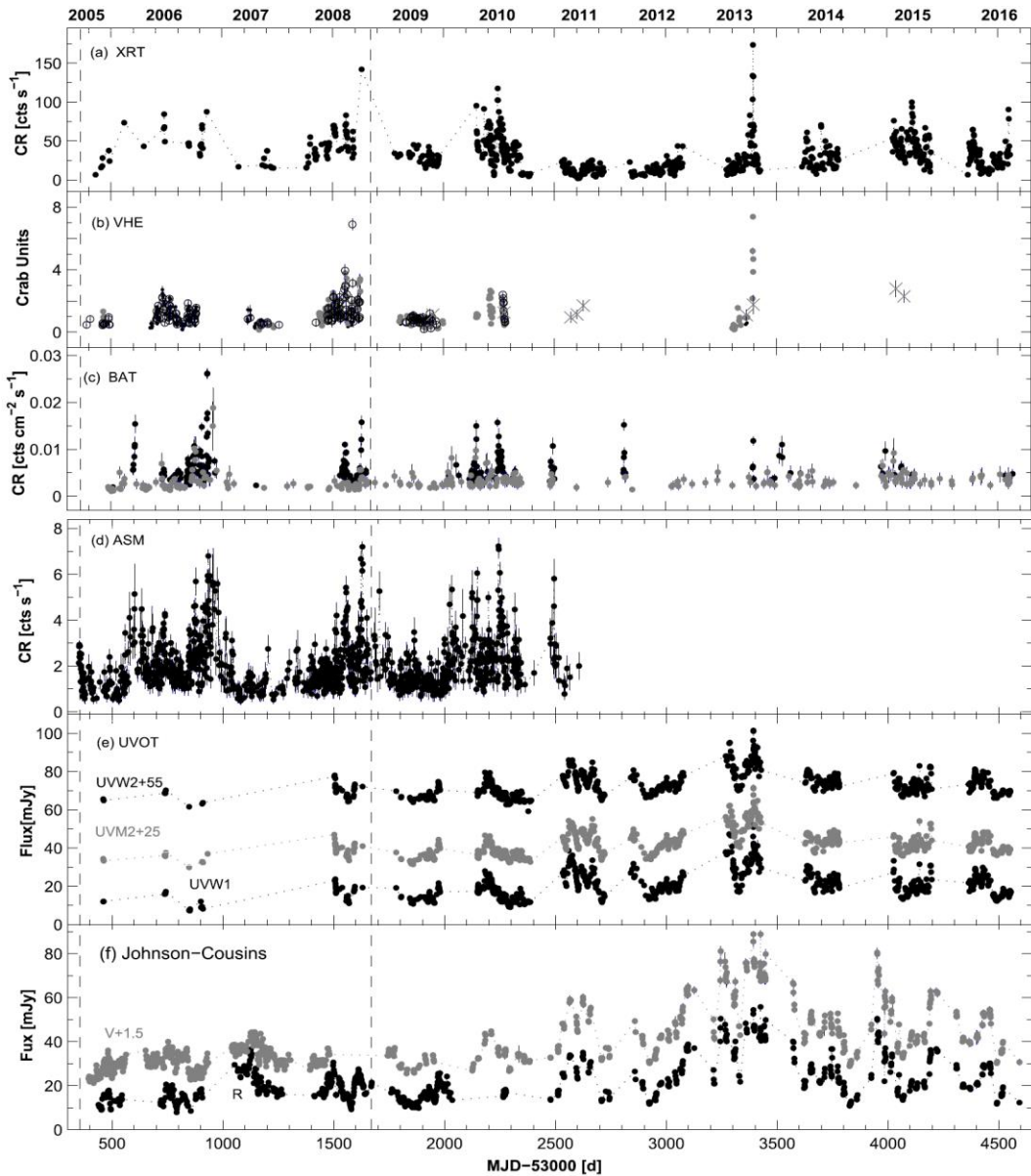
ცვალებადობის ფარდობითი ამპლიტუდა უჩვენებდა ორმაგ კუზიან სტრუქტურას, სიხშირით, რომელიც მიუთითებდა კორელაციას სინქროტრონული და კომპტონის უკუგაბნევის პიკებს შორის და დიდ ცვალებადობას ელექტრონთა ენერგიის ( $E_p$ ) განაწილებაში. ობიექტის სიმკრთალის გამო სვიფტის რენტგენული ტელესკოპიდან მიღებული ზოგიერთი სპექტრი იყო ძალიან სუსტი და ჩვენ ვერ შევძელით მათი ანალიზი, მიუხედავად ამისა ლოგარითმულ-პარაბოლური განაწილება და მასზე დაფუძნებული შესაბამისი ფიზიკური პროცესები, როგორც აღმოჩნდა მნიშვნელოვანი იყო ამ ობიექტისათვის. შედარებით უფრო "მდიდარი" სპექტრიდან მხოლოდ შვიდმა უჩვენა სპექტრული სიმრუდე, ხოლო დანარჩენები კარგად აღიწერებოდნენ მარტივ-ხარისხოვანი განაწილებით. 0.3-10 კეე ფოტონის ინდექსი იცვლებოდა სხვადასხვა დროით მასშტაბებში და ობიექტი ძირითადად ავლენდა "სიკაშკაშის ზრდისას, სიხისტის ზრდის ტენდეციას", რომელიც მიუთითებს გამოსხივების ნაკადის კომპლექსურ სპექტრულ უვოლუციას, ასხვადასხვა ეპოქებში გამომხივებელ ნაწილაკთა აჩქარებასა და მათი შემდგომი გაციების დროით მასშტაბებს შორის განსხვავებულ ურთიერთკავშირზე. 2005-2015 წლებში 1ES 2344+514 -ის ხანგრძლივი რენტგენული ანთებების კვლევამ გამოავლინა, რომ ობიექტი განიცდიდა ძლიერ ცვალებადობებს როგორც რენტგენულ ასევე ოპტიკურ უბანში ულტრაიისფერში და გამა უბნებთან შედარებით, რომელთაც თან ახლდათ კომპლექსური სახიათის მქონე ძლიერი სპექტრული ცვალებადობები, ამიტომ სამომავლოდ უფრო ინტენსიური დაკვირვებებია საჭირო იმ არასტაბილური პროცესების სიღრმისეულად შესასწავლად, რომელიც პასუხისმგებელია გამოსხივების ცვალებადობაზე და ობიექტისათვის ერთ დღე-ღამეზე ნაკლები ხანგრძლივობის ცვალებადობათა მცირე რაოდენობის სრულყოფილი ახსნისათვის.

### 6.3 "სვიფტის" დაკვირვებები Mrk 421 ლაცერტიდზე, შერჩეულ ეპოქებში. I. სპექტრული და ნაკადის ცვალებადობები 2005–2008 წლებში.

(Publication: **The Astrophysical Journal**, Volume 854, Issue 1, article id. 66, 27 pp. (2018))

2005 წლის მარტიდან - 2008 წლის ივნისის შუალედში, თანამგზავრ სვიფტის მიერ წარმოებულმა ლაცერტიდ Mrk421-ის დაკვირვებების ანალიზმა გამოავლინა, რომ ამ პერიოდის განმავლობაში 0.3-10 კევ სპექტრი ძირითადად კარგად აღიწერებოდა ლოგარითმულ-პარაბოლური განაწილებით, თუმცა ჩვენ ასევე მივიღეთ მარტივი-ხარისხოვანი განაწილების სპექტრების მნიშვნელოვნად მაღალი (28%) პროცენტი, ობიექტზე დაკვირვების სხვა პერიოდებთან შედარებით (5-13%).  $E_p$  - უჩვენებდა დადებით კორელაციას 0.3-10 კევ ნაკადთან, ძლიერი რენტგენული ანთებისას 41 ლოგარითმულ-პარაბოლური სპექტრის სინქროტრონული გამოსხივების ენერჯის პიკი მდებარეობდა 8 კევ-ის მიღმა,  $E_p$  -ის ქვედა ზღვრების გაცილებით მაღალი მნიშვნელობით, ვიდრე 2013 წლის აპრილის გიგანტური ანთებისას (ნახ. 6.5).

სინქროტრონული გამოსხივების ენერჯის პიკის მდებარეობა ზოგიერთ მშვიდ სტადიებში წაინაცვლებდა რამდენიმე ათეულ ელექტონვოლტით დაბალ მნიშვნელობებზე. მთლიანი ლოგარითმულ-პარაბოლური სპექტრის 20%-ის შემთხვევაში Mrk 421 წარმოადგენდა ხისტი რენტგენული უბნის პიკის მქონე ლაცერტიდს. ენერჯის განაწილების პიკები უჩვენებდნენ სწრაფ წანაცვლებებს 400-600 წამში მაღალი ენერჯიებისაკენ, 1.2-3.2 კევ-ით. 2008 წლის აპრილი-ივლისის პერიოდის სპექტრის ნიმუშმა უჩვენა დამოკიდებულება  $S_p \approx E_p^{0.6}$ , როგორც ეს მოსალოდნელია ცვალებადი იმპულსი-დიფუზიის კოეფიციენტისა და ტურბულენტური სპექტრების შემთხვევებში.



**ნახ. 6.5** Mrk421-ის ერთ დღიანი ბიჯის სიკაშკაშის მრუდები, მიღებული 2005-2016 წლის შუალედში შესრულებული მრავალტალღოვანი დაკვირვებებიდან. ზედა პანელი შეესაბამება სვიფტის რენტგენულ დაკვირვებებს, VHE ( პანელი (b); შავი წერტილები შეესაბამება VERITAS მონაცემებს. რუხი წერტილები, ვარსკვლავები და წრეები შესაბამისად: MAGIC, Whipple, და HAGAII-ის მონაცემებს), BAT (პანელი (c); შავი და რუხი წერტილები შეესაბამება 5 $\sigma$  და 3 $\sigma$  სანდოობის დონეებს), ASM (პანელი (d)), UVOT (პანელი (e) და სახმელეთო ოპტიკურ ტელესკოპებს (პანელი (f)). 2005 წლის მარტი-2008 წლის ივნისი მონიშნულია ვერტიკალური წყვეტილი ხაზებით.

2005-2008 წლის მანძილზე ობიექტი ძირითადად უჩვენებდა მცირე სპექტრულ სიმრუდეს, როგორც მოსალოდნელია ბლაზარის ჯეტში ნაწილაკთა სტოხასტური აჩქარების დროს. ფერმის მეორე მექანიზმის ცვალებადობა დასტურდება დაკვირვებული  $E_p - b$  პარამეტრების ანტი-კორელაციიდანაც (ცხრილი. 6), თუმცა ამ უკანასკნელთა მცირე რაოდენობა და ზოგიერთ პერიოდში  $a - b$  პარამეტრებს შორის კორელაციის არსებობა საფუძველს გვაძლევს ვივარაუდოთ, რომ ობიექტის ჯეტში შესაძლებელია ფერმის ორივე მექანიზმს ჰქონდა ადგილი. ეს შემთხვევა კი ამყარებს წინა თეორულ კვლევებს, მაღალენერგიული ლაცერტიდების ჯეტებში დატყმითი ტალღის გავრცელების შემდეგ და სტოხასტური აჩქარებების არსებობის შესახებ.

ცხრილი 6. კორელაცია სპექტრულ პარამეტრებსა და მრავალსიხშირულ ნაკადებს შორის

Quantities	$\rho$	$p$
	2005–2008	
$b$ and $a$	0.41(0.09)	$5.17 \times 10^{-7}$
$b$ and $E_p$	-0.21(0.09)	$3.22 \times 10^{-3}$
$b$ and $F_{0.3-10 \text{ keV}}$	-0.26(0.08)	$1.01 \times 10^{-4}$
$a$ and $F_{0.3-10 \text{ keV}}$	-0.57(0.06)	$5.89 \times 10^{-10}$
$E_p$ and $F_{0.3-10 \text{ keV}}$	0.31(0.09)	$1.70 \times 10^{-5}$
$\log E_p$ and $\log S_p$	0.42(0.10)	$6.35 \times 10^{-8}$
$\Gamma$ and $F_{0.3-10 \text{ keV}}$	-0.58(0.06)	$2.24 \times 10^{-10}$
HR and $F_{0.3-10 \text{ keV}}$	0.53(0.06)	$4.47 \times 10^{-9}$
$F_{0.3-2 \text{ keV}}$ and $F_{2-10 \text{ keV}}$	0.74(0.04)	$5.44 \times 10^{-13}$
$F_{0.3-10 \text{ keV}}$ and $F_{\text{VHE}}$	0.60(0.08)	$4.67 \times 10^{-10}$
$F_{\text{BAT}}$ and $F_{\text{ASM}}$	0.53(0.09)	$8.00 \times 10^{-8}$
$F_{\text{ASM}}$ and $F_{\text{VHE}}$	0.45(0.08)	$2.13 \times 10^{-9}$
$F_{\text{UW1}}$ and $F_{\text{UW2}}$	0.89(0.02)	$< 10^{-15}$

კვლევის პერიოდის განმავლობაში, 1 კევ-ზე ფოტონ-ინდექსის მნიშვნელობები უჩვენებდნენ ცვლილებათა ფართო საზღვრებს, ზოგჯერ ისინი ღებულობდნენ უფრო მცირე მნიშვნელობებს, ვიდრე 2013 წელის აპრილში ( $a = 1.67$ ).

**ცხრილი 7.** სპექტრულ პარამეტრთა განაწილებები

Par. (1)	Minimum (2)	Maximum (3)	Mean (4)	Skewness (5)
2005–2008				
<i>b</i>	0.09	0.47	0.21	0.60
<i>a</i>	1.62	2.63	2.07	0.38
<i>E<sub>p</sub></i>	0.80	7.94	2.71	0.85
$\Gamma$	1.68	2.74	1.91	0.26
HR	0.22	1.49	0.79	0.04

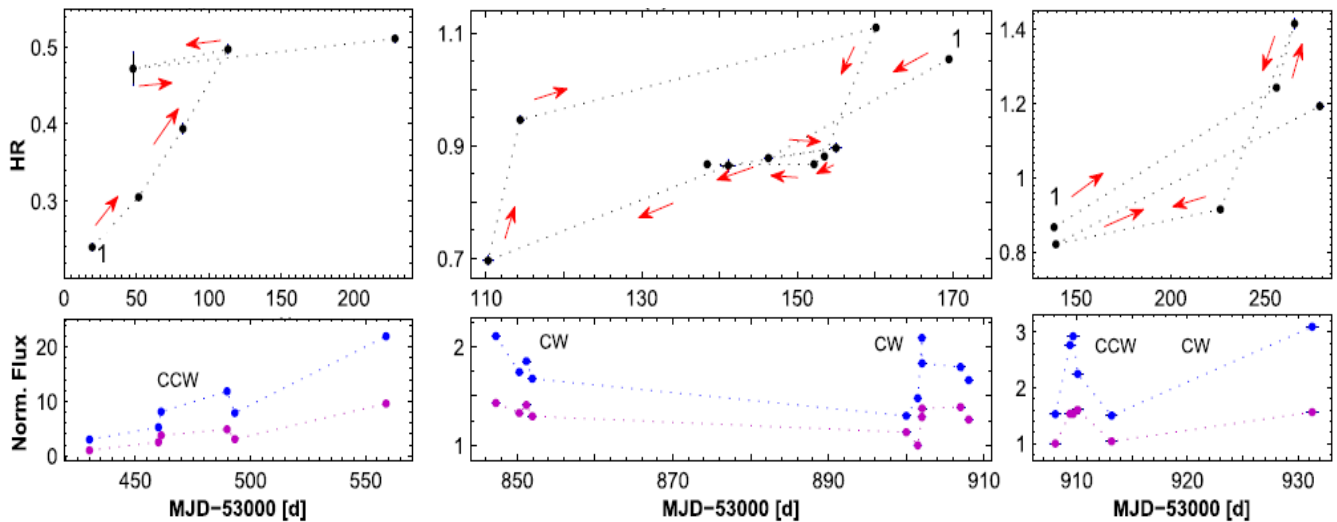
მარტივი-ხარისხოვანი სპექტრებიდან მიღებული 0.3-10 კეე ფოტონ-ინდექსი ასევე უჩვენებდა ცვლილებათა ფართო საზღვრებს (ცხრილი 7). ასეთი სპექტრი ძირითადად დაიკვირვებოდა 2006 წლის აპრილი-ივნისში როდესაც ობიექტი ავლენდა როგორც ხარისხოვან ასევე ლოგარითმულ-პარაბოლურ სპექტრებს ცალკეული XRT დაკვირვებების დროს, ზოგიერთ შემთხვევაში 1000 წმ დროის ინტერვალშიც კი. ეს შედეგი შესაძლოა მიუთითებდეს ამ ობიექტის ჯეტის გამომსხვივებელ არეში ექსტრემალურად სწრაფად ცვალებადი მაგნიტური ველის არსებობაზე: ნაწილაკის თავისუფლების შეზღუდვის მდგომარეობიდან გადასვლა ხდება მისი ენერჯის და/ან მაღალი ტურბულენტობის შემცირებასთან ერთად (რომელიც იძლევა ელექტრონთა ენერჯის ლოგარითმულ-პარაბოლურ განაწილებას) ისეთ მდგომარეობაში, რომელსაც არ ახასიათებს ასეთი თვისებები და პირიქით, 1 კეე -ზე ფოტონ-ინდექსი ზოგჯერ უჩვენებდა  $\alpha < 1.70$  მნიშვნელობას, რაც ზოგჯერ უფრო მარტივია აიხსნას ჯეტის ნივთიერებაში ადრონების ზეავლენით. ფოტონ-ინდექსი იცვლებოდა სხვადასხვა დროით მასშტაბებში, ზოგჯერ 1000წმ დაკვირვების დროის ინტერვალშიც კი, ისინი ხისტდებოდნენ 330 წმ-ში  $\Delta \alpha = 0.07$ -ით და რბილდებოდნენ 400-500 წმ-ში,  $\Delta \alpha = 0.08 - 0.10$  მნიშვნელობებით. როგორც ლოგარითმულ-პარაბოლური ასევე მარტივი-ხარისხოვანი სპექტრებიდან გამოთვლილი ფარდობითი სიხისტე (HR) უჩვენებდა ფართო საზღვრებს

$\Delta HR = 0.92$ , ასევე  $HR=1$  -ზე მაღალი მნიშვნელობების ძალიან დიდ (26%) პროცენტს (ე.ი. უფრო მაღალ 2-10 კევ ნაკადს რბილ 0.3-10 კევ ნაკადთან შედარებით, რაც იშვიათად დაიკვირვება მაღალენერგიული პიკის მქონე ლაცერტიდებში). ფოტონ-ინდექსის მსგავსად ეს პარამეტრი იცვლებოდა სხვადასხვა დროით მასშტაბებში და ამ ცვალებადობისას ობიექტი უმეტესწილად უზვენებდა "სიკაშკაშის ზრდისას სიხისტის ზრდის" ტენდეციას. თუმცა ასევე დაიკვირვებოდა საპირისპირო შემთხვევებიც, რაც იშვიათია HBL ობიექტებისთვის და ეს შესაძლოა დაკავშირებული იყოს გამოსხივების არეში რენტგენული სპექტრის "რბილი" კომპონენტის წარმოქმნასთან.

ძლიერ სპექტრულ ცვალებადობასთან ერთად Mrk 421-მა ასევე გამოავლინა ძლიერი რენტგენული ანთებებიც, რამდენიმე დღიდან რამდენიმე კვირის ხანგრძლივობის დროით მასშტაბებში  $\Delta F=2-10$  ნიშვნელობებით და 20 -ის ტოლი ნაკადის მაქსიმუმი-მინიმუმთან ფარდობით. 0.3-10 კევ უბანში ანათვლის მნიშვნელობა აჭარბებდა 100 ანათვალი/წმ ზღვარს (რომელიც შეესაბამება გალაქტიკურ შთანთქმვაზე შესწორებულ 0.3-10 კევ ნაკადის დაახლოებით  $2.5 \times 10^{-9}$  ერგი  $\text{cm}^{-2}$  წმ<sup>-1</sup> მნიშვნელობას), პირველად ობიექტზე სვიფტის დაკვირვებების დაწყებიდან (ნახ. 6.5).

ჩვენს მიერ დაფიქსირებული იყო 0.3-10 კევ ნაკადის მიკროცვალებადობის 118 შემთხვევა, რომელიც მოიცავდა დაახლოებით 1.4 საათის ხანგრძლივობის ნაკადის გაორმაგებისა და განახევრების დროსაც, 20 შემთხვევაში ნაკადის ცვალებადობა დაკვირვებული იყო 1000 წმ-ზე ნაკლებ დროში (4-9% ანთებებით 180-960 წამში და 6-20% დაცემებით 180-960 წამში) უმეტესწილად მაღალი აქტივობის პერიოდებში და ეს შესაძლებელია დაკავშირებული იყოს ძლიერი მაგნიტური ველის მქონე ჯეტის დარტყმითი ტალღაში, მცირე-მასშტაბიან ტურბულენტობების არსებობასთან.

გალაქტიკურ შთანთქმვაზე შესწორებულმა "რბილმა" 0.3-2 კევ ნაკადმა გამოავლინა ძლიერი დადებითი კორელაცია "ხისტ" 2-10 კევ ნაკადთან, თუმცა ეს უკანასკნელი განიცდიდა უფრო ძლიერ ცვალებადობას, რომელმაც საინტერესო "ყოფაქცევა" გამოავლინა "სიხისტის ფარდობა-ნაკადის" სიბრტყეეზე (ნახ. 6.6)



**ნახ. 6.6** Mrk 421-ის სპექტრული ჰისტორიები სხვადასხვა ეპოქებში, ნორმალიზებულ რბილ 0.3-2 კევ (ისფერი წერტილები) და ხისტ 2-10 კევ (ლურჯი წერტილები) ნაკადებთან ერთად, როგორც დროის ფუნქცია. ხისტი ნაკადების სიკაშკაშის მრუდები ხელოვნურადაა წანაცვლებული უკეთესი თვალსაჩინოებისთვის.

ზოგიერთი ანთებისას ობიექტის სპექტრი უჩვენებდა საათის ისრის მიმართულების ჰისტორიებს, სხვადასხვა ეპოქებში კი ასევე ფიქსირდებოდა საპირისპირო შემთხვევებიც. საათის რიგის დროითი მასშტაბის ცვალებადობისას ობიექტი ძირითადად უჩვენებდა CW-ტიპის სპექტრულ ევოლუციებს, როგორც მოსალოდნელია ჯეტში რელატივისტური დარტყმით ტალღასთან ნაწილაკთა სტოხასტური აჩქარების არსებობის დროს. რენტგენული და მაღალენერგიული ანთებები ხშირად უჩვენებდნენ კორელაციულ ცვალებადობებს, თუმცა ჩვენ ასევე შეგვხვდა ისეთი შემთხვევებიც, რომელიც გულისხმობს ერთი ზონის თვით-კომპტონიზაციის სცენარის (one-zone SSC) არსებობას: ძლიერ ტერაელექტროვოლტის ანთებას ყოველთვის არ ახლდა შესადარი რენტგენული აქტივობა და პირიქით. ობიექტმა რენტგენული ანთებებისას ზოგჯერ განიცადა დაცემა ულტრაისფერ-ოპტიკურ უბნებში, რომელიც შესაძლოა ასოცირებული იყოს ელექტრონთა სტოხასტურ აჩქარებასთან, რომელთაც გააჩნიათ ვიწრო საწყისი ენერგიის განაწილება, ამ დროს მათი ენერგიის პიკები წანაცვლებენ მაღალი მნიშვნელობისაკენ და შესაბამისად იზრდება მათი რენტგენული სიკაშკაშეც.

ამ ნაშრომში წარმოდგენილი პერიოდი მიუთითებს სამიზნე ობიექტზე სვიფტის "ხშირ" ნიმუშიანი და მრავალტალღოვანი დაკვირვებების დიდ მნიშვნელობაზე. სვიფტისა და *NuSTAR*-ის ინტენსიური დაკვირვებების ფარგლებში 2013 წლის 10-21 აპრილს გამოვლინდა Mrk 421-ის გიგანტური რენტგენული ანთება. 2006 წლის აპრილში და ივლისში სვიფტის "ხშირ" ნიმუშიანი რენტგენული დაკვირვებებიდან გამოვლინდა ექსტრემალური სპექტრული ყოფაქცევა, რომელმაც ჩვენ მოქცვა საშუალება გამოგვევლინა იმ ფიზიკურ პროცესთა თვისებები, რომლებიც პასუხისმგებელი არიან ნაწილაკთა აჩქარებაზე ასეთ მარალ ენერგიებამდე და თან იწვევენ ნაკადის ცვალებადობას დროის სხვადასხვა მასშტაბებში.

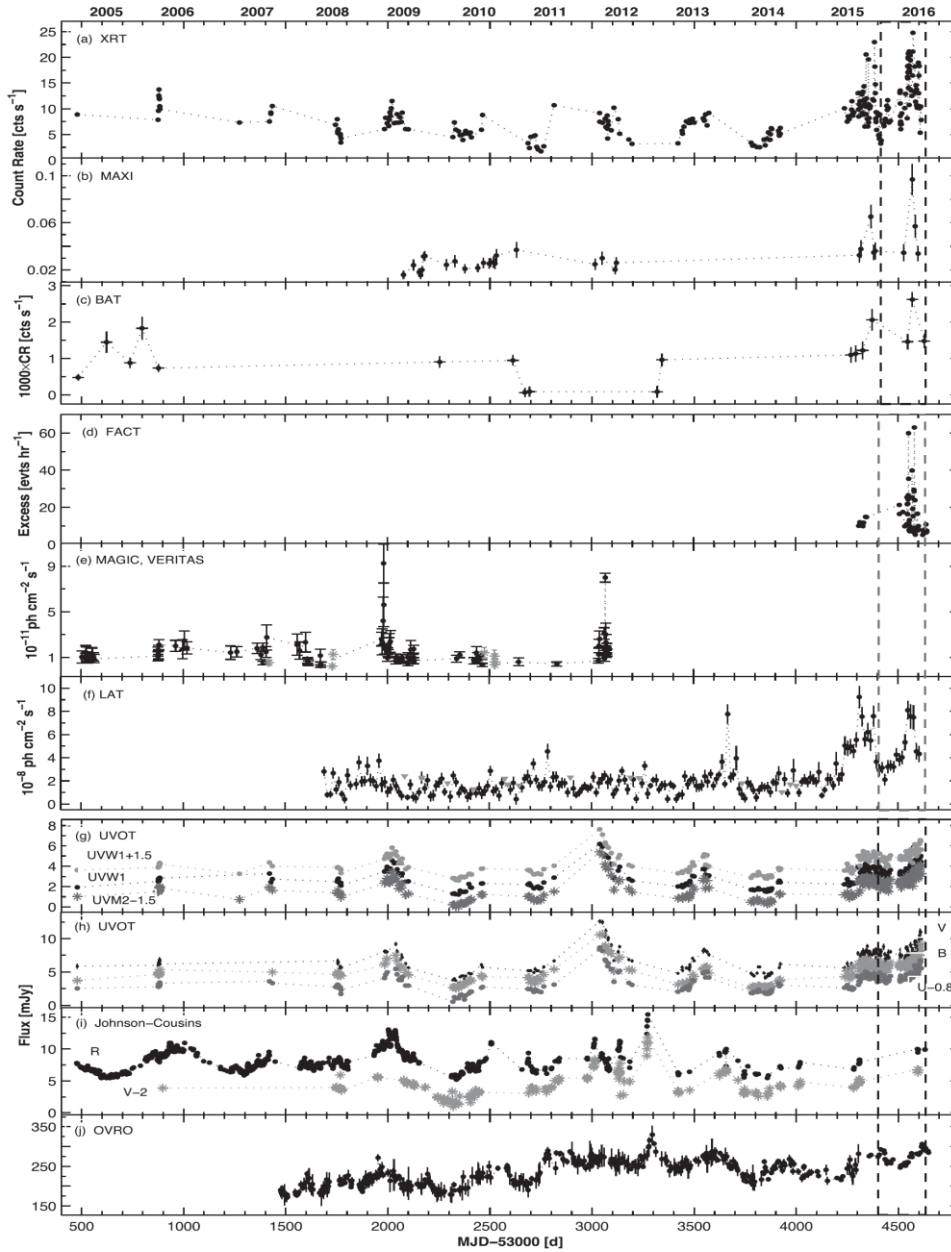
#### **6.4 ლაცერტიდ 1ES 1959+650-ის მეორე ძლიერი რენტგენული ანთება და მრავალსიხშირული ცვალებადობა 2016 წლის იანვარ–აგვისტოში.**

(Publication: **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 473, Issue 2, p.2572-2564 (2018))

2016 წლის იანვარ–აგვისტოში, სვიფტის რენტგენული ტელესკოპის დაკვირვებების დეტალურმა ანალიზმა გამოავლინა, რომ 1ES 1959+650 ლაცერტიდმა განიცადა კიდევ ერთი ძლიერი რენტგენული ანთება 5.5 თვის შემდეგ, მისი პირველი "გიგანტური" ანთებიდან. (ნახ. 6.7; 2015 წლის 1 აგვისტო-2016 წლის 19 იანვარი; იხ. Kapanadze, B. et al. 2016a, MNRAS, 461, L26 (Period I). ობიექტმა 2016 წლის 2 ივლისს (MJD57571.24) უჩვენა ყველაზე მაღალი 0.3-10 კეეV ანათვლის მნიშვნელობა, 24.78 ანათვალი/წმ, რომელიც 15%-ით უფრო მაღალი აღმოჩნდა ვიდრე 2015 წელს დაფიქსირებული მისი უმაღლესი მნიშვნელობა (MJD57392.75; Period 1; იხ. ნახ 13a), უფრო მეტიც, ანათვლის საშუალო შეწონილი მაჩვენებელი ( $\overline{CR}$ ) 2016 წლის 4 აგვისტოს დაკვირვებებიდან, როდესაც სამიზნე ობიექტი იყო ყველაზე აქტიური (Period 3) ტოლი იყო 15.25 -ის, განსხვავებით "Period 1"-საგან, როდესაც ეს მნიშვნელობა იყო  $9.72 \pm 0.02$  ანათვალი/წმ.



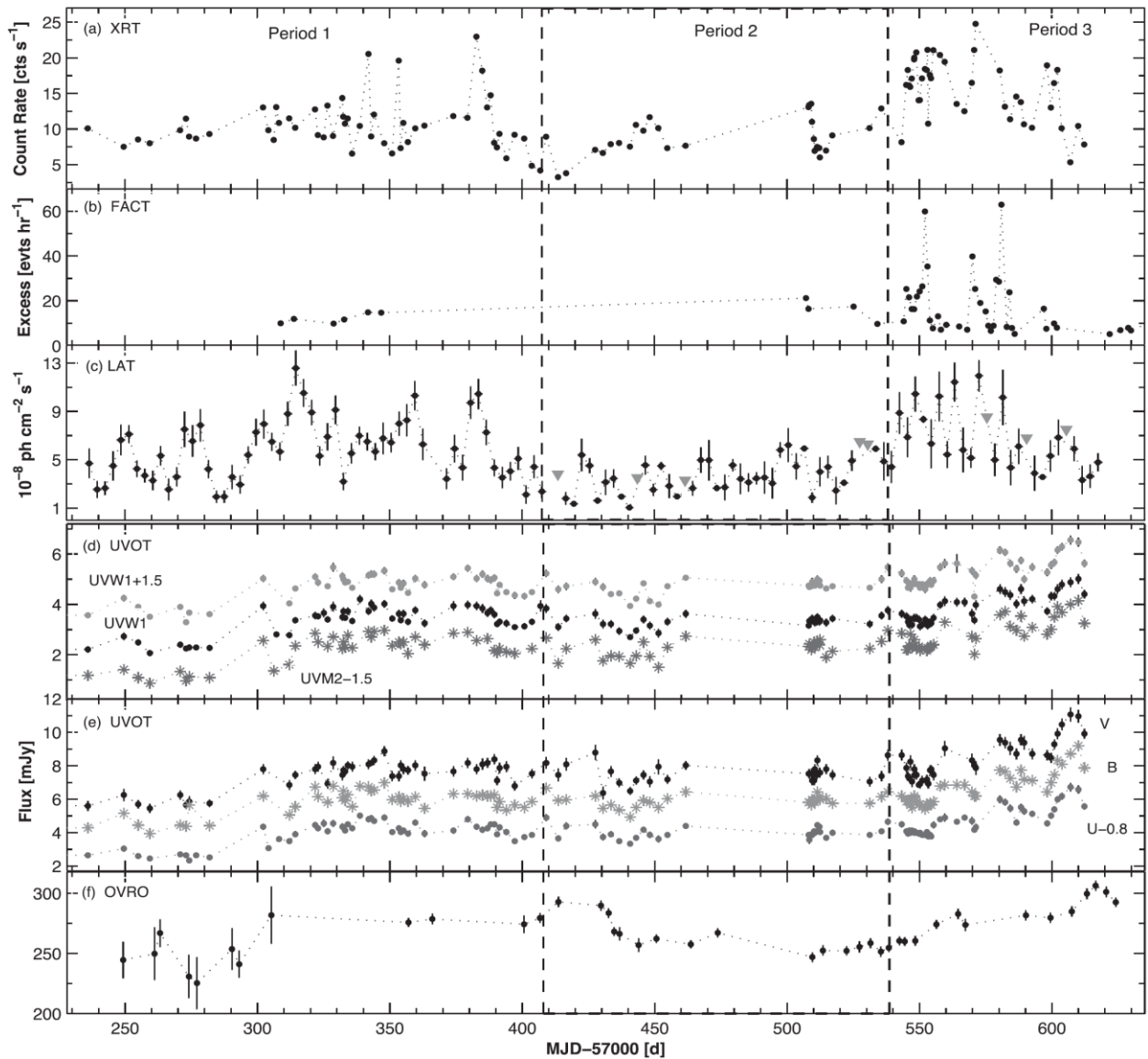
ჩვენ გამოვყავით სვიფტის 2015 წლის ავისტოდან 2016 წლის აგვისტომდე წარმოებული დაკვირვებები მისი წინა 10.35 წლის დაკვირვებებისაგან, საიდანაც მიიღებოდა მნიშვნელობა:  $\overline{CR}_{2005-2015} = 5.91$  ანათვალი/წმ, ე.ი. ზემოთხსენებული 1 წლის პერიოდი იყო ის ეპოქა, როდესაც ჩვენი სამიზნე ობიექტი იმყოფებოდა ყველაზე მაღალ რენტგენულ აქტივობაში მას შემდეგ, რაც სვიფტმა დაიწყო მასზე დაკვირვება. ამ ორი უძლიერეს აქტივობას შორის ჩვენ გამოვყავით პერიოდი, როდესაც ობიექტი იყო "ზომიერად" აქტიური (2016 წლის იანვარი-მაისი; 'Period 2') ნაკადის მაქსიმუმი-მინიმუმთან მნიშვნელობით  $R = 4.19$  და მაქსიმალური 0.3-10 კევ ანათვლის მნიშვნელობით 13.54 ანათვალი/წმ.



**ნახ. 6.7** 1ES 1959+650-ის მრავალტალღოვანი სიკაშკაშის მრუდები, მიღებული 2005-2016 წლებში სვიფტის XRT რენტგენული ტელესკოპიდან (ზედა პანელი), *MAXI* (პანელი b), *BAT* (პანელი c), *FACT* (პანელი d), *MAGIC* და *VERITAS* (პანელი e), *Fermi-LAT* (პანელი f), *UVOT* (g და h პანელები), მიწისზედა ტელესკოპები (პანელი i) და *OVRO* (პანელი j). ჩვენ გამოვიყენეთ დღე-ღამეზე გასაშუალებული "ბიჯები" XRT, *BAT*, *FACT*, *UVOT*, *Steward* და *OVRO* მონაცემებისთვის; 1 2 და 4 კვირიანი "ბიჯები" შესაბამისად *MAXI*, *LAT* და *BAT* დაკვირვებებისთვის. სიკაშკაშის მრუდები ვერტიკალურ წყვეტილ ხაზებში შეესაბამება 2016 იანვარი-აგვისტო პერიოდს.

კვლევისას გამოვლინდა, რომ გრძელპერიოდიან რენტგენულ ანთებებს თან ახლდა ხანმოკლე ანთებებიც (რამდენიმე კვირის ხანგრძლივობის), რომელიც ხასიათდებოდა ნაკადის ძალიან სწრაფი აკაშკაშებით და შემდგომი დაცემით 0.2-3.4 დღის განმავლობაში მაქსიმუმისა და მინიმუმის ფარობით 1.9-3.1. უფრო მეტიც, ჩვენს მიერ გამოვლინდა რენტგენული მიკროცვალებადობების 35 შემთხვევა (ნახ. 6.8), რომელმაც უჩვენა რამდენიმე ძალიან სწრაფი ფლუქტუაცია (14-21% 1კწმ-ში) და დიდი ცვალებადობა (სიკაშკაშის 17.2 კ წმ-ში,  $F_{max}/F_{min}=2.3$  დაცემით).

წინა წლის მგავსად, 2016 წლის ივნისი-აგვისტო ხასიათდებოდა რენტგენული და ტერაელექტრონვოლტი უბნების ცვალებადობათა შორის კორელაციის სისუსტით. სხვა მხრივ, 2015 წლის აგვისტოდან 2016 წლის აგვისტომდე პერიოდში 1ES 1959+650 უჩვენებდა 0.3-100 გევ ნაკადის დადებითი კორელაციას რენტგენულ უბანთან და ძალიან სუსტ კავშირს UVOT უბნის ნაკადებთან, სხვა ზოგიერთი კაშკაშა და კარგად შესწავლილი ლაცერტიდებისაგან განსხვავებით. ეს შედეგი საფუძველს გვაძლევს ვივარაუდოთ, რომ რენტგენული ფოტონების გადასხივება მევ/გევ ენერგიებზე შესაძლებელია "კლეინ-ნიშინას რეჟიმში" უფრო ეფექტურად მიმდინარეობდა, ვიდრე "ტომსონის რეჟიმით" UV ფოტონების გადასხივება იმავე ენერგიებზე, თუმცა მტკიცე დასკვნის გამოტანა შეუძლებელია, რადგან ობიექტის რეგისტრაცია მევ/გევ ენერგიებზე ნაკლებად არის გამოვლენილი. ნაკადის სწრაფ ცვალებადობებთან ერთად ობიექტმა ასევე გამოავლინა ენერგიის სპექტრის ექსტრემალური ყოფაქცევა, სპექტრი ძირითადად იყო გამრუდებული და ენერგიის განაწილების პიკმა გამოავლინა ცვალებადობა თითქმის 12 კევ-მდე, ობიექტისათვის პირველად დაფიქსირდა ენერგიის განაწილების პიკის მდებარეობა 10 კევ-ის მიღმა მას შემდეგ, რაც სვიფტმა დაიწყო მასზე დაკვირვება. 2016 წლის ივნისი-აგვისტოს ანთებისას,  $E_p$  -ის მნიშვნელობათა უდიდესი ნაწილი მეტი იყო 2 კევ-ზე, რაც იშვიათია ლაცერტიდებისთვის.



**ნახ. 6.8** 1ES 1959+650-ის მრავალტალღოვანი ცვალებადობები, 1-3 პერიოდებში (იგივე დროითი ბიჯებით, როგორც ნახ. 13-ზე, გარდა 3 დღიანი "ბიჯის" ინერვალის LAT მონაცემებისა). რუხი სამკუთხედები  $c$  პანელზე შეესაბამება LAT ნაკადის  $2\sigma$  დონის ზედა საზღვარს, როდესაც ობიექტი დაფიქსირებული იყო 3 $\sigma$ -ზე ნაკლებ მნიშვნელობაზე.

1ES 1959 + 650 -ის პირველი ძლიერი ანთებისაგან განსხვავებით, 2016 წლის ივნისი – აგვისტოში გამოვლინდა რენტგენული სპექტრის შედარებით მცირე სიმრუდე და ანტიკორელაცია ენერჯის განაწილების პიკთან, რაც მოსალოდნელია რენტგენული ელექტონების ეფექტური სტოხასტური აჩქარების დროს მაგნიტური

ტურბულენტობებიდან ლაცერტიდების ჯეტში დარტყმით ტალღის ფრონტთან ახლოს. ეს ეპოქა ასევე ხასიათდებოდა უმეტესწილად საათის ისრის მიმართულების სპექტრული ჰისტერიქსებით "HR-Flux"- სიბრტყეზე, მაშინ როდესაც საპირისპირო სპექტრული ევოლუცია იყო დაკვირვებული 2015 წლის აგვისტო–2016 წლის მაისის პერიოდში.

ხანმოკლე ანთებების დროს ფოტონ-ინდექსი ზოგჯერ ხდებოდა 1.70-ზე უფრო ხისტი, რომელიც მოსალოდნელია ზოგიერთი ადრონული ორ ზონიანი თვით-კომპტონისაციის სცენარისას (two-zone SSC) . აღსანიშნავია, რომ ასეთი ხისტი სპექტრები დაიკვირვებოდა MD57029–57043, 57058–57065, 57085–57092 პერიოდებში, მაშინ, როდესაც არ დაიკვირვებოდა კორელაცია რენტგენულ-მაღალენერგიულ/მალიან მაღალენერგიულ (X-ray–HE/VHE) ცვალებადობებს შორის, რაც უფრო მარტივად აიხსნება ადრონული სცენარის ფარგლებში.

ჩვენ დავასკვნით, რომ 1ES 1959+650 წარმოადგენს ერთ-ერთ ექსტრემალურ ლაცერტიდს, გამოსხივების ნაკადისა და სპექტრის მოულოდნელ ცვალებადობებთან ერთად, უჩვეულოდ ძლიერ და ხანგრძლივ რენტგენულ ანთებებთან და "ობოლ" ტერაელექტრონვოლტ მოვლენებთან. აქედან გამომდინარე აუცილებელია სამომავლოდ უფრო ინტენსიურად იყოს ეს ობიექტი შესწავლილი სპექტრის ყველა უბანში, რათა უფრო სიღრმისეულად შევისწავლოთ აქტიური გალაქტიკათა ფენომენი და ბლაზარების ბუნება.

## თავი 7. სადოქტორო ნაშრომის შედეგების მოკლე აღწერა

სადისერტაციო ნაშრომის ფარგლებში განხორციელდა ლაცერტიდთა რენტგენული გამოსხივების ნაკადისა და სპექტრული ცვალებადობის ერთერთი მასშტაბური კვლევა, რომელიც დაფუძნებული იყო თანამგზავრ "სვიფტზე" არსებული რენტგენული ტელესკოპის მეშვეობით მიღებული მასალის ანალიზი საფუძველზე.

კვლევის ფარგლებში, სამიზნე ობიექტებმა გამოამჟღავნეს 0.3-10 კევ უბნის გამოსხივების ნაკადის ხანგრძლივი ცვალებადობის, ხანმოკლე ცვალებადობისა და მიკროცვალებადობათა მრავალი შემთხვევა. ძლიერ ცვალებადობას განიცდიან სპექტრული პარამეტრებიც, რომელთა ურთიერ კორელაციისა და ობიექტთა გამოსხივების სხვადასხვა სიხშირეთა შორის აქტივობების შედარებამ, ჩვენ საშუალება მოგვცა გაკვეყთებინა გარკვეული დასკვნები, გამომსხივებელი ობიექტის შინაგან სტრუქტურასა და მაღალენერგიული ფოტონების გამომხივებელი სხვადასხვა ფიზიკური მექანიზმების შესახებ.

### ხანგრძლივი რენტგენული ანთებები:

საკვლევი ობიექტები ამჟღავნებდნენ ძლიერ რენტგენულ ცვალებადობას ხანგრძლივ დროით მასშტაბებში. ზოგიერთ ეპოქებში რენტგენულ ანთებებს თან ახლდათ გააქტიურება ოპტიკურ და ულტრაიისფერ უბნებშიც, თუმცა, ხშირად არ შეიმჩნეოდა კორელაციები 0.3-10კევ უბანსა და დაბასიხშირულ გამოსხივებებს შორის. გრძელპერიოდის რენტგენული ანთებები შესაძლებელია დაკავშირებული იყოს ბლაზარის ჯეტში რელატივისტური დარტყმითი ტალღის გავრცელებასთან, რომელიც იწვევს ჯეტის ნივთიერების ძლიერ გახურებას.

**ცხრილი 8.** სვიფტის რენტგენული ტელესკოპით წარმოებული დაკვირვებების, ხანგრძლივი რენტგენული ანთებების დროითი ანალიზის შედეგები.

ობიექტი	$F_{\min}$ (cts /s)	$F_{\max}$ (cts /s)	$F_{\min}(10^{-11}$ ერგი სმ <sup>2</sup> წმ <sup>-1</sup> )	$F_{\max}(10^{-11}$ ერგი სმ <sup>2</sup> წმ <sup>-1</sup> )	ცვალებადობის ხასიათი
BZBJ0033-1921	0.12(0.02)	0.54(0.03)	0.64(0.07)	1.31(0.04)	არაპერიოდული
BZBJ0204-3333	0.20(0.01)	0.26(0.01)	0.78(0.06)	1.07(0.05)	არაპერიოდული
BZBJ1137-1710	0.11(0.02)	0.45(0.03)	0.85(0.08)	2.01(0.08)	არაპერიოდული
BZBJ1422+5801	0.23(0.02)	0.72(0.03)	0.73(0.09)	2.01(0.06)	არაპერიოდული
BZBJ1503-1523	0.15(0.02)	1.12(0.06)	0.80(0.09)	3.12(0.07)	არაპერიოდული
BZBJ1517+6525	0.18(0.01)	1.29(0.05)	0.55(0.06)	3.39(0.06)	არაპერიოდული
BZBJ1756+5522	0.08(0.02)	0.34(0.04)	0.66(0.08)	1.25(0.05)	არაპერიოდული
1ES 2344+514	0.16(0.02)	2.24(0.03)	1.11(0.12)	10.79(0.04)	არაპერიოდული
Mrk 421	7.69(0.05)	155.63(0.22)	39.81(0.01)	562.43(0.01)	არაპერიოდული
1ES 1959+650	3.23(0.05)	24.78(0.25)	11.56(0.03)	104.23(0.14)	არაპერიოდული

**ხანმოკლე რენტგენული ანთებები:**

ხანგრძლივ რენტგენულ ანთებებთან ერთად, საკვლევა ობიექტებმა (BZBJ0204-3333 და BZBJ1756+5522-ის გარდა) ასევე გამოავლინეს ხანმოკლე რენტგენული ანთებების რამდენიმე შემთხვევა (იხ. ცხრილი 9).

**ცხრილი 9.** სვიფტის რენტგენული ტელესკოპით წარმოებული დაკვირვებების, ხამოკლე რენტგენული ანთებების დროითი ანალიზის შედეგები.

ობიექტი	ანთებათა რაოდენობა	F <sub>var</sub> (%)	F <sub>max</sub> /F <sub>min</sub>	ცვალებადობის ხასიათი
BZBJ0033-1921	1	23.3(1.02)	1.4	არაპერიოდული
BZBJ0204-3333	-	--	-	--
BZBJ1137-1710	4	17.8(0.08)-33.6(1.15)	1.51-2.01	არაპერიოდული
BZBJ1422+5801	1	16.6(2.31)	1.58	არაპერიოდული
BZBJ1503-1523	1	19.2(1.87)	2.12	არაპერიოდული
BZBJ1517+6525	2	18.4(1.72)-42.4(3.26)	1.62-2.80	არაპერიოდული
BZBJ1756+5522	--	--	--	--
1ES 2344+514	7	41.1(4.01)-61.3(5.38)	3.92-2.36	არაპერიოდული
Mrk 421	50	27.6(4.52)-67.4(1.34)	2.71-9.53	არაპერიოდული
1ES 1959+650	60	31.2(2.75)-38.0(3.20)	3.56-3.61	არაპერიოდული

**მიკროცვალებადობა:**

კვლევის ფარგლებში ხშირად დაიკვირვებოდა ერთ დღე-ღამეზე ნაკლები ხანგრლივობის ფლუქტუაციები, რომლებიც თან ახლდა ობიექტთა მოკლეპერიოდულ აქტივობებს სხვადასხვა ეპოქებში (იხ. ცხრილი 10), მათი წარმოშობა დაკავშირებული უნდა იყოს რელატივისტურ ჯეტში დარტყმითი ტალღის გავრცელებისას, მისი ფრონტისა და ჯეტის პლაზმაში არსებული მცირემასშტაბიან არაერთგვაროვნებებს (სავარაუდოდ ტურბულენტური წარმოშობის) შორის ურთიერთქმედებასთან, რომელმაც შესაძლებელია გამოიწვიოს ძალიან სწრაფი რენტგენული ანთებები და ერთ დღე-ღამეზე ნაკლები დროითი მასშტაბის ფლუქტუაციები. მიკროცვალებადობათა არარსებობა კი შესაძლებელია დაკავშირებული იყოს ობიექტების გამოსხივებაში დოპლერის ფაქტორის



მარალ მნიშვნელობასთან, რომელიც ხელს უშლის დაბალი ამპლიტუდის მქონე ფლუქტუაციების გამოვლენას.

**ცხრილი 10.** სვიფტის რენტგენული ტელესკოპით წარმოებული დაკვირვებების მიკროცვალებადობათა დროითი ანალიზის შედეგები.

ობიექტი	ანთებათა რაოდენობა	$F_{var}$ (%)	ხანგრძლივობა (კ წმ)
BZBJ0033-1921	--	--	--
BZBJ0204-3333	--	--	--
BZBJ1137-1710	--	--	--
BZBJ1422+5801	1	13.5(0.06)	2.38
BZBJ1503-1523	1	14.4(0.08)	0.75
BZBJ1517+6525	4	13.4(0.12) - 25.1(0.07)	1.53 - 1.70
BZBJ1756+5522	--	--	--
1ES 2344+514	5	18.0(7.51) - 39.0(9.62)	0.90 - 70.2
Mrk 421	118	78.2(5.65) - 22.3(3.17)	0.61 - 68.2
1ES 1959+650	35	39.10(0.22) - 18.2(1.89)	2.21 - 17.2

**სპექტრული თვისებები:**

საკვლევ ობიექტა სპექტრები უმეტესწილად კარგად აღიწერებოდნენ მარტივ-ხარისხოვანი მოდელებით, თუმცა ხშირად დაიკვირვებოდა ისეთი სპექტრული სიმრუდეები რომლებიც კარგად ერგებოდნენ ლოგარითმულ-პარაბოლური მოდელებს (იხ. ცხრილი 11)

**ცხრილი 11.** სვიფტის რენტგენული ტელესკოპით წარმოებული დაკვირვებების სპექტრული ანალიზის შედეგები, რომელიც წარმოებულია მარტივ-ხარისხოვანი და ლოგარითმულ-პარაბოლური ფუნქციებით.

ობიექტი	PL	LP		
	$\Gamma$	$a$	$b$	$E_p$
BZBJ0033-1921	2.13(0.13)-2.29(0.09)	2.11(0.05)-2.30(0.09)	0.49(0.31)-0.55(0.15)	0.49(0.16)-0.79(0.13)
BZBJ0204-3333	1.70(0.07)-1.79(0.07)	1.73(0.06)-2.07(0.15)	0.55(0.15)-0.62(0.13)	1.76(0.28)-1.90(0.23)
BZBJ1137-1710	1.48(0.15)-1.84(0.12)	1.39(0.11)-1.67(0.13)	0.75(0.24)-1.09(0.39)	1.42(0.58)-2.55(0.67)
BZBJ1422+5801	1.78(0.10)-2.22(0.18)	1.89(0.07)-2.03(0.15)	0.36(0.20)-0.88(0.24)	1.42(0.30)-2.88(1.17)
BZBJ1503-1523	1.75(0.17)-2.19(0.16)	1.47(0.12)-1.73(0.11)	0.74(0.28)-1.19(0.27)	1.52(0.46)-1.67(0.49)
BZBJ1517+6525	1.58(0.07)-2.32(0.08)	1.57(0.08)-2.17(0.06)	0.12(0.08)-0.57(0.19)	2.40(1.07)-3.53(1.52)
BZBJ1756+5522	1.98(0.13)-2.35(0.17)	1.63(0.07)-1.68(0.02)	0.80(0.37)-0.95(0.17)	1.66(0.42)-2.56(0.84)
1ES 2344+514	1.44(0.12)-2.21(0.10)	1.36(0.08)-1.87(0.07)	0.36(0.24)-0.83(0.13)	1.35(0.44)-6.03(0.89)
Mrk 421	1.68(0.14)-2.74(0.18)	1.62(0.02)-2.63(0.06)	0.09(0.02)-0.47(0.04)	0.80(0.09)-7.94(0.14)
1ES 1959+650	1.71(0.08)-2.22(0.15)	1.50(0.02)-2.28(0.04)	0.12(0.06)-0.81(0.05)	0.39(0.09)-12.8(0.11)

**აჩქარების მექანიზმები:**

საკვლევ ობიექტებში ძირითადად არ დაიკვირვებოდა დიდი სპექტრული სიმრუდეები. სპექტრული სიმრუდე როგორც ცნობილია, სინქროტრონული გამოსხივების ენერჯის სპექტრულ განაწილებაში მოსალოდნელია მაშინ, როდესაც ადგილი აქვს ნაწილაკთა აჩქარების შემდეგ მექანიზმებს: ელექტრონები იძენენ ენერჯიას ბლაზარის ჯეტში რელატივისტური დარტყმითი ტალღის ფრონტთან ფერმის პირველი რიგის აჩქარებების გზით (ე.წ. "ენერჯიაზე დამოკიდებული აჩქარების ალბათობათა პროცესი"), მეორეს მხრივ სპექტრული სიმრუდე შესაძლებელია გამოვლინდეს ბლაზარის ჯეტში სტოხასტური

აჩქარების დროსაც, დარტყმითი ტალღის ფრონტთან ახლოს არსებული მაგნიტურ ტუბულენტობებში ფერმის მეორე რიგის აჩქარებების გზით, თუმცა ისეთ შემთხვევაში მოსალოდნელია შედარებით ნაკლები სპექტრული სიმრუდეები. ჩვენი კვლევის ფარგლებში დაბალი სპექტრული სიმრუდეები ძირითადად დაიკვირვებოდა მხოლოდ Mrk 421-ის შემთხვევაში.

## დისერტანტის სამეცნიერო ღონისძიებებში მონაწილეობა

*2013 წლის 26–28 აგვისტო;*

აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიისა და ბიურაკანის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის ერთობლივი კოლოქვიუმი “Instability and Evolution of Stars”; მოხსენების ტიპი - სექციის მოხსენება; მოხსენების სათაური: The swift observations of BL Lacertae object 1ES 2344+514. ბიურაკანის ასტროფიზიკური ობსერვატორია (სომხეთი)

*2016 წლის 31 მარტი–01 აპრილი;*

აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიისა და ბიურაკანის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის ერთობლივი კოლოქვიუმი. Joint Abastumani - Byurakan Colloquium; მოხსენების ტიპი - სექციის მოხსენება; მოხსენების სათაური: Long-term Multifrequency Variability of TeV Blazar 1ES 2344+514. აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორია (საქართველო)

*2016 წლის 23–26 მაისი;*

საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, “Frontier Research in Astrophysics II” (FRAPWS2016); მოხსენების ტიპი - სექციის მოხსენება; მოხსენების სათაური: Unprecedented X-ray Flaring Activity of Mrk 421 in 2013 April. მონდელიო (პალერმო), იტალია

*2016 წლის 12–23 სექტემბერი;*

ბიურაკანის მეხუთე საერთაშორისო საზაფხულო სკოლა ახალგაზრდა ასტრონომებისათვის. FIFTH BYURAKAN INTERNATIONAL SUMMER SCHOOL FOR YOUNG ASTRONOMERS; მოხსენების ტიპი - სექციის მოხსენება; მოხსენების სათაური: X-ray Flaring Activity of Mrk 421 in 2013 April. ბიურაკანის ასტროფიზიკური ობსერვატორია (სომხეთი)

*2019 წლის 09–10 სექტემბერი;*

International Conference “Active Galaxies and Quasars”; მოხსენების ტიპი - სექციის მოხსენება; მოხსენების სათაური: X-ray Spectral Studies of Distant High Energy Peaked BL Lacertae Objects. ბიურაკანის ასტროფიზიკური ობსერვატორია (სომხეთი)

**საგრანტო პროექტში მონაწილეობა:**

ფუნდამენტური კვლევების გრანტი, შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდი; პროექტის დასახელება: ლაცერტიდების შესწავლა მაღალ ენერგიებზე (FR/377/6-290/14; 2015 მაისი - 2018 მაისი).

## სამეცნიერო პუბლიკაციები

1. **The swift observations of distant high-energy peaked BL Lacertae objects**

Kapanadze, S; Kapanadze, B; Vercellone, S ; Romano, P; Neparidze L.

Publication: **Astrophysics and Space Science**, Volume 365, Issue 4, article id.66 (2020)

DOI: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020Ap%26SS.365...66K/abstract>

2. **The swift observations of BL Lacertae object 1ES 2344+514**

S. Kapanadze, B. Kapanadze, P. Romano, S. Vercellone & L. Tabagari

Publication: **Astrophysics and Space Science**, Volume 362, Issue 10, article id.196, 14 pp. (2017)

DOI: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017Ap%26SS.362..196K/abstract>

3. **Swift Observations of Mrk 421 in Selected Epochs. I. The Spectral and Flux Variability in 2005-2008**

Kapanadze, B. Vercellone, S. Romano, P. Hughes, P. Aller, M. Aller, H. Kharshiladze, O. Kapanadze, S. Tabagari, L.

Publication: **The Astrophysical Journal**, Volume 854, Issue 1, article id. 66, 27 pp. (2018)

DOI: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018ApJ...854...66K/abstract>

4. **The Second Strong X-ray Flare and Multifrequency Variability of 1ES 1959+650 in 2016 January-August**

Kapanadze, B. Dorner, D. Vercellone, S. Romano, P. Hughes, P. Aller, M. Aller, H. Reynolds, M. Kapanadze, S. Tabagari, L.

Publication: **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 473, Issue 2, p.2572-2564 (2018)

DOI: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018MNRAS.473.2542K/abstract>

5. **Strong X-ray flaring activity of the BL Lacertae source OJ 287 in 2016 October-2017**

Kapanadze, B. Vercellone, S. Romano, P. Hughes, P. Aller, M. Aller, H. Kapanadze, S. Tabagari, L.

Publication: **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 480, Issue 1, p.407-430 (2018)

DOI: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018MNRAS.480..407K/abstract>

6. **wift Observations of Mrk 421 in Selected Epochs. I. The Spectral and Flux Variability in 2005-2008**

Kapanadze, B. Vercellone, S. Romano, P. Hughes, P. Aller, M. Aller, H. Kharshiladze, O. Kapanadze, S. Tabagari, L.

Publication: **The Astrophysical Journal**, Volume 854, Issue 1, article id. 66, 27 pp. (2018)

DOI: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018ApJ...854...66K/abstract>

7. **The prolonged X-ray flaring activity of Mrk 501 in 2014**

Kapanadze, B. Dorner, D. Romano, P. Vercellone, S. Mannheim, K. Lindfors, E. Nilsson, K. Reinthal, R. Takalo, L. Kapanadze, S. Tabagari, L.

Publication: **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 469, Issue 2, p.1655-1672 (2017)

DOI: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017MNRAS.469.1655K/abstract>

8. **Mrk 421 after the Giant X-Ray Outburst in 2013**

Kapanadze, B. Dorner, D. Romano, P. Vercellone, S. Kapanadze, S. Tabagari, L.

Publication: **The Astrophysical Journal**, Volume 848, Issue 2, article id. 103, 26 pp. (2017)

DOI: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017ApJ...848..103K/abstract>

**9. X-Ray Flaring Activity of MRK 421 in the First Half of 2013**

Kapanadze, B. Dorner, D. Vercellone, S. Romano, P. Aller, H. Aller, M. Hughes, P. Reynolds, M. Kapanadze, S. Tabagari, L.

Publication: **The Astrophysical Journal**, Volume 831, Issue 1, article id. 102, 24 pp. (2016)  
DIO: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016ApJ...831..102K/abstract>

**10. A recent strong X-ray flaring activity of 1ES 1959+650 with possibly less efficient stochastic acceleration**

Kapanadze, B. Dorner, D. Vercellone, S. Romano, P. Kapanadze, S. Mdzinarishvili, T.

Publication: **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters**, Volume 461, Issue 1, p.L26-L31 (2016)  
DIO: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016MNRAS.461L..26K/abstract>

**11. Unprecedented X-ray Flaring Activity of Mrk 421 in 2013 April**

Kapanadze, B. Kapanadze, S. Romano, P. Vercellone, S. Tabagari, L.

Publication: **Frontier Research in Astrophysics II**, held 23-28 May, 2016 in Mondello (Palermo), Italy (FRAPWS2016)  
Bibcode: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016frap.confE..33K/abstract>

**12. The long-term Swift observations of the high-energy peaked BL Lacertae source 1ES 1959+650**

Kapanadze, B. Romano, P. Vercellone, S. Kapanadze, S. Mdzinarishvili, T. Kharshiladze, G.



Publication: **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 457, Issue 1,  
p.704-722 (2016)

DOI:

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016MNRAS.457..704K/abstract>

**13. The X-ray behaviour of the high-energy peaked BL Lacertae source PKS 2155-304 in the 0.3-10 keV band**

Kapanadze, B. Romano, P. Vercellone, S. Kapanadze, S.

Publication: **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 444, Issue 2,  
p.1077-1094 (2014)

DOI: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014MNRAS.444.1077K/abstract>

**14. Microvariability of 0.3-10 keV Flux in HBL Source PKS 2155-304**

Kapanadze, Bidzina; Kapanadze, Sergo; Vardosanidze, Manana

Publication: **International Journal of Modern Physics: Conference Series**, Volume 28, id.  
1460179 (2014)

DOI: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014IJMPS..2860179K/abstract>

## ბიბლიოგრაფია

- Abdo, A. A. et al. Discovery of pulsed  $\gamma$ -rays from the young radio pulsar PRS J1028–5819 with the Fermi Large Area Telescope (LAT), 2009, *The Astrophysical Journal*, 695, 72
- Abdo, A. A. et al. Gamma-ray Light Curves and Variability of Bright Fermi-detected Blazars, 2010, *The Astrophysical Journal*, 722, 520
- Acciari, V. A. et al. Simultaneous Multiwavelength Observations Of Markarian 421 During Outburst, 2009, *The Astrophysical Journal*, 703, 169
- Acciari, V. A. et al. TeV and Multi-wavelength Observations of Mrk 421 in 2006-2008, 2011, *The Astrophysical Journal*, 738, 25
- Albert J., et al., Observation of Very High Energy  $\gamma$ -Rays From The AGN 1ES 2344+514 In A Low Emission State With The MAGIC Telescope, 2007, *The Astrophysical Journal*, 662, 892
- Aleksić, J., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., et al. The 2009 multiwavelength campaign on Mrk 421: Variability and correlation studies, 2015a, *Astronomy and Astrophysics*, 576, 126
- Aliu, E., Archambault, S., Arlen, T., et al. Investigating Broadband Variability Of The Tev Blazar 1es 1959+650, 2014, *The Astrophysical Journal*, 797, 89
- Acciari V. A., et al., Multiwavelength Observations of the VHE Blazar 1ES 2344+514, 2011, *The Astrophysical Journal*, 738, 169
- Aleksić J., et al., The simultaneous low state spectral energy distribution of 1ES 2344+514 from radio to very high energies, 2013, *Astronomy and Astrophysics*, 556, A67
- Bade, N., Fink, H. H., & Engels, D. New X-ray bright BL Lacertae objects from the ROSAT All-Sky Survey, 1994, *Astronomy and Astrophysics*, 286, 381

Bade, N. et al. On the evolutionary behaviour of BL Lac objects, 1998, *Astronomy and Astrophysics*, 334, 459

Beckmann, V., Bade, N., & Wurknitz, O. The extreme high frequency peaked BL Lac 1517+656, 1999, *Astronomy and Astrophysics*, 352, 395

Bauer, F. E. et al. RBSC-NVSS Sample. I. Radio And Optical Identifications Of A Complete Sample Of 1500 Bright X-Ray Sources, 2000, *The Astrophysical Journal*, 129, 547

Blandford R. D., Rees M. J. 1978, in *Proc. Pittsburgh Conf. on BL Lac Objects*, 328

Brinkmann, W., & Siebert, J. Spectral properties of X-ray loud extragalactic radio sources, 1994, *Astronomy and Astrophysics*, 285, 283

Buson, S., Magill, J. D., Dorner, D., et al. 2016, *The Astronomer's Telegram*, 9010

Chevalier, J., Sanchez, D. A., et al. Variability studies and modelling of the blazar PKS 2155-304 in the light of a decade of multi-wavelength observations, 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484, 749

Cui, W. X-Ray Flaring Activity Of Markarian 421, 2004, *The Astrophysical Journal*, 605, 662

Dermer, C. D., Schlickeiser, R., & Mastichiadis, A. High-energy gamma radiation from extragalactic radio sources, 1992, *Astronomy and Astrophysics*, 256, L27

Dunkley, J. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Bayesian Estimation Of Cosmic Microwave Background Polarization Maps, 2009, *The Astrophysical Journal*, 701, 1804

Elvis, M., Plummer, D., Schachter, J., Fabiano, G. The Einstein Slew Survey, 1992, *The Astrophysical Journal*, 80, 257

Fichtel, C. E. et al., The First Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope (EGRET) Source Catalog, 1994, *The Astrophysical Journal*, 94, 551

Fossati, G., Buckley, J. H., Bond, I. H., et al. Multiwavelength Observations Of Markarian 421 In March 2001: An Unprecedented View On The X-Ray/TeV Correlated Variability, 2008, The Astrophysical Journal, 677, 906

Foster, G. Wavelets For Period Analysis Of Unevenly Sampled Time Series, 1996, The Astrophysical Journal, 112, 1709

Giebels, B., et al. Observation of X-ray variability in the BL Lac object 1ES1959+65, 2002, 571, The Astrophysical Journal, 763

Godambe S. V., et al., 2007, Journal of Physics G Nuclear Physics, 34, 1683

Giommi, P., Piranomonte, S., Perri, M., & Padovani, P. The sedentary survey of extreme high energy peaked BL Lacs, 2005, Astronomy and Astrophysics, 434, 385

Guainazzi et al. The quiescent state broadband X-ray spectrum and variability of Mkn421, 1999, Astronomy and Astrophysics, 342, 124

Gutierrez, K., et al. Multiwavelength Observations of 1ES 1959+650, One Year After the Strong Outburst of 2002, 2006, The Astrophysical Journal, 164, 742

Raiteri, C. et al. Multifrequency variability of the blazar AO 0235+164, 2010, Astronomy and Astrophysics, 459, 731

Kalberla P. M., et al. The Effelsberg-Bonn HI Survey: Milky Way gas, 2005, Astronomy and Astrophysics, 440, 775

Krawczynski, H. et al. Multiwavelength Observations of Strong Flares from the TeV Blazar 1ES 1959+650, 2004, The Astrophysical Journal, 601, 151

Kushwaha, P., Gupta, A. C., Wiita, P. J., et al. 2018a, MNRAS, 473, 1145 —2018b, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 479, 1672

Massaro, E. et al., Log-parabolic spectra and particle acceleration in the BL Lac object Mrk 421: Spectral analysis of the complete BeppoSAX wide band X-ray data set, 2004, *Astronomy and Astrophysics*, 413, 489

Mizuno, Y., et al., Magnetic field amplification and saturation in turbulence behind a relativistic shock, 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 439, 3490

Perlman, E. S., et al. The *EINSTEIN* Slew Survey Sample Of Bl Lacertae Objects, 1996, *The Astrophysical Journal*, 104, 251

Piranomonte, S. et al. The sedentary survey of extreme high-energy peaked BL Lacs. III. Results from optical spectroscopy, 2007, *Astronomy and Astrophysics*, 470, 787

Pita, S. et al. Spectroscopy of high-energy BL Lacertae objects with X-shooter on the VLT, 2014, *Astronomy and Astrophysics*, 565, 12

Jones, D. H. et al. The 6dF Galaxy Survey: Final Redshift Release (DR3) and Southern Large-Scale Structures, 2009, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399, 683

Kapanadze, B. et al. Swift Observations of Mrk 421 in Selected Epochs. I. The Spectral and Flux Variability in 2005–2008, 2018a, *The Astrophysical Journal*, 854, 66

Kapanadze, B. et al. Swift Observations of Mrk 421 in Selected Epochs. II. An Extreme Spectral Flux Variability in 2009–2012, 2018b, *The Astrophysical Journal*, 858, 68

Kapanadze, B. et al., A recent strong X-ray flaring activity of 1ES 1959+650 with possibly less efficient stochastic acceleration, 2016a, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 461, L26 (Paper I)

Kapanadze, B. et al. Strong X-Ray and Multiwavelength Flaring Activity for 1ES 1959+650, 2016 August–2017 November, 2018c, *The Astrophysical Journal*, 238, 13

Kapanadze, B. et al. X-ray flaring activity of Mrk421 in the first half of 2013, 2016, *The Astrophysical Journal*, 601, 151

Kapanadze, B. et al. The prolonged X-ray flaring activity of Mrk 501 in 2014, 2017, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 469, 1655

Kapanadze, B. et al. X-ray flaring activity of mrk 421 in the first half of 2013, 2016a, The Astrophysical Journal, 831,102

Kondo, I. et al.1984, Annals of the Tokyo Astronomical Observatory, Astrophysical Journal, 20, 130

Kutkin, A. M., Pashchenko, I. N., Lisakov, M. M., et al. 2018, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 475, 4994

Lomb, N. R. Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data, 1976, Astrophysics and Space Science, 39, 447

Macomb, N., Akerfof, C. W., Aller, H. D., et al. Multiwavelength Observations of Markarian 421 During a TeV/X-Ray Flare, 1995, The Astrophysical Journal, 449, L99

Mannheim, K. & Biermann, P. L. Gamma-ray flaring of 3C 279 - A proton-initiated cascade in the jet?, 1992, Astronomy and Astrophysics, 253L, 21M

Marscher, A. P., & Gear, W. K. Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273, 1985, The Astrophysical Journal, 298, 114

Marscher, A.P. Variability of the Non-thermal Emission in the Jets of Blazars, 1996, Astronomical Society of the Pacific Conference, 110, 248

Massaro, E. et al. Log-parabolic spectra and particle acceleration in the BL Lac object Mkn421: spectral analysis of the complete *BeppoSAX* wide band X-ray data set , 2004, Astronomy and Astrophysics, 413, 489

Massaro F., Paggi A., Cavaliere A. X-ray and TeV emissions from high-frequency-peaked BL Lac objects, 2011, The Astrophysical Journal, 742, L32

Maraschi, L., et al, Simultaneous X-Ray And Tev Observations Of A Rapid Flare From Markarian 421, 1999, The Astrophysical Journal, 526, L81

Marscher, A. P, Turbulent, Extreme Multi-Zone Model For Simulating Flux And Polarization Variability In Blazars, 2014, The Astrophysical Journal, 780, 787

Mattox, J. R. Et Al. The Identification Of Egret Sources With Flat-Spectrum Radio Sources, 1997, The Astrophysical Journal, 481, 95

McNaron-Brown, K. et al., OSSE Observations of Blazars, 1995, The Astrophysical Journal, 451, 575

Nilsson, K., et al., Host galaxy subtraction of TeV candidate BL Lacertae objects, 2007, Astronomy and Astrophysics, 475: 199-207

Tagliaferri, G., et al. Simultaneous Multiwavelength Observations of the Blazar 1ES 1959+650 at a Low TeV Flux, 2008, The Astrophysical Journal, 679, 1029

Takahashi, T., Kataoka, J., Madejski, G., et al. ASCA Observation of an X-Ray/TeV Flare from the BL Lacertae Object Markarian 421, 1996, The Astrophysical Journal, 470, 89

Tramacere, A. et al. Signatures of synchrotron emission and of electron acceleration in the X-ray spectra of Mrk 421, 2007, Astronomy and Astrophysics, 466, 521

Tramacere, A. et al. Swift observations of the very intense flaring activity of Mrk 421 during 2006. I. Phenomenological picture of electron acceleration and predictions for MeV/GeV emission, 2009, Astronomy and Astrophysics, 501, 879

Sambruna, R. M., Maraschi, L., & Urry, C. M. ASCA Observations of Flat Spectrum Radio Quasars with Steep Soft X-Ray Spectra, 1996, The Astrophysical Journal, 463, 444

Scargle, J. D. Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data, 1982, The Astrophysical Journal, 263, 835

Smith, P. S., Balonek, T. J., Heckert, P. A., & Elston, R. The Optical and Near-Infrared Polarization Properties of the OVV Quasar 3C 345, 1986, *The Astrophysical Journal*, 305, 484

Smith, P. S., Elston, R., Berriman, G., Allen, R. G., & Balonek, T. J. Evidence for Accretion Disks in Highly Polarized Quasars, 1988, *The Astrophysical Journal*, 326, L39

Sokolov, A. et al. Synchrotron Self-Compton Model for Rapid Nonthermal Flares in Blazars with Frequency-Dependent Time Lags, 2004, *The Astrophysical Journal*, 613, 725

Piranomonte, S. et al. The sedentary survey of extreme high-energy peaked BL Lacs III. Results from optical spectroscopy, 2007, *Astronomy and Astrophysics*, 470, 787

Raiteri, C. et al. Optical observations of eight X-ray selected BL Lacertae objects, 1998, *Astronomy and Astrophysics*, 132, 361

Rani, B. et al. Nearly Periodic Fluctuations In The Long-Term X-Ray Light Curves Of The Blazars Ao 0235+164 And 1es 2321+419, 2009, *The Astrophysical Journal*, 696, 2178

Ravasio, M. et al. Observing Mkn 421 with XMM-Newton: The EPIC-PN point of view, 2004, *The Astrophysical Journal*, 424, 841

Romero, G. E. et al. Optical microvariability of southern AGNs, 1999, *Astronomy and Astrophysics*, 135, 477

Ushio, M., et al, Suzaku Wide Band Analysis of the X-Ray Variability of TeV Blazar Mrk 421 in 2006, 2009, *The Astrophysical Journal*, 699, 1964

VanderPlas, J. T. Understanding the Lomb-Scargle Periodogram, 2018, *The Astrophysical Journal*, 236, 16

Vovk, Y., & Neronov, A. Variability Of Gamma-Ray Emission From Blazars On Black Hole Timescales, 2013, *The Astrophysical Journal*, 767, 103



Wolter, A. et al., *BeppoSAX* Spectral Survey of soft X-ray selected BL Lacs, 1998, *Astronomy and Astrophysics*, 335, 899

Wood, K. S. et al., The *HEAO* A-I X-Ray Source Catalog, 1984, *The Astrophysical Journal*, 56, 507