

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი
ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი



ფიზიკის დეპარტამენტის სტუდენტის
ალექსანდრე უბირიას საბაკალავრო ნაშრომი

მონაცემების დამუშავება რადიო ასტრონომიაში

ხელმძღვანელები: ოლეგ ხარშილაძე;
ასოცირებული პროფესორი, ფიზიკის დეპარტამენტი;
თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი.

ბიძინა კაპანაძე;
ასოცირებული პროფესორი, ასტრონომია-ასტროფიზიკის
მიმართულებით;
ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტი.

თბილისი
2019 წელი

სარჩევი

0	ანოტაცია	2
1	რადიო ასტრონომია, ინტერფერომეტრია და აპერტურული სინთეზი	3
1.1	ისტორია	3
1.2	რადიო ტელესკოპების აგებულება და მუშაობა	4
1.3	რადიო ინტერფერომეტრია და აპერტურული სინთეზი	7
2	რადიო ფანჯარა	9
3	ობიექტის მიმოხილვა	11
4	ლიტერატურის მიმოხილვა	15
5	გამოყენებული აპარატურა	17
5.1	მიჩიგანის უნივერსიტეტის ტელესკოპი	17
5.2	„მოჰავეს“ პროგრამა	17
5.3	ოვენსის ხეობის ტელესკოპი	18
6	საჭირო პარამეტრები და სიდიდეები	19
6.1	მოდულირებული იულიუსის თარიღი (MJD)	19
6.2	ნათება, ნაკადი და ნაკადის სიმკვრივე	19
6.3	პოლარიზაცია	20
6.4	ფარდობითი ამპლიტუდა	20
6.5	ვეივლენტი-ანალიზი	21
7	შედეგები	24
8	შედეგების ანალიზი და დასკვნა	32
9	ლიტერატურის ნუსხა	33

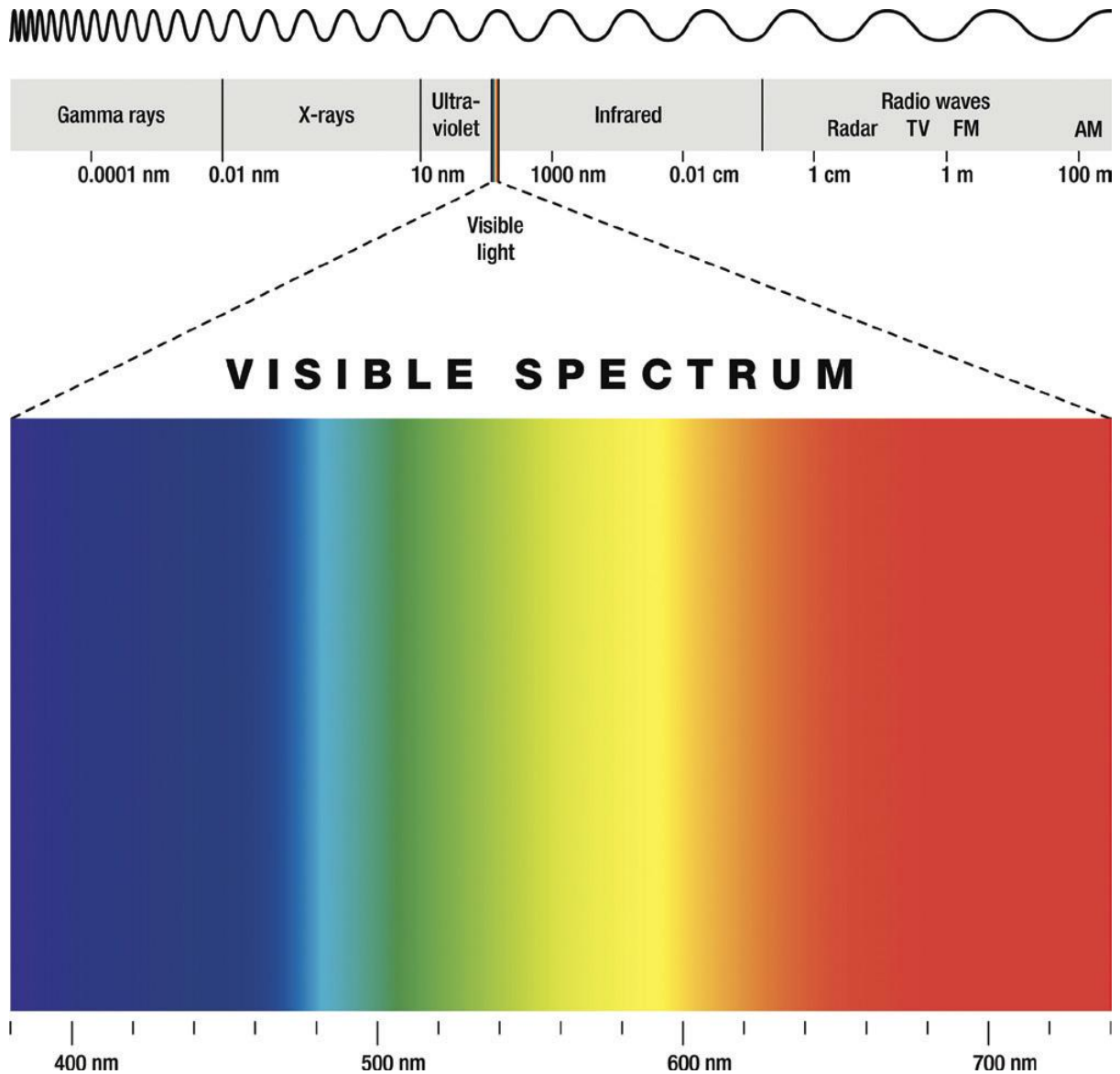
ანოტაცია

წარმოვადგენთ ლაცერტიდი OJ 287-ის რადიო დაკვირვებების შედეგებს. გამოვიყენეთ მიჩიგანის უნივერსიტეტის ფიჩის მთის ობსერვატორიის, ოვენსის ხეობის რადიო ობსერვატორიისა და "მოჰავეს" პროგრამის მონაცემები 15 GHz-ზე 1974 წლის ივნისიდან 2019 წლის აპრილამდე. სიკაშკაშის ვარიაციის დასამუშავებლად ვიყენებთ ვეივლეტ სპექტრალურ ანალიზს. მიღებულ შედეგებს ვადარებთ ობიექტზე უკვე არსებულ ოპტიკურ დაკვირვებებს.

დამატებით ვანალიზებთ 15 GHz-ზე არსებული რადიო ტალღების პოლარიზაციის სიდიდისა და პოზიციური კუთხის მონაცემებს. მათი ვეივლეტ-ანალიზის შედეგებს ვადარებთ არსებულ თეორიულ მოდელებს. სიკაშკაშის ვარიაციის მონაცემებზე მუშაობისას განვიხილავთ ფარდობით ამპლიტუდას, როგორც სპექტრალური მონაცემების სტატისტიკური დამუშავების ადეკვატურ ხელსაწყოს.

რადიო ასტრონომია, ინტერფერომეტრია და აპერტურული სინთეზი

რადიო ასტრონომია მეცნიერების დარგია, რომელიც შეისწავლის ციური წყაროებიდან მომდინარე ბუნებრივ რადიო გამოსხივებას. რადიო ტალღები ელექტრომაგნიტური სპექტრის მარცხენა ბოლოში არიან. რადიო სიხშირეთა დიაპაზონი პირობითად განსაზღვრულია 20 KHz-სა და 600 GHz-ს შორის. შესაბამისად ტალღის სიგრძეთა დიაპაზონი დაახლ. 0.5 მმ-დან რამდენიმე კმ-მდე გრძელდება.



გრაფიკი 1. ელექტრომაგნიტური ტალღების დიაპაზონი გამოსახული ტალღის სიგრძეში.

ისტორია

რადიო ასტრონომიის ისტორია სავსეა დიდი აღმოჩენებით. პირველად, ეს იყო 1931 წლის არაპირდაპირი აღმოჩენა კარლ იანსკის მიერ მოპოვებულ მონაცემებში, სადაც ირმის ნახტომიდან სრულიად შემთხვევით მიღებული მომდინარე გამოსხივება აჭარბებდა მზის გამოსხივებას. გაზომილი გამოსხივების მიზეზი სინქროტრონული მექანიზმი იყო, რომელიც მხოლოდ 15 წლის შემდეგ აღმოაჩინეს (Rybicki And Lightmal Et Al, 1979). შემდეგმა დიდმა აღმოჩენამ 1940–იანებში აჩვენა, რომ აქტიური მზე არღვევდა

რადიოლოკატორის მიმღებების მუშაობას. რადიო ასტრონომიის სხვა უმნიშვნელოვანეს აღმოჩენებს მიეკუთვნება:

1. 1948 წელი – დისკრეტული კოსმიური რადიო წყაროები, პირველად, სუპერნოვას ნარჩენები და რადიო გალაქტიკები;
2. 1951 წელი - 21 სმ-იანი ატომური წყალბადის ხაზი;
3. 1963 წელი – კვაზი-ვარსკვლავისებრი ობიექტები ანუ "კვაზარები";
4. 1965 წელი – კოსმოსური მიკროტალღური ფონი;
5. 1968 წელი - ვარსკვლავთშორისეთის მოლეკულები და მათი კავშირი ვარსკვლავების წარმოქმნასთან;
6. 1968 წელი – პულსარები;
7. სუნიაევ-ზელდოვიჩის ეფექტი;
8. გრავიტაციული ლინზები;
9. მოლეკულები მაღალი წითელი წანაცვლების წყაროებში.

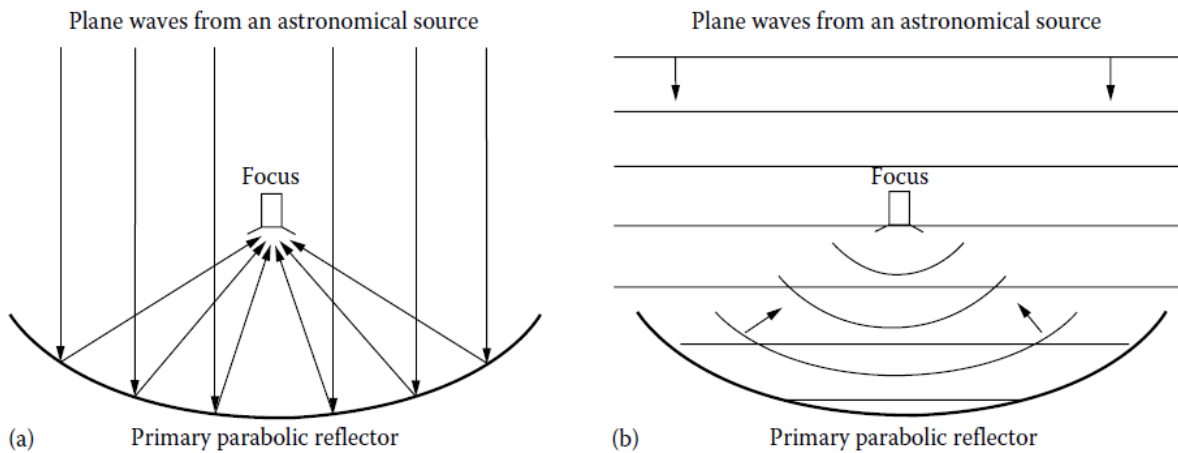
რადიო ტელესკოპების აგებულება და მუშაობა

რადიო ასტრონომია იყენებს დიდ რადიო ანტენებს, რომლებსაც რადიო ტელესკოპებს უწოდებენ. რადიო ტელესკოპის ნაწილი, რომელიც რადიო სიგნალებს იღებს ძირითადად ან ანტენაა, ან რეფლექტორი - ამ ორ ტერმინს ხშირად ანაცვლებენ ერთმანეთით. ამის და მიუხედავად, მათ შორის მაინც არის განსხვავებები - ანტენა არის მოწყობილობა, რომელიც აწყვილებს თავისუფალ სივრცეში მყოფ ელექტრომაგნიტურ ტალღებს შეზღუდულ ტალღებად გადაცემის ხაზში; ხოლო ამრეკლები, რომლებიც ძირითადად პარაბოლური ფორმისაა, კრებენ გამოსხივებას და ახდენენ მათ ფოკუსირებას. დიდი რადიო ტელესკოპების უმეტესობა იყენებს ამრეკლს, როგორც პირველად ელემენტს - თუმცა ანტენა მაინც საჭიროა. გრძელი ტალღის სიგრძის მქონე რადიო ტალღებისთვის ხშირად გამოიყენებენ დიპოლურ ანტენებს პირველად ელემენტად.

ინფრაწითელი და ულტრაიისფერი უბნების ტელესკოპების მსგავსად, რადიო ტელესკოპი იყენებს პარაბოლურ ამრეკლს, რომელსაც ხშირად თეფშად მოიხსენიებენ. პარაბოლური ფორმა იწვევს შესვლის სიბრტყის პერპენდიკულარული ყველა მიმავალი ტალღის ტელესკოპის ფოკუსში კონცენტრაციას. შორი ასტრონომიული წყაროებიდან მომავალი ელექტრომაგნიტური ტალღები საკმაოდ მიახლოებულია ბრტყელ ტალღებთან და ამიტომ აღწევენ ტელესკოპებს პარალელურად. არსებობს სინათლის ფოკუსის წერტილამდე მისვლის ორი გზა: სხივის სვლისა (ray tracing) და ტალღის ფრონტის სვლის (wave-front tracing) მეთოდები (იხ. გრაფიკი 2). სხივის სვლის მეთოდისას სინათლეს განიხილავენ, როგორც წრფეზე მოძრავ ტყვიებს - ამ მიდგომას ტრადიციულად კორპუსკულარული გამოსხივების მოდელს უწოდებენ. ალტერნატიულად, შესაძლებელია გავყვეთ ტალღის ფრონტს, რომელიც ტალღის გავრცელების მიმართულია, და, რომელშიც ელექტრომაგნიტურ ტალღას გააჩნიათ მუდმივი ფაზა. თუ ასტრონომიული წყაროს მიმართულება არ ემთხვევა რეფლექტორის ცენტრალურ ღერძს, ტალღები ფოკუსის წერტილის ახლოს მაინც შეიკრიბებიან. ანუ, პარაბოლურ ამრეკლს არა მარტო გააჩნია ერთი ფოკუსი, არამედ ფოკალური სიბრტყეც. ფოკალურ სიბრტყეშია მიმღების ანტენებიც, რომლებსაც გადაჰყავთ ელექტრომაგნიტური ტალღები თავისუფალი სივრციდან გადაცემის ხაზებში, რის შემდეგაც სიგნალი მიდის მიმღებთან.

მეორე გრაფიკზე გამოსახულ ტელესკოპებს პირველადი ფოკუსის ტელესკოპები ეწოდებათ, რადგან მიმღებები ანტენა განლაგებულია პირველადი რეფლექტორის ფოკუსში. ამ გრაფიკზე გამოსახულია ერთადერთი მიმღები; თუმცა, ხშირად გამოიყენება რამდენიმე მიმღები ანტენა ერთდროულად სხვადასხვა მხრიდან მომავალი ტალღების ერთჯერადად ჩასაჭერად. პირველადი ფოკუსის ტელესკოპები არახელსაყრელია, რადგან მიმღები ანტენა მოუქნელ მდგომარეობაშია - გაცილებით მაღლა, ვიდრე პირველადი

რეფლექტორი - შესაბამისად მასთან მიდგომა ძნელია. სწორედ ამის გამო, რადიო ტელესკოპების უმეტესობა კასეგრენისული დიზაინს იყენებს. კასეგრენისული ტიპის ტელესკოპში, მეორეული რეფლექტორი დაფიქსირებულია ფოკალური სიბრტყის პირისპირ ტალღების სხვა ფოკუსის წერტილში გადასამისამართებლად, რომელიც ხშირად თეფშის უკანაა (იხ. გრაფიკი 3). ასეთ შემთხვევაში, თეფშს გააჩნია ხვრელი ცენტრში სინათლის სხივის გასასვლელად. დიდი რადიო ტელესკოპების უმეტესობა სწორედ კასეგრენისული ტიპისაა. ისინი პირველად პარაბოლურ და მეორეულ ჰიპერბოლურ ამრეკლებს იყენებენ.



(a) Primary parabolic reflector

(b) Primary parabolic reflector

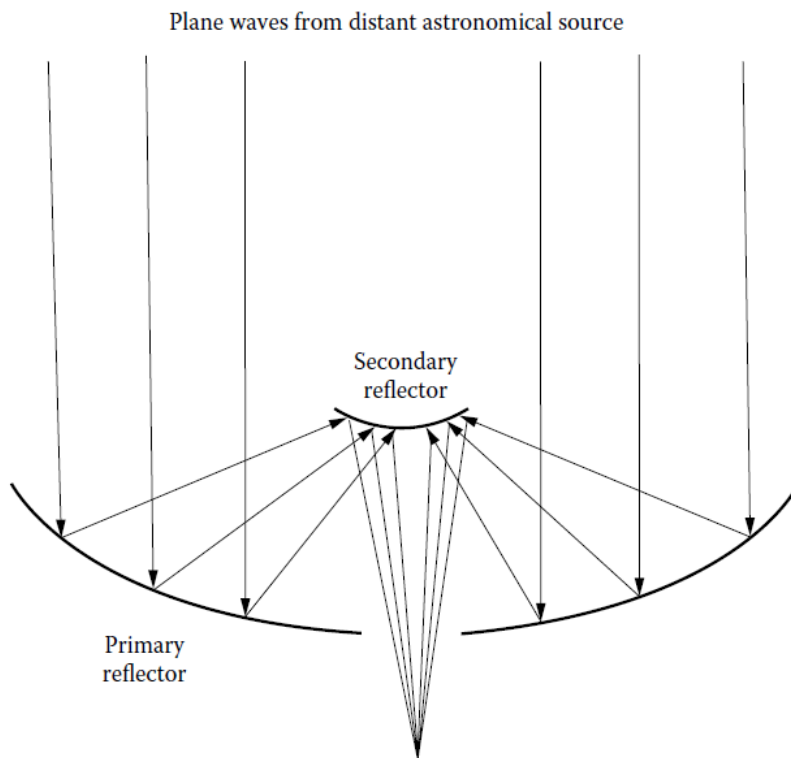
გრაფიკი 2. თეფშიდან არეკვლისას სინათლის ფოკუსში მიღების ორი განსხვავებული სურათი. მარცხენა სურათზე (a) გამოსახულია ბრტყელი ტალღების ფოკუსში მიღება შორს მყოფი ასტრონომიული წყაროდან, ხოლო მარჯვენა სურათზე (b) წარმოდგენილია ტალღის ფრონტის გამოსახულება, რომელიც აჩვენებს, თუ როგორ გარდაქმნის თეფში შორი ასტრონომიული წყაროდან მომავალ ბრტყელ ტალღებს სფერულ ტალღებად მათ ერთ წერტილში გასაერთიანებლად.

პირველად ამრეკლს გააჩნია ორი მნიშვნელოვანი ფუნქცია. პირველ რიგში, ის აგროვებს შორი ასტრონომიული წყაროს გამოსხივებას და ახდენს მის დაფოკუსებას. შეგროვებული გამოსხივების რაოდენობა დამოკიდებულია ტელესკოპის ეფექტურ ფართობზე, რომელიც პირველადი რეფლექტორის ფიზიკურ ფართობთან ახლო კავშირშია. გამოსხივებიდან მიღებული სიმძლავრე P მოიცემა შემდეგი ფორმულით:

$$P = S_v A_{\text{eff}} \Delta v$$

, სადაც S_v ნაკადის სიმკვრივეა, A_{eff} ტელესკოპის ეფექტური ფართობი და Δv სიხშირეთა დიაპაზონი. სიხშირის დიაპაზონი განისაზღვრება მიმღებით. რაც უფრო დიდია რეფლექტორის ფართობი, მით უფრო მეტი სიმძლავრის მიღება შესაძლებელია ასტრონომიული წყაროდან, რაც შესაძლებელს ხდის უფრო სუსტი წყაროების დაფიქსირებას.

პირველადი რეფლექტორი მეორე ძირითადი ფუნქციაა მიმართულების განსაზღვრა, რომელიც წარმოადგენს ტელესკოპის თვისებას გაარჩიოს სხვადასხვა ობიექტებისგან მომდინარე გამოსხივება ცაზე სხვადასხვა კუთხური პოზიციის საფუძველზე. ტელესკოპის მიმართულების განსაზღვრის თვისება, მეტწილად, დამოკიდებულია პირველადი რეფლექტორის დიამეტრზე და დამოკიდებულია დიფრაქციის პრინციპებზე. დიფრაქცია, ფაქტობრივად, ამცირებს ყველა ტელესკოპის მიმართულების განსაზღვრის ფუნქციას. ამ თვისებას ხშირად ტელესკოპის სხივის ყალიბსაც (beam pattern) უწოდებენ.



გრაფიკი 3. კასეგრანული ტიპის რადიო ტელესკოპის ოპტიკური განთავსება.



სურათი 1. პირველადი ფოკუსის რადიო ტელესკოპის მაგალითი; ფედერაციის კოლეჯის ჰეისტაკის მცირე 2-მეტრიანი რადიო ტელესკოპი მასაჩუსეტსის შტატში.



სურათი 2. კლასიკური კასეგრენისეული რადიო ტელესკოპი. ეროვნული რადიო ასტრონომიული ობსერვატორიის 20-მეტრიანი რადიო ტელესკოპი, რომელიც მდებარეობს გრინ ბანკში, დასავლეთ ვირჯინიის შტატში.

რადიო ინტერფერომეტრია და აპერტურული სინთეზი

ტელესკოპები ცალკე, ან ჯგუფურად იხმარება რადიო ინტერფერომეტრიის გამოყენებით. რადიო ინტერფერომეტრიას საფუძველი ჩაეყარა 1946 წელს მარტინ რაილისა და მისი ჯგუფის მიერ. ინტერფერომეტრი წარმოადგენს პარაბოლური ტელესკოპების, ერთგანზომილებიანი ანტენების ან თანამიმართული ორგანზომილებიანი დიპოლების კომბინაციას. მისი ფუნქციონირება ემყარება ე.წ. აპერტურული სინთეზის ტექნიკას.

ერთ თეფშიან რადიო ტელესკოპს გააჩნია მეტად შეზღუდული კუთხური გარჩევადობა. აღსანიშნავია, რომ ეფელსბერგის 100-მეტრიანი ტელესკოპის კუთხური გარჩევადობა შედარებადია ადამიანის თვალისა, ანუ უარესია, ვიდრე მცირე ოპტიკური ტელესკოპი. კერძოდ, თვალის გარჩევადობაა დაახლოებით 1 მინუტი, რაც შედარებადია ეფელსბერგის კუთხური გარჩევადობისა 6 სმ ტალღის სიგრძეზე.

მინუტის რიგის გარჩევადობა კი ნამდვილად არასაკმარისია ასტროფიზიკური ობიექტების უდიდესი ნაწილის (მაგ. შორეული გალაქტიკების, კვაზარების და ა.შ.) დეტალური სტრუქტურების გასარჩევად. ისინი კი უჩვენებენ ცალკეულ სტრუქტურებს სეკუნდებისა და მილისეკუნდების რიგის მასშტაბებში.

ცხადია, რაც უფრო დიდი დიამეტრის ტელესკოპს ავაგებთ, მით უკეთესი იქნება მისი კუთხური გარჩევადობა, მაგრამ 100 მეტრზე გაცილებით დიდი ტელესკოპის აგება არაპრაქტიკულია როგორც ფინანსური, ასევე მისი მართვის თვალსაზრისით.

მაგრამ სიტუაცია რადიკალურად იცვლება, თუ ავიღებთ რადიო ტელესკოპთა ერთობლიობას (მასივს). მათი მეშვეობით ხორციელდება რადიო ინტერფერომეტრია და მაშინ კუთხური გარჩევადობა ხდება:

$$\theta \sim \frac{\lambda}{B}$$



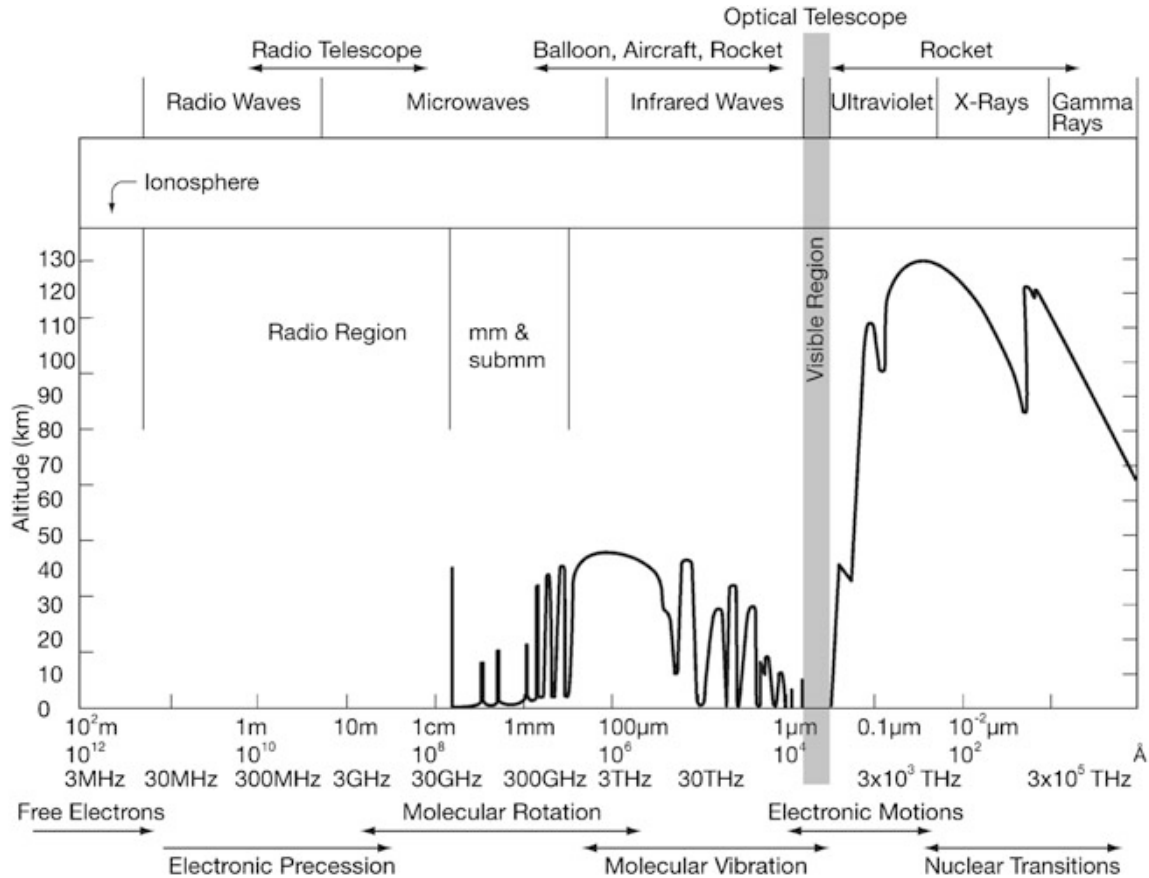
სურათი 3. ამერიკის შეერთებული შტატებში ეროვნულმა სამეცნიერო ფონდმა დააფინანსა VLBA (Very Long Baseline Array) პროექტის რადიო ტელესკოპები, რომელსაც ათი 25-მეტრიანი ანტენა აღმართული აქვს რიგში ჰავაიდან ვირჯინიის კუნძულებამდე.

, სადაც B წარმოადგენს მანძილს მასივის ყველაზე შორეულ ობიექტებს შორის, რომელსაც ბაზის სიგრძესაც უწოდებენ. ეს გვაძლევს სეკუნდების, ქვესეკუნდებისა და მილისეკუნდების გარჩევადობასაც კი.

ინტერფერომეტრი წარმოადგენს პარაბოლური ტელესკოპების, ერთგანზომილებიანი ანტენების ან თანამიმართული ორგანზომილებიანი დიპოლების კომბინაციას. მისი ფუნქციონირება ემყარება ე.წ. აპერტურული სინთეზის ტექნიკას.

რადიო ფანჯარა

დედამიწის ზედაპირიდან ატმოსფერო გამჭვირვალეა რადიო ტალღებისთვის, რადგან ატმოსფეროს შემადგენელი ნივთიერებები არ შთანთქავენ გამოსხივებას შესამჩნევი ოდენობით. ამ რადიო ფანჯარას არ გააჩნია მკვეთრად გამოხატული საზღვრები და მისი ქვედა ზღვარია $\nu \approx 10 \text{ MHz}$ ($\lambda \approx 30 \text{ მ}$), ხოლო ზედა ზღვარი - $\nu \approx 1.5 \text{ THz}$ ($\lambda \approx 0.2 \text{ მმ}$). რადიო ფანჯარა დამოკიდებულია სიმაღლეზე, გეოგრაფიულ ადგილმდებარეობასა და დროზე.



გრაფიკი 4. ელექტრომაგნიტური ტალღების სხვადასხვა დიაპაზონისთვის დედამიწის ატმოსფეროში შეღწევადობა. დიაგრამის ვერტიკალური ღერძი აჩვენებს იმ სიმაღლეს, როცა გამოსხივება მცირდება ორჯერ.

მაღალ-ენერგიულ სიხშირეებზე მკვეთრი წყვეტის არსებობის მიზეზად დასახელებულია რეზონანსული შთანთქმა, რომელიც გამოწვეულია წყლის ორთქლისა (შთანთქმის ხაზები 22.2 GHz-თან ე.ი $\lambda \approx 1.3 \text{ სმ}$) და ჟანგბადისგან (შთანთქმის ხაზები 60 GHz-თან ე.ი $\lambda \approx 5 \text{ მმ}$). 0.2 მმ-ზე მოკლე ტალღის სიგრძეებზე კი დაკვირვებები უნდა ჩატარდეს ატმოსფეროს მაღალი ფენებიდან ან თანამგზავრული აპარატურის მეშვეობით.

დღესდღეობით, არსებობს დიდი ინტერესი, გაიზარდოს მაღალი სიხშირეების ზღვარი, რადგან გამოსხივების წყაროებიდან ამ სიხშირეებისთვის უფრო ინტენსიური სპექტრული ხაზები ფიქსირდება. ატმოსფეროში არსებული წყლის ორთქლისა და ჟანგბადის გათვალისწინებით, მცირე თუ შეიძლება გაკეთდეს დედამიწის ზედაპირიდან. მილიმეტრზე მცირე ტალღის სიგრძეთა დაკვირვებისას, ხშირად გამოიყენება ჰერშელის კოსმოსური ობსერვატორია ან სტრატოსფერული ობსერვატორია "სოფია" (Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy).

დაბალ სიხშირეებზე, დედამიწის ატმოსფერო გაუმჭვირვალეა იონოსფეროში არსებული თავისუფალი ელექტრონების გამო. ატმოსფეროში გავლა შეუძლებელია ისეთი ელექტრომაგნიტური ტალღებისთვის, რომელთა სიხშირე მცირეა პლაზმის სიხშირის ν_p . ეს სიხშირე მოიცემა შემდეგი ტოლობით:

$$\frac{\nu_p}{\text{KHz}} = 8,97 \sqrt{\frac{N_e}{\text{სმ}^{-3}}}$$

აქ N_e ელექტრონის სიმკვრივეა პლაზმაში გამოსახული სმ^{-3} ერთეულებში და ν_p მოცემულია KHz-ებში. ამიტომ, დაბალ სიხშირიანი ზღვარი იქნება 4.5 MHz-თან ახლოს ღამით, როცა იონოსფეროს მაქსიმალური სიმკვრივეა $N_e \approx 2.5 \cdot 10^5 \text{ სმ}^{-3}$, დღისით კი - 11 MHz, როცა $N_e \approx 1.5 \cdot 10^6 \text{ სმ}^{-3}$. თუმცა, ელექტრონების სიმკვრივე დამოკიდებულია მზის აქტივობაზე და დაბალი სიხშირის ზღვარი ცვალებადია „კოსმოსურ ამინდთან“ ერთად.

300 MHz-ზე ნაკლები სიხშირეებისთვის დამატებით ჩნდება რადიო სიხშირის შეფერხება (RFI – Radio Frequency Interference). RFI ნებისმიერი რადიო სიგნალია, ბუნებრივი თუ ხელოვნური, რომელიც ხელს უშლის სასურველ გამოსავლენ რადიო ტალღებს. ასეთი შეფერხება ასევე ხდება მაღალ სიხშირეებზეც. შემაფერხებელი რადიო ტალღების წყაროებია: მობილური ტელეფონები, GPS, Wi-Fi სიგნალი (0.8 – 2.5 GHz), სარადარო სისტემები, ტელეფონები (4 – 8 GHz), გეოსტაციონალური სატელიტები (11-15 GHz).

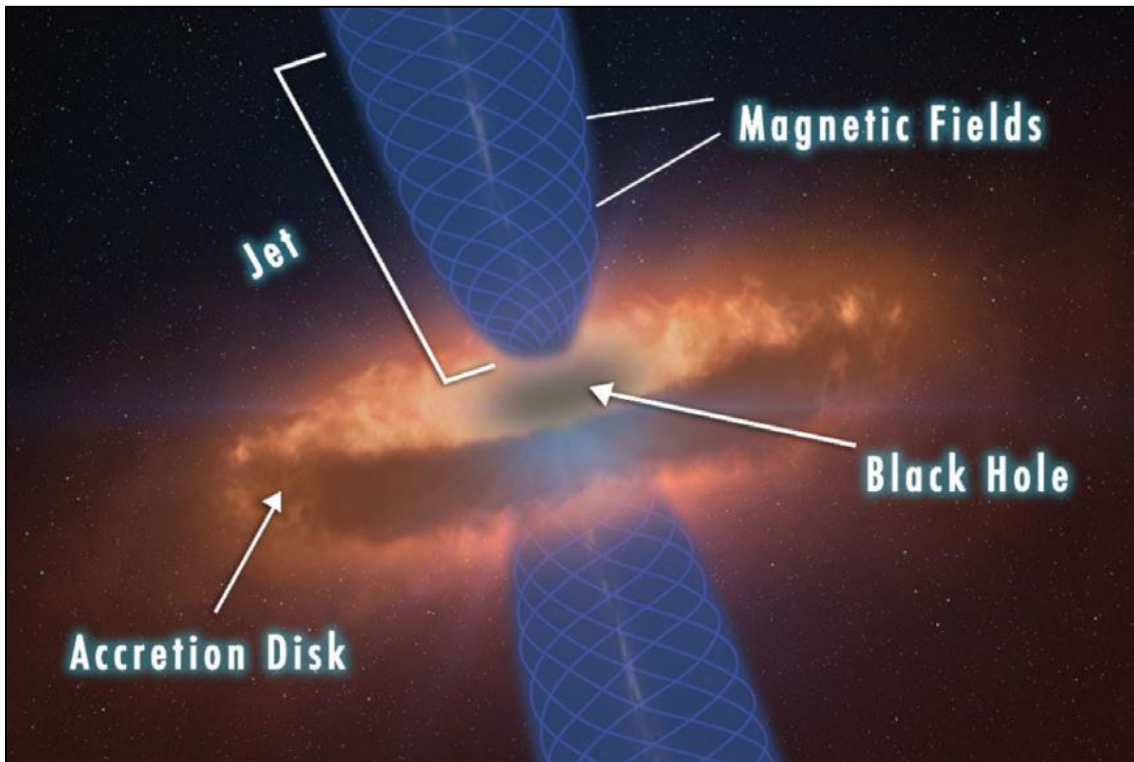
სიტუაცია უარესდება უფრო დაბალი სიხშირეებისთვის. საზოგადოდ, რაც უფრო დაბალია ჩვენი დაკვირვებების სასურველი სიხშირე, უფრო უწესრიგოა რადიო გარემო. იმის და მიუხედავად, რომ შეფერხების ნაწილი ბუნებრივი წყაროებიდან მომდინარეობს (მაგ. ელექტრული შტორმი ე.ი ელვა), მისი უმეტესობა ხელოვნურია.

ობიექტის მიმოხილვა

ნორმალურ გალაქტიკათა სპექტრის ხილულ და ახლო ინფრაწითელ უბანში სჭარბობს ვარსკვლავთა გამოსხივება, ასევე გვაქვს გაზისა და მტვრის მცირე ნაწილიც. ასეთ გალაქტიკათა სპექტრი შესაძლებელია საკმაოდ კარგი მიახლოებით აღიწეროს, როგორც ვარსკვლავთა სპექტრების სუპერპოზიცია. მათი სპექტრი ძირითადად შემოსაზღვრულია $\sim 4000 \text{ \AA}$ -დან $\sim 20000 \text{ \AA}$ -მდე ინტერვალში.

თუ გალაქტიკაში აქტიურად მიმდინარეობს ვარსკვლავთა წარმოშობის პროცესი, მაშინ შესაბამისი გამოსხივება თავს ძირითადად მოიყრის სპექტრის მოკლე ტალღოვან ნაწილში, ხოლო ამ პროცესებით გაცხელებული მტვერი კი ინტენსიურად გამოასხივებს სპექტრის გრძელ ტალღოვან ბოლოში. თუმცა, აღმოჩენილია ისეთი გალაქტიკებიც, რომელთაც გააჩნიათ ენერჯის გაცილებით განვრცობილი განაწილება, რაც გალაქტიკათა აქტიური გულების არსებობაზე მეტყველებს.

გალაქტიკათა აქტიური გულები წარმოადგენენ მეტად საინტერესო, "საიდუმლოებებით მოცულ" კოსმოსურ ობიექტებს, რომელთა მაღალენერგიული (რენტგენული, გამა) გამოსხივების უმეტესი ნაწილი წარმოიშობა ცენტრალურ კომპაქტურ არეში, რომლის ზომა მხოლოდ მზის სისტემის რიგისაა.



სურათი 4. გალაქტიკის აქტიური გულის ზოგადი სტრუქტურა.

ცნება „გალაქტიკათა აქტიური გულების“ ქვეშ თავმოყრილია გარეგალაქტიკურ ობიექტთა ვრცელი დიაპაზონი, რომელთაც გამორჩეული თვისებები ახასიათებთ. მკვლევარები გამოყოფენ გალაქტიკათა აქტიური გულების ოთხ ძირითად კლასს:

1. კვაზარები;
2. სეიფერტის გალაქტიკები;
3. რადიო გალაქტიკები;
4. ბლაზარები.

ბლაზარები წარმოადგენენ ელიფსურ გალაქტიკათა აქტიურ გულებს, რომლებიც გამოირჩევიან შემდეგი თვისებებით:

1. მათ სპექტრებში არ დაიკვირვება ხაზები ან ისინი მეტისმეტად სუსტებია.
2. ბლაზარები წარმოადგენენ მძლავრ კომპაქტურ რადიო წყაროებს.
3. ოპტიკური და რადიო გამოსხივების მაღალი და ცვალებადი პოლარიზაცია.
4. გამოსხივების ძლიერი ცვალებადობა სპექტრის ყველა უბანში.
5. არასითბური წარმოშობის მძლავრი რენტგენული და γ -გამოსხივება, რომელიც გავრცობილი არის სიხშირეთა მე-18-მე-19 რიგზე და უჩვენებს ორ „კუზის მაგვარ“ კომპონენტს.
6. რადიო ინტერფერომეტრული დაკვირვებების შედეგად ზოგჯერ დაიკვირვება ცენტრალური წყაროდან მასების გამოტყორცნა სუპერლუმინალური ($V > C$) სიჩქარით (რელატივისტური ეფექტი როდესაც ადგილი აქვს მასის მოძრაობას მხედველობის სხივის მიმართ მცირე კუთხით).

გალაქტიკათა აქტიური გულების უნიფიცირებული მოდელის მიხედვით, ბლაზარებიდან მომდინარე უპირატესი არასითბური გამოსხივების მიზეზი დამკვირვებლის მიმართ ორიენტირებული რელატივისტური ჯეტებია. დაბალ-ენერგიული არასითბური გამოსხივება რადიო უბნიდან რენტგენულ სიხშირეებამდე სინქროტრონული რადიაციითაა გამოწვეული, ხოლო მაღალ-ენერგიული გამოსხივებები, ძირითადად γ -გამოსხივება, ნავარაუდებია წარმოქმნილიყო შებრუნებული კომპტონის ეფექტით. ბლაზარები შედგებიან ორი ქვეკლასისგან:

1. ლაცერტიდები - მათი სახელწოდება წარმოდგება მათი ისტორიულად პირველი წარმომადგენელის BL Lacertae-სგან, რომელიც 1929 წელს აღმოაჩინეს, თუმცა მისი გარეგალაქტიკური ბუნება მხოლოდ 1974 წელს იქნა დადგენილი. ამის შემდეგ აღმოჩენილი იქნა ანალოგიური ბუნების ასეული სხვა ობიექტი.
2. ე.წ. ბრტყელსპექტრიანი რადიო კვაზარები (მათ ზოგჯერ ოპტიკურად ძლიერ ცვალებად კვაზარებად ან ძლიერად პოლარიზებულ კვაზარებადაც მოიხსენიებენ).

ლაცერტიდთა კლასი წარმოადგენს სამყაროს ერთ-ერთ ყველაზე ექსტრემალურ "ადგილებს". კერძოდ, მათგან ფიქსირდება მასების გამოდინება C-ზე (სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში) მაღალი სიჩქარით (ე.წ. სუპერლუმინალური მოძრაობა; Jorstad Et Al. 2005). ფარდობითობის თეორიის თანახმად, შეუძლებელია C-მდე მიაღწიოს ნაწილაკის სიჩქარემ, თუ მისი უძრაობის მასა ნულისაგან განსხვავებულია. მართალია, მოგვიანებით მკვლევარებმა უჩვენეს, რომ ეს არის რელატივისტური ეფექტი, როდესაც მატერია მოძრაობს დაახლოებით ჩვენი მხედველობის სხივის (წრფე, რომელიც გადის დამკვირვებელსა და კონკრეტულ დასაკვირვებელ კოსმოსურ ობიექტზე) გასწვრივ ძალიან მაღალი, თუმცა სინათლეზე ნაკლები სიჩქარით, მაგრამ ნივთიერებისათვის ასეთი სიჩქარის მინიჭებას სჭირდება კოლოსალური სიმძლავრის ფიზიკური მექანიზმი. ამ უკანასკნელის შესახებ კი ამჟამადაც კი დამაბული დისკუსია მიმდინარეობს მკვლევარებს შორის.

დღეისათვის ყველაზე ფართოდ მიღებული ჰიპოთეზის თანახმად, ყოველი ლაცერტიდის ცენტრში იმყოფება ზემასიური შავი ხვრელი, რომლის მასა ასეულობით მილიონობით და მილიარდობით დიდია მზის მასასთან შედარებით (Falomo Et Al. 2014). თავისი უმძლავრესი გრავიტაციის წყალობით, შავი ხვრელი თავისკენ "ითრევს" მიმდებარე გალაქტიკურ მასებს (ვარსკვლავები და მათ შორის მდებარე გაზოვან-მტვრიანი მასა). ეს უკანასკნელი შავი ხვრელისაკენ მოძრაობს სპირალისებრ ორბიტაზე და ხვრელის გარშემო შედეგად წარმოიშობა ქარბორბალისებრი სტრუქტურა, რომელსაც აკრეციული დისკი ეწოდება და შთაინთქმება ხვრელის მიერ. თუმცა, როდესაც შავი ხვრელი ბრუნავს საკუთარი ღერძის გარშემო და დამაგნიტებულია, მაშინ იგი ვეღარ ახერხებს აკრეცირებული მასის მთლიანად შთანთქმას და გარშემო წარმოიქმნება ელიფსური ფორმის მქონე არე ("ერგოსფერო"), სადაც მიტაცებული მატერიის შემადგენელი

ნაწილაკების ნაწილს შეუძლია შეიძინოს კოლოსალური ენერგია შავი ხვრელის მასის ხარჯზე და გამოიტყორცნება გარეთ ხვრელის მაგნიტური პოლუსების გასწვრივ ულტრა-რელატივისტური სიჩქარით ("ბლენფორდ-ზნაიევის მექანიზმი"). გამოტყორცნილ ნაწილაკთა ერთობლიობა ქმნის ე.წ. ჯეტებს, რომლებიც გამოვლენილი იქნენ სპექტრის სხვადასხვა უბანში (რადიო, ხილული, რენტგენული, გამა) ჩატარებული დაკვირვებების შედეგად.

ლაცერტიდების ერთ-ერთი ჯეტი დაახლოებით მიმართული უნდა იყოს დამკვირვებლისაკენ, რის გამოც ხდება აქტიური გულის სხვა კომპონენტების სითბური გამოსხივების "დაჩრდილვა" ჯეტის მძლავრი არასითბური გამოსხივების მიერ, რომელსაც არ გააჩნია სპექტრული ხაზები (Falomo Et Al, 2014). შედეგად, ლაცერტიდების მრავალსიხშირულ გამოსხივებაში ვერ ხერხდება სპექტრული ხაზების გამოვლენა.

ლაცერტიდები ასევე შეიძლება დავყოთ ორ კატეგორიად. მაღალ-ენერგიული ლაცერტიდები (HBL) არიან ისინი, რომლებიც გამოასხივებენ სინქროტრონულ რადიაციას მაღალ სიხშირეებზე, ულტრაიისფერიდან რენტგენულ უბანში, ხოლო დაბალ-ენერგიული ლაცერტიდები (LBL) თავიანთ სინქროტრონულ რადიაციას გამოასხივებენ დაბალ სიხშირეებზე, ოპტიკურიდან ახლო ინფრაწითელ უბანში. თუმცა, დაიკვირვება რამდენიმე წყარო, რომელთა ქცევა HBL და LBL ლაცერტიდების კლასების შუალედურია, რომელთაც საშუალო-ენერგიულ ლაცერტიდებს (IBL) უწოდებენ.

OJ 287 წარმოადგენს ტიპიურ დაბალ-ენერგიულ ლაცერტიდს. ის ერთ-ერთი საუკეთესოდ შესწავლილ ლაცერტიდია, რომელზეც დაკვირვებები მე-19 საუკუნის მეორე ნახევრიდან წარმოებს.

ობიექტის სხვა სახელწოდებები (სხვადასხვა კატალოგის მიხედვით):

QSO J0854+2006	INTREF 371	Pscz Q08519+2017	2XMM J085448.8+200630
B2 0852+20	IRAS F08519+2017	QSO B0851+2017	[BDW2002] Q0b51+2017
BWE 0851+2017	IRAS 08519+2017	QSO B0851+202	[CAB95] IRAS F08519+2017
Cgrabs J0854+2006	JVAS J0854+2006	RGB J0854+201	[DGT2001] B0851+202
CI* NGC 2632 KP 114757	JVAS B0851+202	RGB J0854.8+2006	[GGR94] 0851+202
CLASS J085448.8740+200630.638	1Jy 0851+202	RORF 0851+202	[GW2008]Config 35
2E 2076	1Jy 0851+20	RX J085451+20068	[HB93] 0851+202
2E 0851.9+2018	LINEAR 5270824	RX J0854.8+2006	[IN88] 0851+202
3EG J0853+1941	MASIV J0854+2006	1RXS J085451.5+200646	[MGL2009] BZB J0854+2006
EGR J0853+2015	2MASS J08544888+2006306	S3 0851+20	[MGL2015] 5BZB J0854+2006
EPIC 211991001	2MASX J08544889+2006307	SDSS J085448.87+200630.7	[P82] 0851+202
1ES 0851+20.3	MITG J0854+2006	SDSS J085448.87+200630.6	[VV2000b] J085448.8+200630
OFGL J0855.4+2009	MITG J085448+2006	TXS 0851+202	[VV2003b] J085448.8+200630
1FGL J0854.8+2006	NEWPS5 J0854+2006	UT 0851+203	[VV2006b] J085448.8+200630

2FGL J0854.8+2005	NRAO 0852+20	VLSS J0854.8+2006	[VV2010b] J085448.8+200630
3FGL J0854.8+2006	NRAO 0851+20	VRO 20.08.01	[VV98b] J085448.8+200630
1FHL J0854.8+2004	NVSS J085448+200630	VSOP J0854+2006	[WCO2009] J085458+200606
3FHL J0854.8+2006	OHIO J 287	WB 0851+2017	[ZEH2003] RX J0854.8+2006 1
FIRST J085448.8+200630	PG 0851+202	WISE J085448.87+200630.7	AAVSO 0849+20
GB6 J0854+2006	PG 0851+203	WISE J085448.87+200630.6	Gaia DR1 660820610145858048
GB6 B0851+2018	PKS J0854+2006	WMAP 115	Gaia DR2 660820614442429056
87GB 085157.5+201747	PKS 0851+202	WMAP J0854+2005	
ICRF J085448.8+200630	PKS 0851+203	WMAP J0854+2006	
IERS B0851+202	PLCKERC -857 G206.80+35.82	WMAP J0855+2007	

ლიტერატურის მიმოხილვა

მართალია, OJ 287 დაკვირვებები წარმოებდა 1890 წლიდან შემთხვევითი სახით, მისი ოპტიკური იდენტიფიკაცია მხოლოდ მოხდა 1967 წელს (Dickel Et Al, 1967).

სიკაშკაშის მრუდი აჩვენებს ძალიან აქტიურ ობიექტს, რომელიც ავლენს დიდ კვაზი-პერიოდული ოპტიკურ ანთებას 12-წლიანი პერიოდით, ორი „კუზისებრი“ პიკით ყოველ ინტერვალში (Sillanpää Et Al, 1988a; Lehto & Valtonen Et Al, 1996). ამ პერიოდების სინათლის მრუდი ახსნილია შემდეგი მოდელებით: პირველ მოდელში უფრო მცირე შავი ხვრელი „ხვრეტს“ დიდი შავი ხვრელის აკრეციულ დისკს, რომელიც იწვევს ორჯერ ანთებას ყოველ პერიოდში (Lehto & Valtonen Et Al, 1996). მეორე შემოთავაზებული მოდელია აკრეციის ინტენსივობის ცვლილებები დისკში (Sillanpää Et Al, 1988a), ან ორმაგ შავ ხვრელთა სისტემაში ჯეტების მერყეობის ცვლილება (Katz Et Al, 1997). თუმცა, იყო შემოთავაზებული სხვა მოდელებიც, როგორცაა აკრეციული დისკის (Igumenshchev & Abramowicz Et Al, 1999) ან ერთი შავი ხვრელის ჯეტის მერყეობა (Hughes Et Al, 1998).

OJ 94-ის საერთაშორისო კამპანიამ დაადასტურა OJ 287-ის 12-წლიანი პერიოდი (Sillanpää Et Al, 1996a,b). 1993 წელს ასევე შემუშავდა ინტენსიური ოპტიკური, ინფრაწითელი და რადიო მონიტორინგის მონაცემები მიღებული 1993-დან 1998 წლებამდე (Pursimo Et Al, 2000). ამ შედეგებმა აჩვენა, რომ ოპტიკური და ინფრაწითელი ნაკადები მუდმივად ცვალებადია, ისეთი დროის ფარგლებით, როგორცაა ათობით წუთებიდან წლებამდე.

2005 წლის და 2007 წლის დაკვირვებული ანთებები წარმოდგენილ იქნა ორმაგი შავი ხვრელის მოდელით (Valtonen Et Al, 2008a, 2008b; Lehto & Valtonen Et Al, 1996; Sundelius Et Al, 1996, 1997; Valtonen Et Al, 2007). ოპტიკური სპექტრული ინდექსის გრძელვადიანი ცვალებადობის აღწერა დროის ფუნქციად მოახერხა ძენგმა (Zheng Et Al, 2008), არსებული U, B, V, R და I დიაპაზონის მონაცემების მიხედვით. სხვა კვლევამ წარმოადგინა OJ 287-ის ოპტიკური ფოტომეტრიის შედეგი 2002-დან 2007 წლებამდე (Fan Et Al, 2009). ხოლო, 2009 წელს გამოქვეყნებულმა კვლევამ მოახდინა OJ 287-ის 2005-2008 წლებში ანთებების ანალიზი, აკრეციულ ნაკადებში მიქცევ-მოქცევით გამოწვეული ცვლილებების მიერ ჯეტებისგან გამომავალი ცვალებადი გამოსხივების ეფექტის გათვალისწინებით (Valtonen Et Al, 2009).

ერთ-ერთმა კვლევამ, ჩატარებული 2010 წელს, გამოავლინა ხუთი მანამდე უცნობი ვიწრო ემისიური ხაზები შვიდი ეპოქიდან ერთ-ერთში და ფართო H α მახასიათებელი ორი ეპოქის განმავლობაში 2005-დან 2008 წლებამდე (Nilsson Et Al, 2010). 2005-2009 წლის მონაცემების მიხედვით, მონტე-კარლოს სიმულაციებზე დაყრდნობით შეიქმნა ფიზიკური მოდელი, რომელმაც ახსნა OJ 287-ის პოლარიზაციის ვარიაცია და მისი ფერი ოპტიკურ უბანში (Blinov Et Al, 2011).

2011 წლის კვლევისას OJ 287-ის ფერის ქცევას ოპტიკური ანთებისას დაკვირვებებმა დაამტკიცა, რომ ლაცერტიდმა განიცადა ორმაგი პიკის მქონე აფეთქება 1996 წლის შემდეგ 12 წელიწადში, რომელიც დამატებით მტკიცებულებას იძლევა ბინარული შავი ხვრელის არსებობისთვის ობიექტში (Dai Et Al, 2011). 2013 წელს შედარებული იქნა სამი წინამორბედი ანთების დაკვირვება თეორიულ პროგნოზთან. აღმოჩნდა, რომ ანთებები ემთხვევა მცირე შავი ხვრელის დაშვებას პირველადი შავი ხვრელის აკრეციის დისკთან (Pihajoki Et Al, 2013).

ასევე გამოვლინდა, რომ ჯეტების სტრუქტურა დაკვირვების მცირე და ცვალებადი კუთხის ბრალია. კუთხის ცვალებადობა შეესაბამება ორმაგ მოძრაობას ორბიტაზე. სამეცნიერო ჯგუფის მიერ შემუშავებულმა მოდელებმა ახსნა გრძელვადიანი ოპტიკური სიკაშკაშის ცვალებადობები, როგორც დოპლერის ბიმინგის ცვალებადობა ცენტრთან ახლოს მყოფ კომპონენტში. (Valtonen Et Al, 2013)

2016 წლის ერთ-ერთმა კვლევამ გამოავლინა შესაძლო კვაზი-პერიოდული სიგნალების არსებობა ~400 და ~800 დღეების პერიოდით. შეთავაზებული ახსნებიდან ყველაზე უპირატესია ძლიერად დამაგნიტებული აკრეციული დისკების მიერ ჯეტების წარმოების ეფექტურობის მოდულაცია (Bhatta Et Al, 2016). 11-წლიანი ზედამხედველობის შედეგად მიღებულმა შედეგებმა აჩვენა ცვალებადობა ნაკადებსა და ოპტიკურიდან რენტგენულ რეჟიმში გადასვლისას სპექტრულ ინდექსში. ასევე, 2015 წლის დასაწყისში მკვლევარები პირველად დააკვირდნენ ჰორიზონტალურ რენტგენულ სპექტრს (Siejkowski Et Al, 2017). ამავე წლის დეკემბერში კი მოხდა ძლიერი ოპტიკური ანთება, რომელიც ნავარაუდები იყო OJ 287-ის ორმაგი შავი ხვრელების მოდელის თანახმად. ასეთივე, მეორე, შედარებით ძლიერი ანთება გამოვლინდა 2016 წლის მარტშიც. დამატებით, მკვლევრებმა გამოიძიეს სიკაშკაშისა და ფერის ცვლილებები სხვადასხვა სიხშირისა და დროის დიაპაზონში (Gupta Et Al, 2017).

2016 წლის დასაწყისში დაკვირვებებმა აჩვენა 300 MHz-იან და V დიაპაზონებს შორის განსხვავებული სიკაშკაშის მრუდები (Rakshit Et Al, 2017). ძლიერი γ -გამოსხივების ანთებები 2008 – 2014 წლებში ნავარაუდებია წარმოშობილი იყოს ან ცენტრალურ რეგიონში, ან ქვედა ნაკადის მდგრად კვეთში, ან ორივეში (Hodgson Et Al, 2017). 2016 წლის ოქტომბრიდან 2017 წლის აპრილამდე ჩატარებული დაკვირვებების შედეგად მიღებულმა სპექტრულმა ანალიზმა აჩვენა, რომ წყარო რენტგენულ უბანში ყოველ კვირა აქტიური რჩებოდა. წყარომ აჩვენა 4.6 – 6.5-ჯერ ძლიერი ანთება ოპტიკურ-ულტრაიისფერ ენერგიულ დიაპაზონში, რომელმაც აჩვენა რენტგენულ გამოსხივებასთან დადებით კორელაცია (Kapanadze Et Al, 2018).

OJ 287 წარმოადგენს გალაქტიკათა აქტიური გულებიდან საუკეთესო კანდიდატს, რომლის ცენტრში ორი ახლოს მყოფი ზემასიური შავი ხვრელია. 1995 წლის აპრილში დაწყებული 18-წლიანი 120 VLBA მიღებული დაკვირვების შედეგად (15 GHz-ზე) აღმოჩნდა, რომ რადიო ჯეტის ბრუნვის ღერძის ორიენტაცია იცვლება დაახლოებით ყოველ 22 წელიწადში. კვლევამ დაადასტურა, რომ ოპტიკური გამოსხივება არის სინქროტრონული და კავშირშია ჯეტის რადიაციასთან (Britzen Et Al, 2018).

მისი წრფივი პოლარიზაციის ანალიზის შედეგად 43 GHz-სა და ოპტიკურ დიაპაზონში დადგინდა, რომ საკმარისად მაღალი ენერგიების მქონე ელექტრონებს, რომლებსაც შეუძლიათ ოპტიკური სინქროტრონული და კომპტონის უკუ-ეფექტის გზით γ -რადიაციის გამოსხივება, აჩქარებულნი არიან როგორც ცენტრში, ასევე ცენტრისგან მოშორებულ დინებებში (≥ 10 პს); (Sasada Et Al, 2018). 2016 - 2017 წლების ოპტიკური ცვალებადობის საფუძველზე მოხდა პოლარიზაციის ხარისხისა და პოლარიზაციის კუთხეებში დიდი ცვლილებების დაკვირვება. სპექტრულმა ანალიზმა აჩვენა სისტემური ცვალებადობა მიკროტალღურ დიაპაზონში დროსთან ერთად (Gupta Et Al, 2019).

გამოყენებული აპარატურა

მიჩიგანის უნივერსიტეტის ტელესკოპი

მონაცემები შეგროვებული იქნა მიჩიგანის უნივერსიტეტის ფიჩის მთის რადიო ობსერვატორიის, „მოჰავე“ პროგრამისა და VLBA პროგრამის ოვენსის ხეობის რადიო ობსერვატორიის დაკვირვებებიდან.

მიჩიგანის 26-მეტრიან რადიო ტელესკოპი წარმოადგენს პარაბოლურ ამრეკლს, რომელიც აიგო 1958 წელს. ის მდებარეობს სტინჟფილდის ტყეში, მიჩიგანის უნივერსიტეტის კამპუსიდან 25 კილომეტრის დაშორებით. რადიო ტელესკოპი მეორე უდიდესი მართვადი ტელესკოპი იყო მსოფლიოში და 1960-იანებში ძირითად ასტრონომიულ აღმოჩენებში იღებდა მონაწილეობას. 1960-იანი წლების შემდეგ, ტელესკოპი გამოიყენება აქტიური გარეგალაქტიკური ობიექტებიდან ნაკადის სიმკვრივისა და წრფივი პოლარიზაციის მონაცემების მიღებაში.



სურათი 5. მიჩიგანის უნივერსიტეტის 26 მ-იანი ტელესკოპი ფიჩის მთაზე.

„მოჰავეს“ პროგრამა

„მოჰავე“ (MOJAVE – Monitoring Of Jets In Active Galactic Nuclei With VLBA Experiments) გრძელვადიანი პროგრამაა, რომელიც აკვირდება რადიო სიკაშკაშესა და პოლარიზაციას გალაქტიკათა აქტიური გულეების ჯეტებში ჩრდილოეთის ცაზე. დაკვირვებების დაახლოებით 2/3 განხორციელდა 1994 წლიდან 2002 წლამდე. „მოჰავეს“ დაკვირვებებში გამოიყენება უმაღლესი გარჩევადობის ტელესკოპი: VLBA (Very Long Baseline Array) 2 სმ-იანი ტალღის სიგრძეზე, რომელიც საშუალებას იძლევა დავინახოთ სრული პოლარიზაცია 1 მილიარდსეკუნდზე უკეთესი კუთხური გარჩევადობით.

ოვენსის ხეობის ტელესკოპი

„ოვროს“ 40 მ-იანი ტელესკოპი რადიო ტელესკოპია ოვენსის ხეობის რადიო ობსერვატორიაში. 2007 წლიდან ტელესკოპი გამოიყენება ბლანზარების მონიტორინგის კამპანიაში. დღეისთვის, ტელესკოპი იღებს 1800 ბლანზარის მუდმივ გაზომვებს 15 GHz სიხშირეზე ორჯერ კვირაში.

როგორც მიჩიგანის ტელესკოპი, „ოვროს“ 40 მ-იანი ტელესკოპიც წარმოადგენს $f/0.4$ პარაბოლურ ამრეკლს. მიმღები ორი სიმეტრიული ღერძისგან გადახრილი რქებით დამონტაჟებულია მთავარ ფოკუსზე. მიმღები არჩევს მარცხენა-ხელის პრინციპზე წრიულ პოლარიზაციას, ამიტომ ნებისმიერი ორიენტაციის მქონე წრფივი პოლარიზაციის წყაროების დაკვირვება შესაძლებელია სრული ინტენსიურობით. აპერტურის მქ-ია $\eta \approx 0.25$ (Richards Et Al, 2011).



სურათი 6. ოვენსის ხეობის რადიო ტელესკოპი.

საჭირო პარამეტრები და სიდიდეები

მოდულირებული იულიუსის თარიღი (MJD)

იულიუსის თარიღი წარმოადგენს ძვ.წ. 4713 წლის 1 იანვრის შუადღიდან გასული დღეების რაოდენობას გრინვიჩის დროის მიხედვით. იულიუსის თარიღი იყენებს მეთაედებისა და მესაედების თანრიგებს საათების გამოსახატად.

მოდულირებული იულიუსის თარიღი ცვლის იულიუსის თარიღის იმით, რომ ის ათვლას შუალამიდან იწყებს. ასევე, სიმარტივისთვის პირველი ორი იულიუსის თარიღი იშლება. ეს კი იმითაა გამოწვეული, რომ 1858 წლის 17 ნოემბრის შემდეგ, იულიუსის თარიღის დღეები რამდენიმე საუკუნის განმავლობაში მოქცეულნი იქნებიან 2400000-სა და 2500000-ს შორის. ამიტომ, ვიღებთ:

$$MJD = JD - 240000.5$$

ნათება, ნაკადი და ნაკადის სიმკვრივე

ასტრონომები სწავლობენ ასტრონომიულ წყაროს მისი რადიაციის სიმძლავრის გაზომვით, როგორც მიმართულებისა და სიხშირის ფუნქციით, და მოგვიანებით სხვა თვისებებით (დრო, პოლარიზაცია). გამოსხივების სიმძლავრის რიცხვითი მნიშვნელობის მისანიჭებლად საჭიროა ცალსახა განსაზღვრებების შემოღება. ნათება (L), ანუ იგივე სიმძლავრე წარმოადგენს ერთეულოვან დროში გამოსხივებულ ენერგიას. მისი ერთეული SI სისტემაშია 1 ვატი. ამის და მიუხედავად, ნათება არ არის პირდაპირ საზომი ერთეული, რადგან ჩვენ არ შეგვიძლია მთლიანი გამოსხივებული ენერგიის გაზომვა დროის მოცემული მომენტისთვის. გამოსხივებული ენერგიის უმეტესობა არ არის მიმართული ჩვენი ტელესკოპებისკენ.

ჩვენს მიერ აღმოჩენილი გამოსხივების სიმძლავრე დამოკიდებულია ტელესკოპის ზომაზე - რაც უფრო დიდია მისი ფართობი, მით უფრო მეთი გამოსხივების მიღებაა შესაძლებელი - ამიტომაც, საჭიროა ჩვენი გაზომვების ნორმალიზაცია. შესაბამისად, ნაკადი (S) წარმოადგენს სინათლის ენერგიას ერთეულოვან დროსა და ერთეულოვან ფართობში. მისი ერთეული SI სისტემაშია 1 ვატი / მ². მისი გამოსათვლელი ფორმულაა:

$$S = \frac{L}{4\pi d^2}$$

ნაკადი, ასევე ვერ წარმოადგენს ხელსაწყო რიცხვით სიდიდეს. ამის მიზეზია ის, რომ შეუძლებელია გამოსხივების გაზომვა სრული ელექტრომაგნიტური სპექტრისთვის, რადგან შესაბამისი ტექნოლოგიები ჯერ არ არის განვითარებული. დღევანდელი ტელესკოპებით შესაძლებელია მხოლოდ იმ მცირე სიხშირულ დიაპაზონზე გამოსხივებული ენერგიის გაზომვა, რომლის მიმართაც ყველაზე მგრძობიარეა მიმღები.

ნაკადის სიმკვრივე (S_v ან S_λ) არის ნაკადი ერთეულოვანი სიხშირისათვის და ის ტოლია ნაკადის სიდიდისა და სიხშირის დიაპაზონის სიგანის ფარდობის:

$$S_v = \frac{S}{\Delta\nu}$$

ამ ტოლობაში $\Delta\nu$ დაფიქსირებული ელექტრომაგნიტური ტალღების სიხშირის დიაპაზონია.

ხილვად ტალღის სიგრძეებზე მუშაობისას, ასტრონომები წარმოადგენენ ნაკადის სიმკვრივეს, როგორც ტალღის სიგრძის ფუნქციას:

$$S_\lambda = \frac{S}{\Delta\lambda}$$

მათემატიკური დამოკიდებულება ნაკადსა და ნაკადის სიმკვრივეს შორის კი შემდეგია:

$$S = \int S_v d\nu$$

საბოლოოდ, ნაკადის სიმკვრივის უნივერსალურად გამოყენება დასაშვებია, რადგანაც ის არის სიდიდე, რომელზეც ყველა დამკვირვებელი უნდა შეთანხმდეს. და რადგან ეს ასეა, საჭიროა მისი ერთეულის განსაზღვრა. ასტრონომიული წყაროებისთვის მიღებული ენერგია ერთეულოვან დროში, ერთეულოვან მოცულობაში და ერთეულოვან დიაპაზონში მცირე როგორც საერთაშორისო სისტემაში, ასევე CGS სისტემაშიც. 10-ის უარყოფითი ხარისხების მუდმივად წერის აცილების მიზნით, რადიო ასტრონომებმა განსაზღვრეს ნაკადის სიმკვრივის ახალი ერთეული - 1 იანსკი.

$$1 \text{ იანსკი (Jy)} = 10^{-26} \text{ ვატი} \cdot \text{მ}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$$

პოლარიზაცია

სინათლის ტალღაში (რომელიც განივი ელექტრომაგნიტური ტალღაა, სადაც ელექტრული და მაგნიტური დამაბულობის \vec{E} ან \vec{H} რხევის მიმართულებები ტალღის გავრცელების მართებულია და ერთმანეთის მართებულნი არიან) \vec{E} და \vec{H} ვექტორის სიბრტყე მეტად და სწრაფად იცვლება ისე, რომ იგი მუდამ ტალღის გავრცელების მართებულია, ხოლო ამპლიტუდები ყველა მიმართულებით ერთნაირია. ასეთ სინათლეს ბუნებრივი ეწოდება. თუ რხევის სიბრტყე განუწყვეტლივ იცვლება, მაგრამ რხევის ამპლიტუდები სხვადასხვა მიმართულებით არაერთნაირია, ასეთი სინათლე ნაწილობრივ პოლარიზებულია, ხოლო თუ რხევის სიბრტყე უცვლელია ანუ \vec{E} ვექტორი ერთი წრფის პარალელურად ირხევა, მაშინ სინათლე წრფივად (ბრტყელად) პოლარიზებულია.

პოლარიზაციის ხარისხად მიღებულია სიდიდე:

$$P = \frac{I_{\text{მაქს}} - I_{\text{მინ}}}{I_{\text{მაქს}} + I_{\text{მინ}}}$$

, სადაც $I_{\text{მაქს}}$ და $I_{\text{მინ}}$ სინათლის ინტენსივობის მაქსიმალური და მინიმალური მნიშვნელობებია, რომლებიც შეესაბამებიან \vec{E} ვექტორის ორ მართებულ კომპონენტებს. ბუნებრივში $I_{\text{მაქს}} = I_{\text{მინ}}$ და $P = 0$, ხოლო ბრტყელპოლარულისთვის კი - $I_{\text{მინ}} = 0$ და $P = 1$.

ფარდობითი ამპლიტუდა

ფარდობითი ამპლიტუდა წარმოადგენს ხშირად გამოყენებად პარამეტრს სიკაშკაშის მრუდის ცვალებადობის ხარისხის დასადგენად. კვლევის ჩატარების სხვადასხვა მეთოდები და ინსტრუმენტების მგრძობელობა იძლევა განსხვავებულ შედეგს და ხვრელებს სიკაშკაშის მრუდში (Schleicher Et Al, 2019). N ცალი x_i მონაცემებში ცვალებადობის ინტენსიურობის გამოსათვლელად შესაძლებელია გამოვიყენოთ დისპერია:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\langle x \rangle - x_i)^2$$

ამის და მოუხედავად, ის არ ითვალისწინებს მონაცემებში უკვე არსებულ ცდომილებას. ფარდობითი ამპლიტუდის უპირატესობა არის ის, რომ ის გამოითვლება შემთხვევითი შეცდომების მხედველობაში მიღებით. ის ტოლია:

$$F_{\text{var}} = \frac{\sqrt{\sigma^2 - \delta^2}}{\langle x \rangle}$$

ამ ტოლობაში $\langle x \rangle$ წარმოადგენს დაკვირვებების საშუალო არითმეტიკულს, σ^2 არის დისპერსია და δ^2 კი გამოითვლება შემდეგნაირად:

$$\delta^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{\text{err},i}^2$$

აქ $x_{\text{err},i}$ შესაბამისი x_i მონაცემის ცდომილებაა. ფარდობითი ამპლიტუდის ცდომილება მიიღება:

$$\Delta F_{\text{var}} = \sqrt{F_{\text{var}}^2 + F'_{\text{var}} - F_{\text{var}}}$$

, სადაც F'_{var} გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$F'_{var} = \sqrt{\left(\frac{2}{N} \frac{\delta^2}{\langle x \rangle^2}\right)^2 + \left(\frac{\delta^2}{N} \frac{2F_{var}}{\langle x \rangle}\right)^2}$$

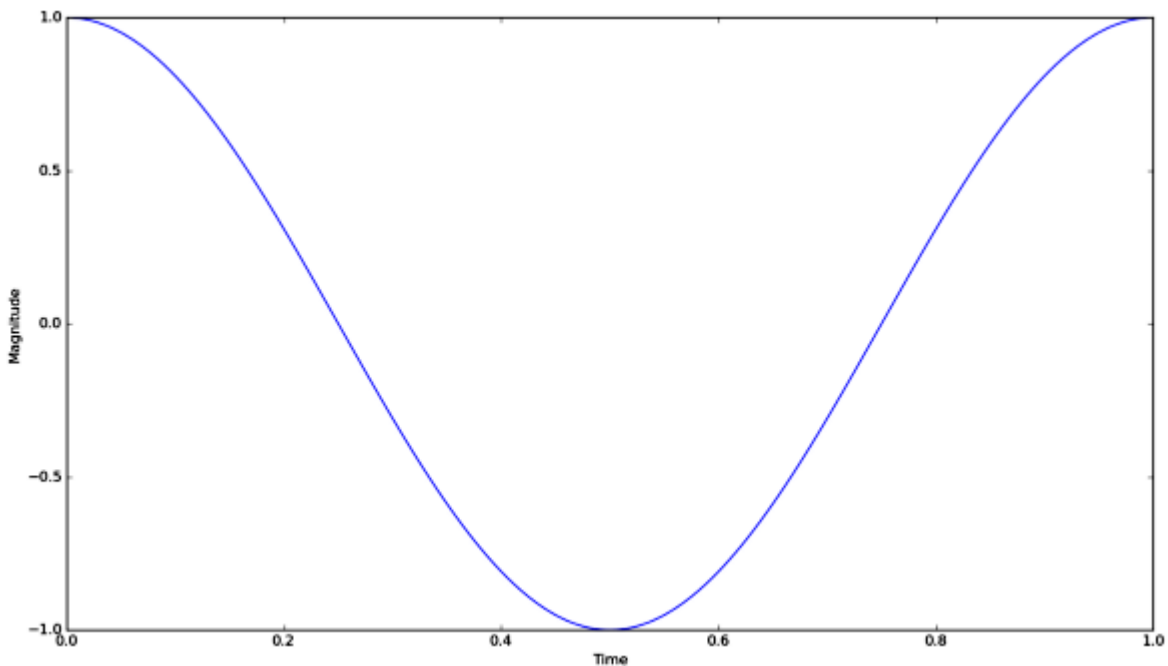
ვეივლეტ-ანალიზი

ფურიე ანალიზი წარმოადგენს მნიშვნელოვან და ხშირად გამოყენებად მეთოდს. ფურიე ანალიზი მათემატიკური ხელსაწყოა, რომელიც საშუალებას იძლევა დროზე დამოკიდებული სიგნალები წარმოვადგინოთ სხვადასხვა სიხშირის კომპონენტებად. წარმოვიდგინოთ დროის ფუნქცია $f(t)$. ფურიე გარდაქმნის ფორმულაა:

$$F(v) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i2\pi vt} dt$$

, სადაც $F(v)$ ფუნქცია წარმოადგენს $f(t)$ სიგნალის სპექტრს. თუმცა, კლასიკური ფურიე გარდაქმნა არავითარ ინფორმაციას არ იძლევა დროის შესახებ. ფურიეს ანალიზისას აბსოლუტური კონტროლი გვაქვს სიხშირეზე, თუმცა არაფერი ვიცით ამ სიხშირის შესაბამის დროზე.

ორივეს, სიხშირისა და ამ სიხშირის დროითი კოორდინატის განსასაზღვრად შესაძლებელია საწყისი სიგნალის ნაწილებად დაშლა და ფურიე გარდაქმნის გამოყენება თითოეული მათგანისათვის. ამ მეთოდს მოკლე-დროითი (ფანჯრული) ფურიე გარდაქმნა (Short Time Fourier Transform). მოკლე-დროითი ფურიე გარდაქმნის მორგებისას ნაწილობრივ სიგნალზე, სიხშირე, რომელიც მას შეუძლია დაიჭიროს ნაწილობრივი სიგნალის სიგრძის ნახევარია თუ ჩავთვლით, რომ ნაწილობრივი სიგნალის ხანგრძლივობა ერთი წამია. ეს კი შეუძლებელს ხდის ისეთი სიგნალისგან ინფორმაციის მიღებას, რომლის სიხშირე 1 Hz-ზე მცირეა. ამიტომ, საჭიროა უფრო დიდი ფანჯრები მცირე სიხშირეების დასაფიქსირებლად და პირიქით - მცირე ფანჯრები მაღალი სიხშირეების. სწორედ ეს წარმოადგენს ვეივლეტების იდეას.



გრაფიკი 4. უმცირესი სიხშირე, რომლის დაჭერაც შეგვიძლია ასეთი ფანჯრით, 1 Hz.

ვეივლეტ-გარდაქმნის ზოგადი ფორმულაა

$$X_{a,b} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi_{a,b}(t)dt$$

აქ X დამუშავებული სიგნალია, x ნამდვილი სიგნალია, ψ დედა ვეივლეტია, a შეკუმშვისა და b წანაცვლების კოეფიციენტები. შეკუმშვა ფაქტობრივად იგივეა, რაც ფანჯრის ზომა. ზედა ფორმულის ნაცვლად, მისი ჩაწერა შესაძლებელია როგორც:

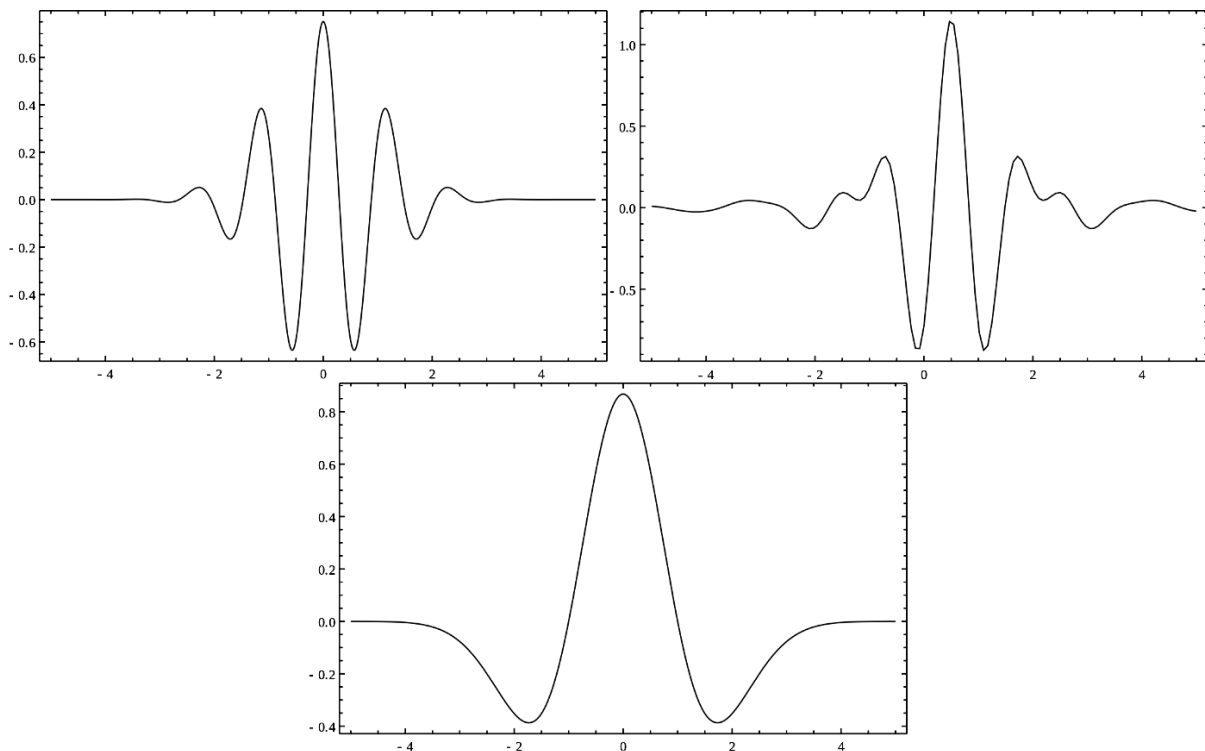
$$X_{a,b} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt$$

ვეივლეტ გარდაქმნას უამრავი დედა ვეივლეტი გააჩნია და შესაძლებელია ახალი ვეივლეტების განსაზღვრა. ეს წარმოადგენს დიდი განსხვავებას ფურიე და ვეივლეტ გარდაქმნებს შორის: ფურიეს ერთი სახის გარდაქმნა შეუძლია, მაგრამ ვეივლეტს ასეთი უამრავი გარდაქმნა აქვს.

საზოგადოდ, იმის მიხედვით, თუ როგორ ვმუშაობთ ვეივლეტების წანაცვლება-შეკუმშვაზე, ვეივლეტ გარდაქმნის სახეები ორ ძირითად კლასად იყოფა:

1. უწყვეტი ვეივლეტ გარდაქმნა (Continuous Wavelet Transform – CWT) ისეთი ვეივლეტ გარდაქმნაა, რომლის შეკუმშვისა და გარდაქმნის კოეფიციენტები უსაზღვროა. უწყვეტ ვეივლეტ გარდაქმნას შკალოგრამის გენერირებისთვის იყენებენ. შკალოგრამი სამი პარამეტრისგან (დრო, მასშტაბი, კოეფიციენტი) შედგება. CWT-სთვის ყველაზე ხშირად გამოყენებადი დედა ვეივლეტებია:

- მორლეტის ვეივლეტი;
- მეიერის ვეივლეტი;
- მექსიკური ქუდის ვეივლეტი.

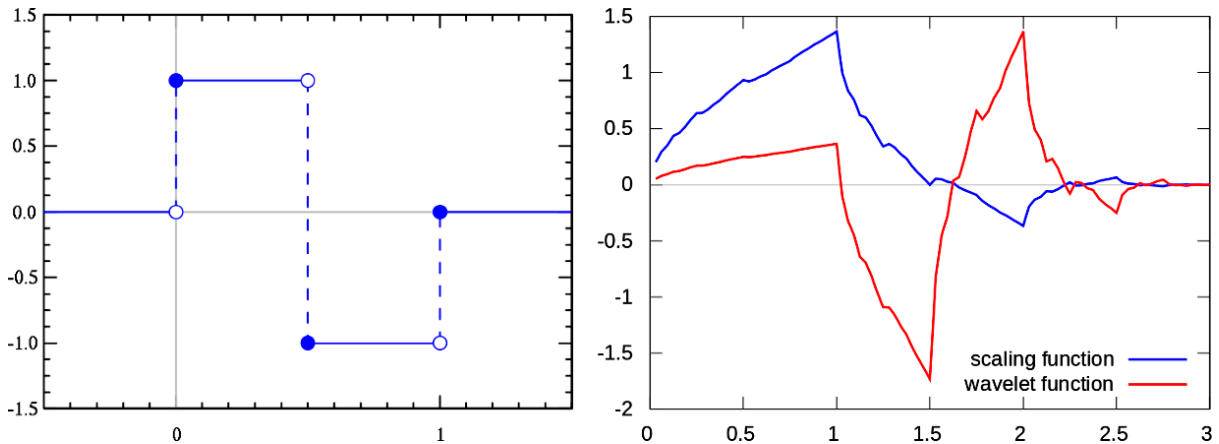


გრაფიკი 5. მორლეტის (ზედა მარცხენა), მეიერის (ზედა მარჯვენა) და მექსიკური ქუდის (ქვედა) დედა ვეივლეტები.

2. დისკრეტული ვეივლეტ გარდაქმნისას (Discrete Wavelet Transform – DWT) შეკუმშვისა და გარდაქმნის კოეფიციენტები შეზღუდულია. შეზღუდვების წესების მაგალითია, ვთქვათ, შეკუმშვის კოეფიციენტის გაზრდა 2-ის ხარისხებად ($a = 1, 2, 4,$

8, ...), ან წანაცვლების კოეფიციენტისთვის მხოლოდ ნატურალური რიცხვების მინიჭება ($b = 1, 2, 3, 4, \dots$). დისკრეტულ ვეივლეტ გარდაქმნებში გამოყენებული დედა ვეივლეტები განსხვავდებიან უწყვეტში გამოყენებული დედა ვეივლეტებისგან. DWT-ში ხშირად გამოყენებადი დედა ვეივლეტებია:

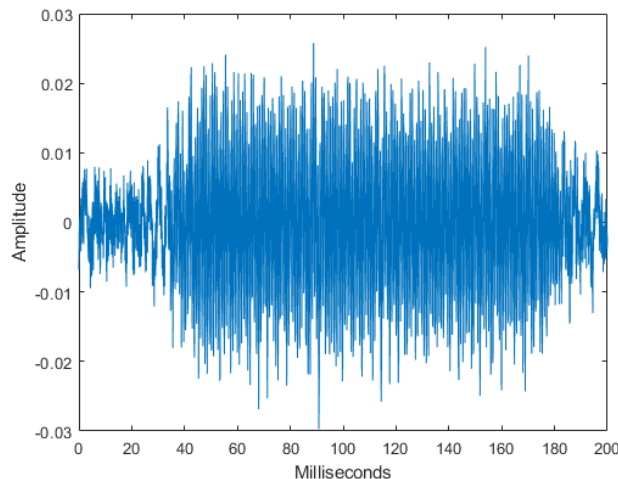
- ჰარის ვეივლეტი;
- დობეშის ვეივლეტი - ამ ვეივლეტს გააჩნია უნიკალური მასშტაბის ცვლილების შეზღუდვა. მას გააჩნია მამა ვეივლეტი სწორი მასშტაბის შესარჩევად.



გრაფიკი 6. ჰარის (მარცხენა) და დობეშის (მარჯვენა) ვეივლეტები.

მაგალითისთვის, წარმოვიდგინოთ ადამიანის ყურისგან მიღებული ოტოაკუსტიკური გამოსხივება. ოტოაკუსტიკური ტალღები იქმნება ყურის შიდა ნაწილში (ლოკოკინში) და წარმოადგენს ადამიანის გამართული სმენის აპარატის მტკიცებულებას.

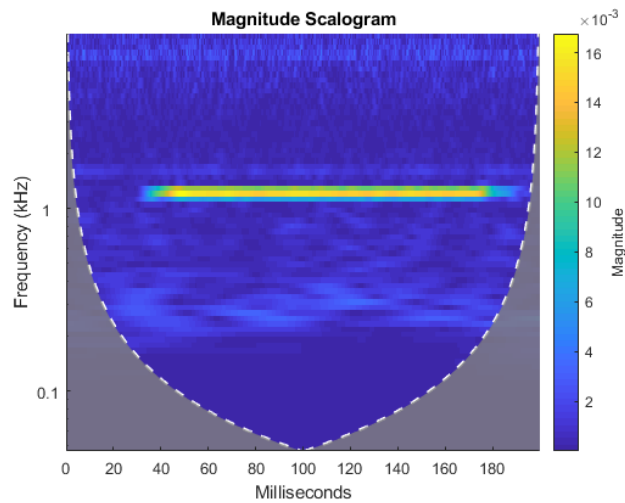
```
load dpoae
plot(t.*1000,dpoaets)
xlabel('Milliseconds')
ylabel('Amplitude')
```



გრაფიკი 7. ოტოაკუსტიკური გამოსხივების ამპლიტუდის დამოკიდებულება დროზე.

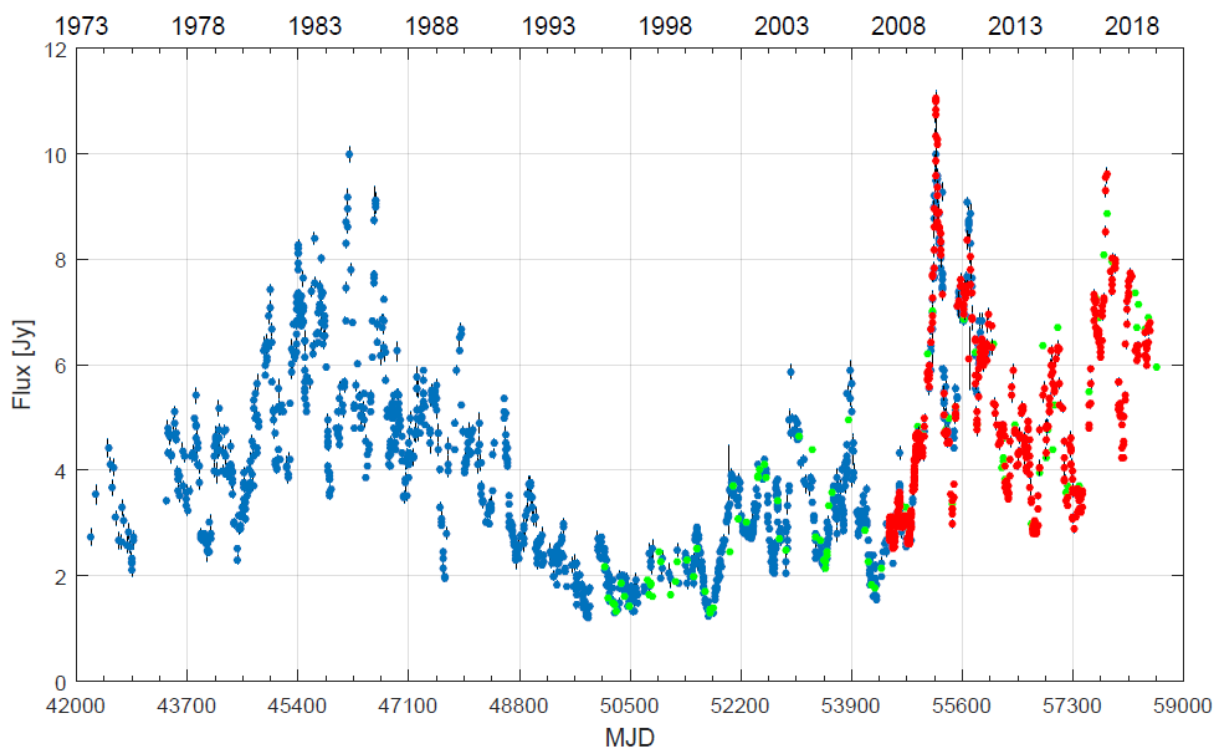
გამოსხივება იწყება 25 მწმ-დან და მთავრდება 175 მწმ-ზე. ექსპერიმენტულ პარამეტრებზე დაყრდნობით სიხშირე 1230 Hz-ია.

```
cwt(dpoaets, 'bump', 20000);  
xlabel('Milliseconds');
```

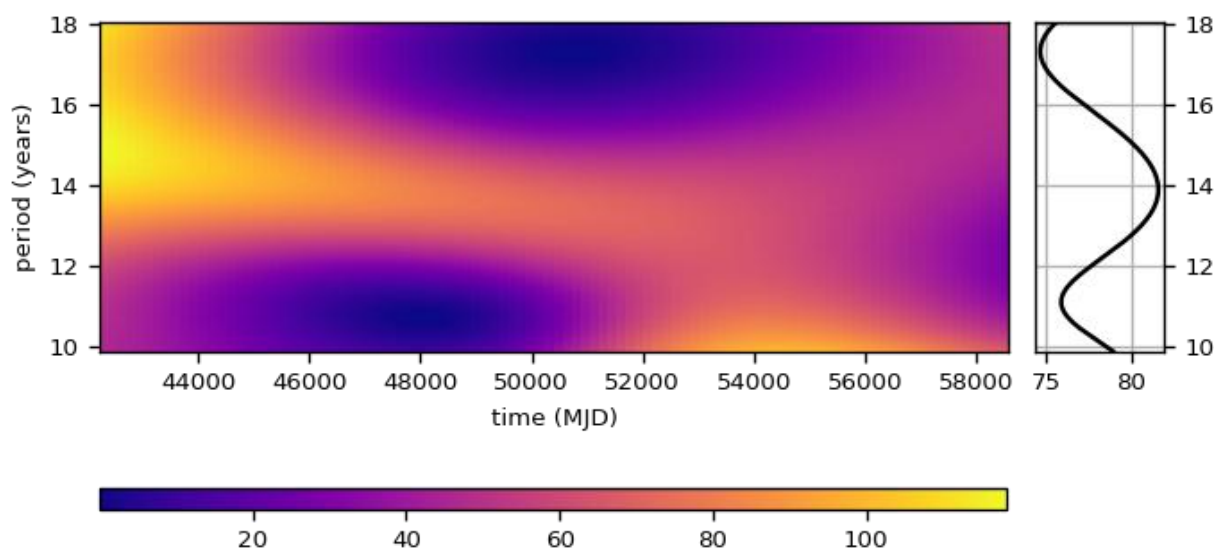


გრაფიკი 8. ოტოაკუსტიკური გამოსხივების ვეიველეტ-ანალიზის სკალოგრამა.

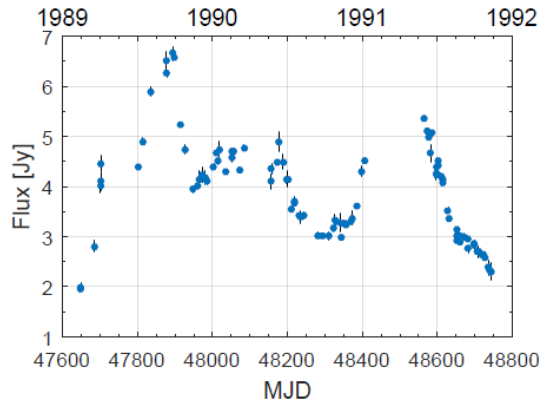
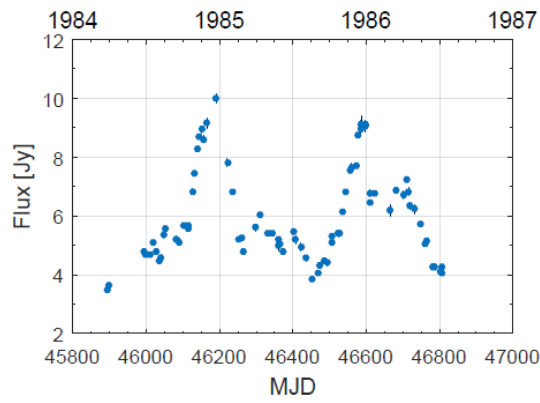
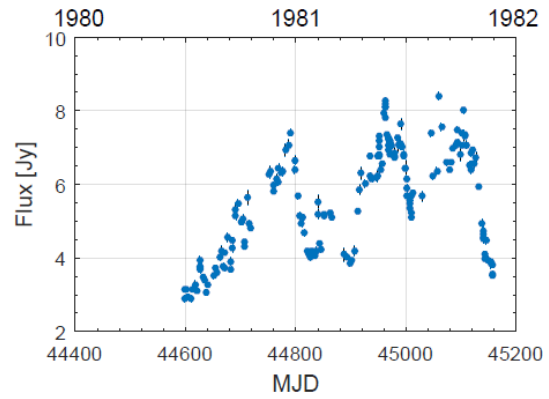
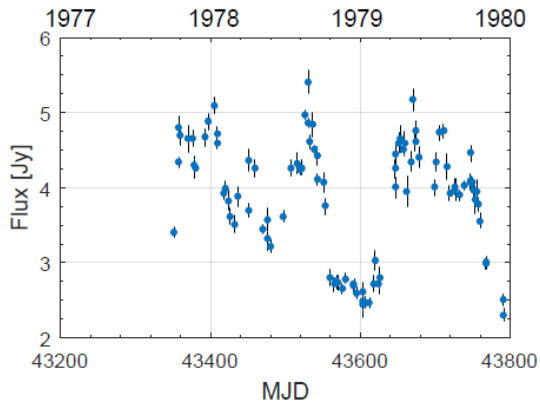
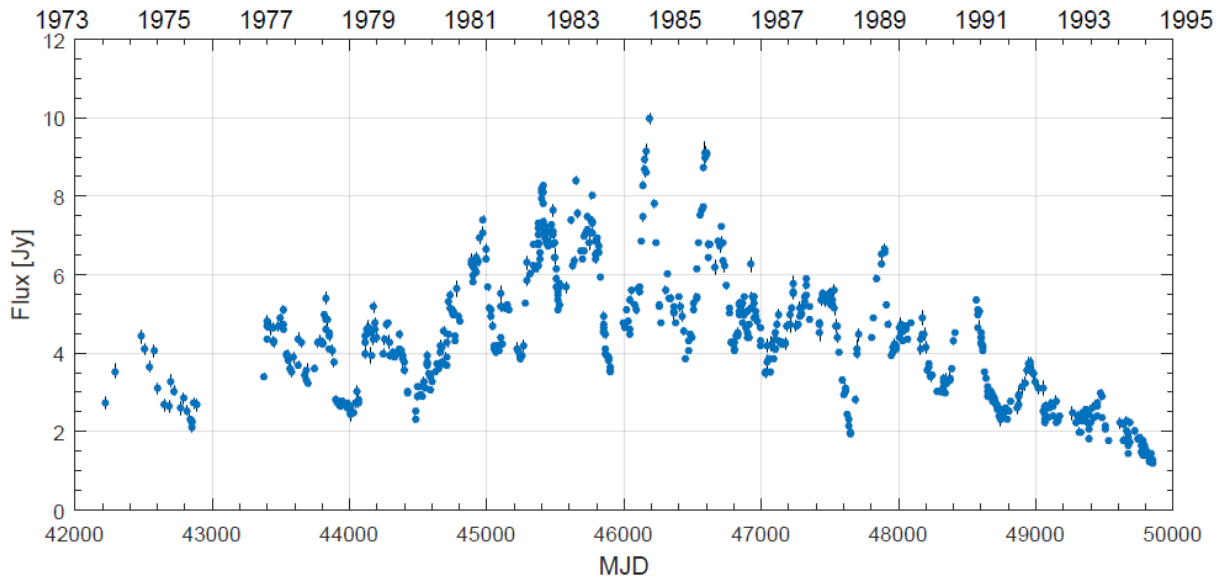
შედეგები



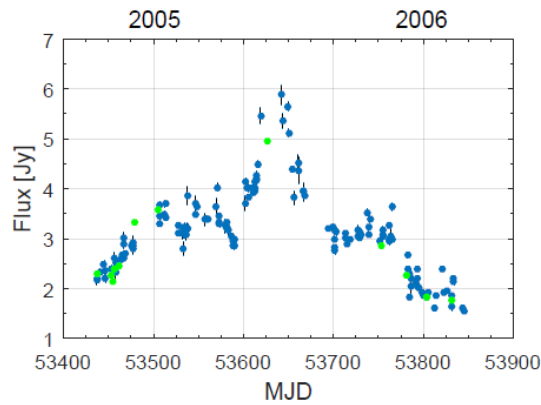
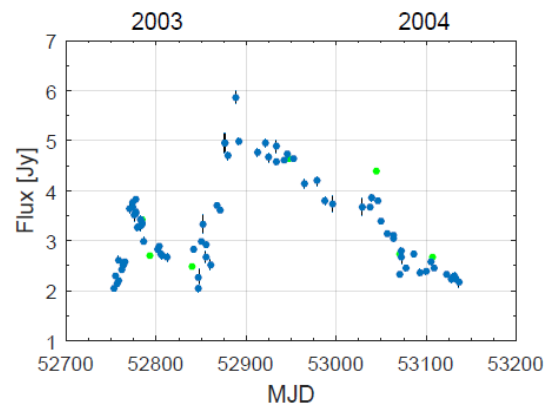
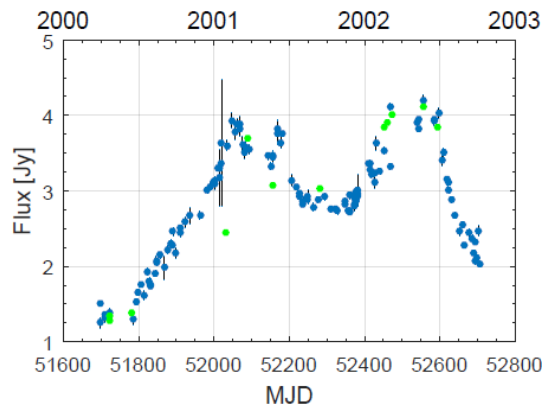
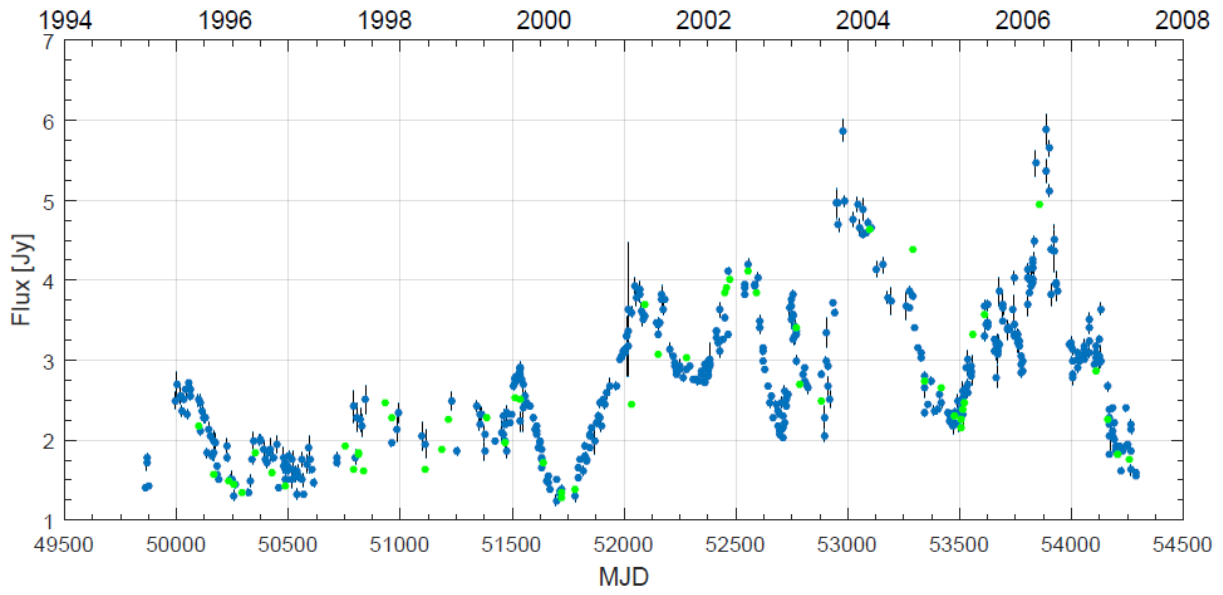
გრაფიკი 9. ობიექტი OJ 287-ის სიკაშკაშის მრუდი 1973-2019 წლებში მიჩიგანის (ლურჯი), მოჰავეს (მწვანე) და ოვროს (წითელი) ტელესკოპების მონაცემებზე დაყრდნობით.



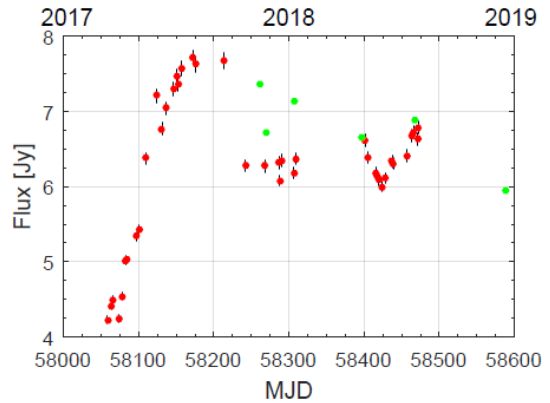
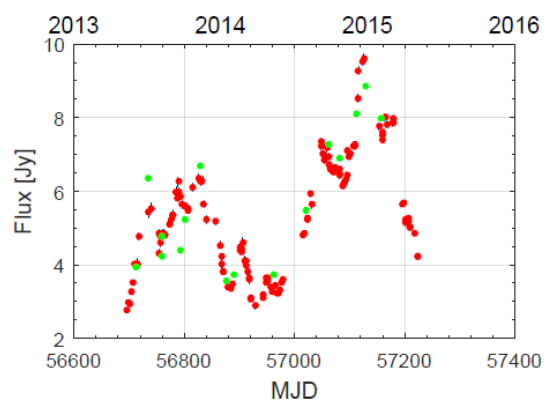
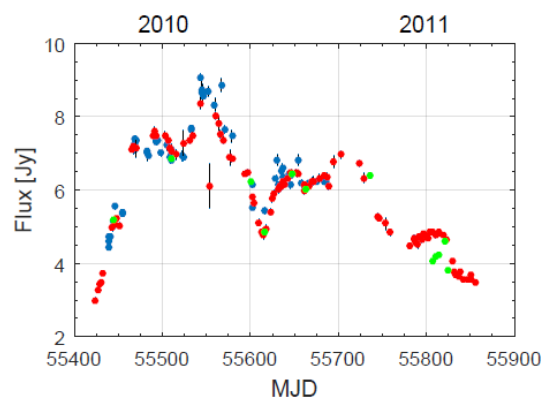
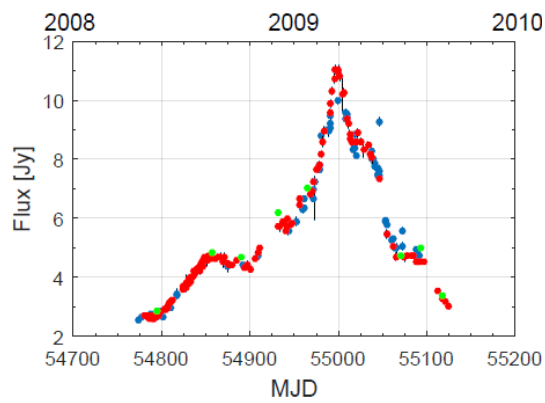
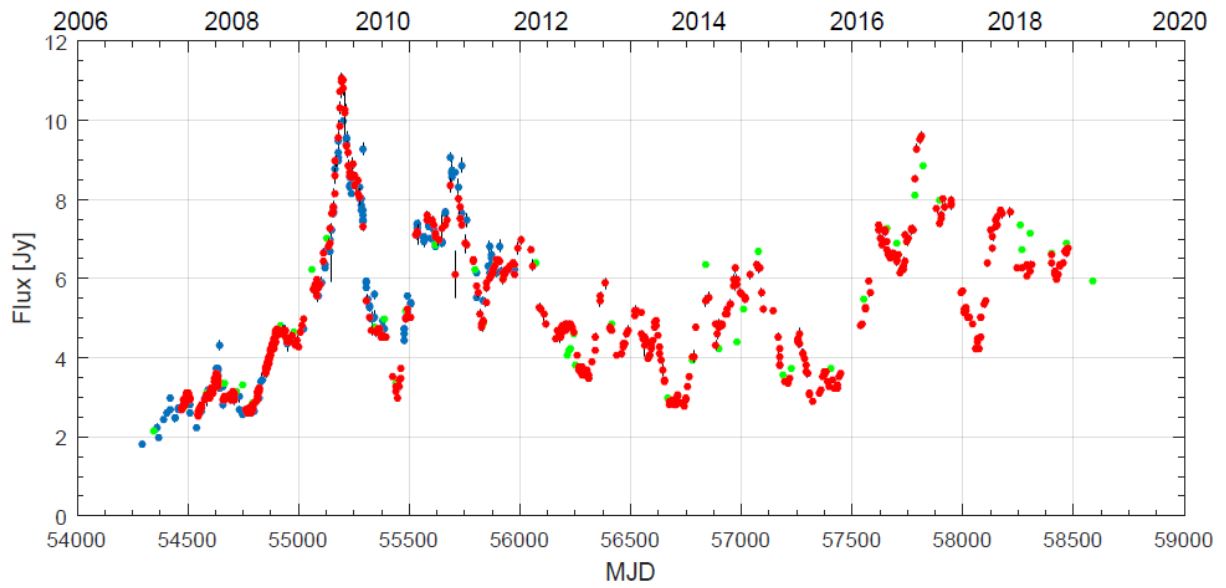
გრაფიკი 10. ობიექტი OJ 287-ის სიკაშკაშის მრუდების ვივლეტ ანალიზი.



გრაფიკი 11. ობიექტი OJ 287-ის სკვაშკაშის მრუდი 1973-1995 წლებში მიჩიგანის უნივერსიტეტის მონაცემებზე დაყრდნობით.



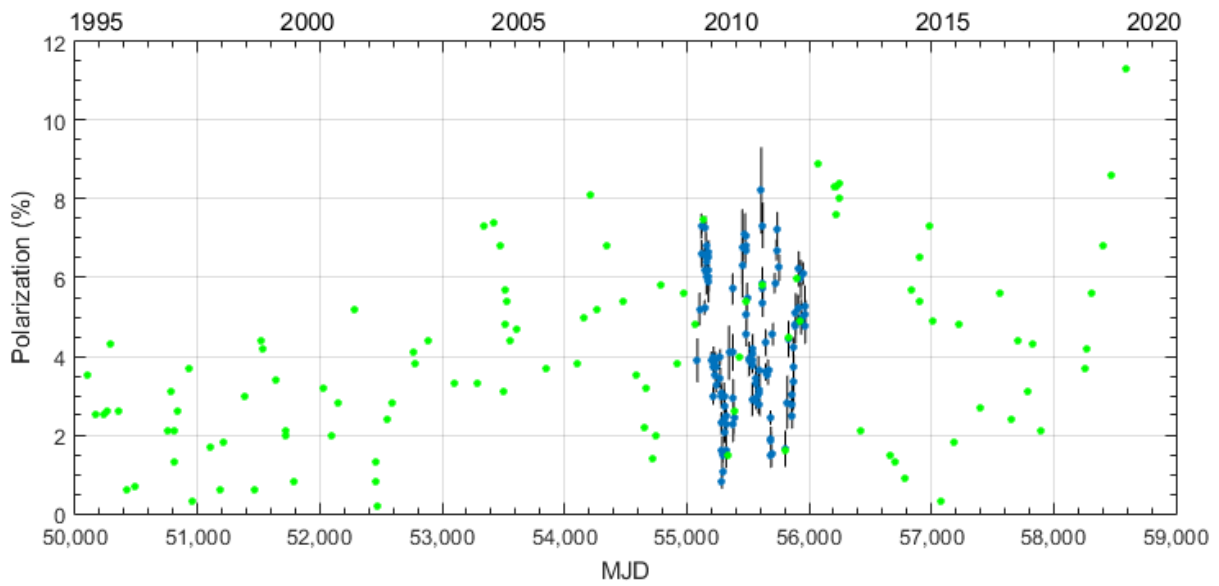
გრაფიკი 12. ობიექტი OJ 287-ის სიკაშკაშის მრუდი 1995-2008 წლებში მიჩიგანისა (ლურჯი) და მოჰავეს (მწვანე) ტელესკოპების მონაცემებზე დაყრდნობით.



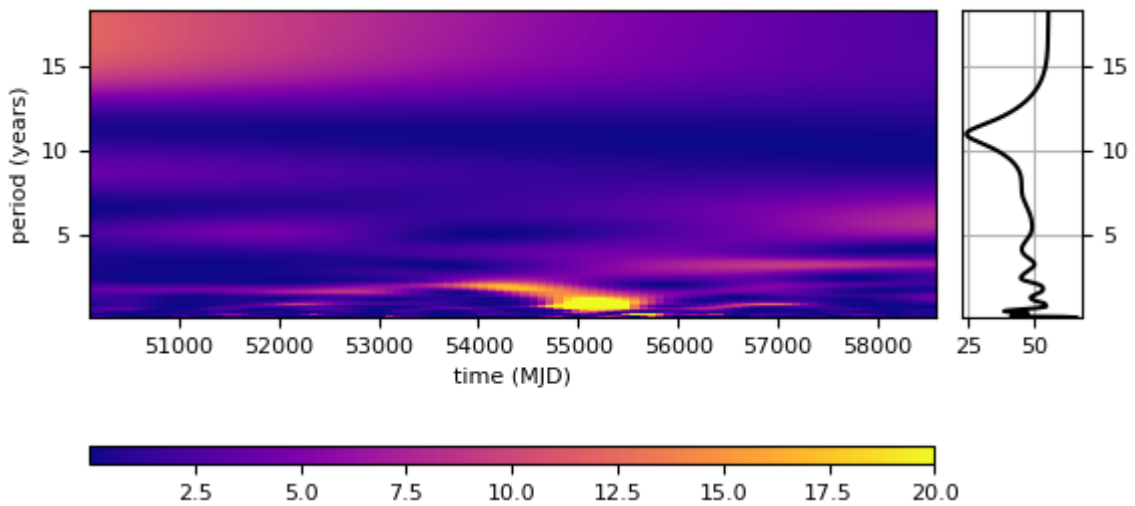
გრაფიკი 13. ობიექტი OJ 287-ის სიკაშკაშის მრუდი 2008-2019 წლებში მიჩიგანის (ლურჯი), მოჰავესა (მწვანე) ტელესკოპების მონაცემებზე დაყრდნობით.

პერიოდი (MJD)	პერიოდი (თარიღი)	მინ. სიკაშკაშე (ცდომ)	მაქს. სიკაშკაშე (ცდომ)	საშუალო სიკაშკაშე (ცდომ)	F _v (ცდომ)
42219 – 49855	21.06.74 – 18.05.95	1.2 (0.02)	9.98 (0.27)	4.43 (0.09)	0.3761 (0.0009)
43379 – 44478	24.08.77 – 27.08.80	2.31 (0.06)	5.41 (0.2)	3.87 (0.11)	0.2002 (0.0030)
44478 – 45895	27.08.80 – 14.07.84	2.31 (0.03)	8.39 (0.2)	5.62 (0.09)	0.2579 (0.0013)
45895 – 46808	14.07.84 – 13.01.87	3.51 (0.04)	9.98 (0.27)	5.94 (0.09)	0.2655 (0.0020)
47647 – 48742	01.05.89 – 30.04.92	1.94 (0.02)	6.66 (0.2)	3.9 (0.08)	0.2561 (0.0025)
49855 – 54290	18.05.95 – 09.07.07	1.2 (0.01)	5.88 (0.84)	2.73 (0.07)	0.3116 (0.0015)
51696 – 52707	01.06.00 – 09.03.03	1.25 (0.02)	4.19 (0.84)	2.88 (0.06)	0.2413 (0.0032)
52707 – 53473	09.03.03 – 13.04.05	2.04 (0.02)	5.87 (0.2)	3.28 (0.07)	0.2770 (0.0029)
53473 – 54290	13.04.05 – 09.07.07	1.55 (0.02)	5.88 (0.27)	3.08 (0.08)	0.2623 (0.0023)
54290 – 58589	09.07.07 – 16.04.19	1.83 (0.02)	11.05 (0.74)	5.11 (0.09)	0.3761 (0.0007)
54746 – 55448	07.10.08 – 09.09.10	2.56 (0.02)	11.05 (0.74)	5.45 (0.1)	0.4217 (0.0015)
55448 – 56311	09.09.10 – 19.01.13	2.99 (0.22)	9.08 (0.6)	6 (0.1)	0.2228 (0.0016)
56740 – 58058	24.03.14 – 01.11.17	2.79 (0.04)	9.62 (0.18)	5.42 (0.09)	0.2896 (0.0014)
58058 – 58588	01.11.17 – 16.03.19	4.22 (0.05)	7.72 (0.11)	6.32 (0.08)	0.1530 (0.0020)

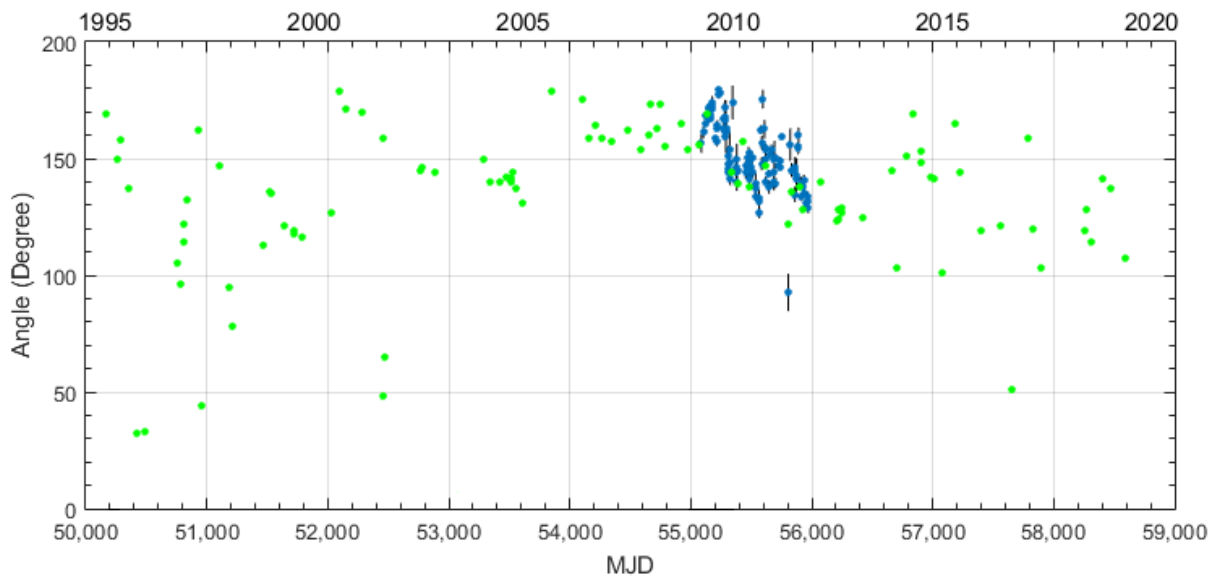
ცხრილი 1. 1973 წლიდან 2019 წლის ჩათვლით პერიოდებისა და ქვეპერიოდების სიკაშკაშის მრუდის მინიმალური, მაქსიმალური და საშუალო მნიშვნელობები ფარდობით ამპლიტუდასთან ერთად.



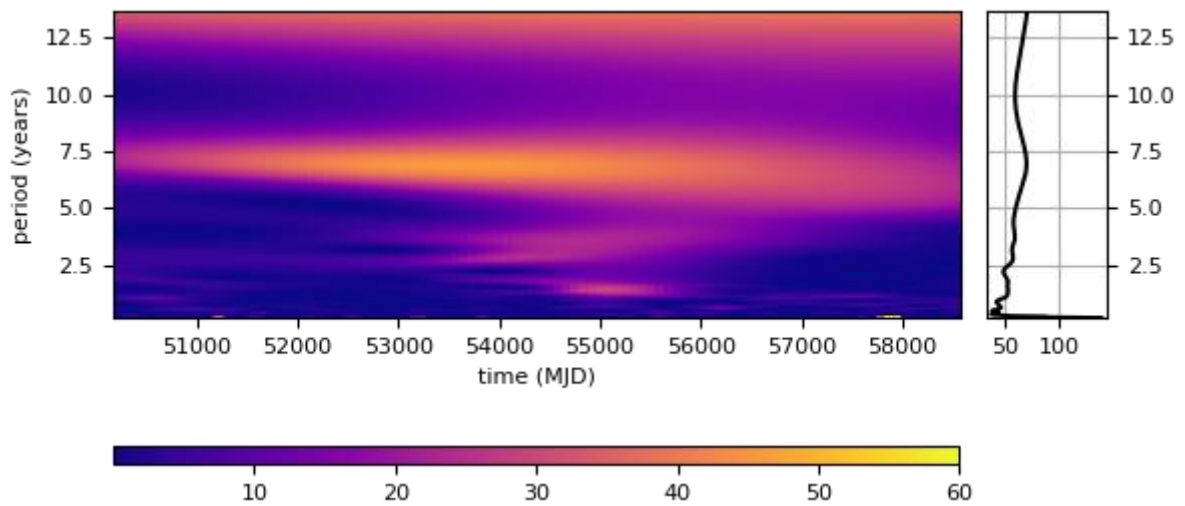
გრაფიკი 14. ობიექტი OJ 287-ის პოლარიზაციის სიდიდე 1995-2019 წლებში მიჩიგანის (ლურჯი) და მოჰავეს (მწვანე) ტელესკოპების მონაცემებზე დაყრდნობით.



გრაფიკი 15. ობიექტი OJ 287-ის პოლარიზაციის სიდიდის ვეივლეტ ანალიზი.



გრაფიკი 16. ობიექტი OJ 287-ის ჯეტის პოზიციური კუთხის ცვალებადობა 1995-2019 წლებში მიჩიგანის (ლურჯი) და მოჰავეს (მწვანე) ტელესკოპების მონაცემებზე დაყრდნობით.



გრაფიკი 17. ობიექტი OJ 287-ის კუთხის ცვლილების ვივლენტ ანალიზი.

შედეგების ანალიზი და დასკვნები

დაკვირვების ობიექტის (OJ 287) სიკაშკაშის მრუდის ვეივლეტ-ანალიზის გამოყენებით მონაცემების დამუშავების შემდეგ, ოპტიკური დაკვირვებებისგან განსხვავებით (Britzen Et Al, 2018), არ დადასტურდა OJ 287-ის 12-წლიანი კვაზი-პერიოდული ანთება რადიო დიაპაზონში. ამის და მიუხედავად, ცალკეულ გრაფიკებზე (იხ. გრაფიკები 11, 12, 13) კარგად ჩანს ორი კუზისებრი პიკი, რომელიც, სავარაუდოდ, მთავარი შავი ხვრელის აკრეციულ დისკში მეორეული შავი ხვრელის გავლით იქმნება. საკმარისად დიდ ინტერვალში (1973 წლის ნოემბრიდან 2001 წლის აპრილამდე) პერიოდი 13.5-დან 15 წლამდე მდორედ იცვლება და საშუალოდ 14.25 წელიწადს შეადგენს.

როგორც მიღებულია და დამტკიცებულია კვლევებით, გალაქტიკის აქტიური გულის რადიო გამოსხივება დაკავშირებულია სინქროტრონული გამოსხივების მექანიზმთან, რომელიც გვამლევს პოლარიზებულ ელექტრომაგნიტურ ტალღებს. ჩვენს შემთხვევაში, მოცემული პოლარიზაციის სიდიდის გრაფიკი (იხ. გრაფიკი 14) შედგენილი იქნა მიჩიგანის ტელესკოპისა და „მოჰავეს“ პროგრამის მონაცემებისგან. პოლარიზაციის სიდიდის მონაცემების ვეივლეტ-ანალიზის (იხ. გრაფიკი 15) შედეგად გამოიკვეთა 2006 წლის სექტემბრიდან 2011 წლის აგვისტომდე კვაზი-პერიოდულობისა და 2009 წლის მარტიდან 2011 წლის თებერვლამდე ვიწრო სიხშირული ზოლის მქონე პოლარიზაციის უბანი. ასევე, გრაფიკი აჩვენებს, რომ პოლარიზაციის სიდიდის მრუდი საერთოდ არ შეიცავს 12-წლიან პერიოდს. შესაძლებელია დავასკვნათ, რომ პოლარიზაციის სიდიდე აკრეციულ დისკში მეორეული შავი ხვრელის გავლისგან დამოუკიდებლად იცვლება და ის სრულიად დაკავშირებულია სინქროტრონულ მექანიზმიდან მომდინარე რადიო გამოსხივებასთან.

იმის და მიუხედავად, რომ პოზიციური კუთხის სიდიდის ვეივლეტ-ანალიზი (იხ. გრაფიკი 17) არ აჩვენებს მკვეთრ პერიოდულობას, საერთო ფონიდან მაინც შეიძლება გამოიყოს 7.5-წლიანი პერიოდი. შეგვიძლია ვივარაუდოთ, რომ ეს პროცესი დაკავშირებულია მცირე შავი ხვრელის გრავიტაციულ გავლენასთან, რაც აისახება ჯეტის მობრუნების კუთხეზე. დაკვირვებების მიხედვით პოზიციური კუთხე ითვლება დადებით სიდიდედ და არ ჩანს სიმეტრიის ღერძიდან გადახრის მიმართულება. აქედან მიგვაჩნია, ჯეტის ბრუნვის პერიოდი კორელაციაშია სიკაშკაშის ბრუნვის პერიოდთან და შესაძლებელია, განსაზღვრული იყოს მცირე შავი ხვრელის ბრუნვის პერიოდით.

ლიტერატურის ნუსხა

- **ოპტიკა** - გალინა ვეფხვაძე - თბილისის უნივერსიტეტის გამოცემა, 1998;
- **Radio Astronomy: Observing the Invisible Universe** – Felix J. Lockman – The Teaching Company, 2017;
- **Essential Radio Astronomy** – James J. Condon & Scott M. Ransom – Princeton Series in Modern Observational Astronomy, Princeton University Press, 2016;
- **Fundamentals of Radio Astronomy: Observational Methods** – Jonathan M. Marr, Ronald L. Snell & Stanley E. Kurtz – Series in Astronomy and Astrophysics, Taylor & Francis Group, 2016;
- **Tools of Radio Astronomy** – Thomas L. Wilson, Kristen Rohlfs & Susanne Hüttemeister – Astronomy and Astrophysics Library, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013;
- **Thesis for Degree of Master of Science: Emission Mechanism of Blazar OJ 287** – Hyunjoo Goh - Dept. of Astronomy and Space Science, Kyung Hee University, 2009;
- Astron. J., 72, 757-768 (1967); **A survey of the sky at 610.5 MHz. II. The region between declinations +15 and +22 degrees**; DICKEL J.R., YANG K.S., McVITTIE G.C. and SWENSON G.W.Jr.
- Astrophys. J., 325, 628-634 (1988/February-0); **OJ 287: binary pair of supermassive black holes**; SILLANPAA A., HAARALA S., VALTONEN M.J., SUNDELIUS B. and BYRD G.G.
- Astrophys. J., 460, 207-213 (1996/March-3); **OJ 287 outburst structure and a binary black hole model**; LEHTO H.J. and VALTONEN M.J.
- Astronomy and Astrophysics, volume 315, L13-16 (1996/11-1) ; **Double-peak structure in the cyclic optical outbursts of blazar OJ 287**; SILLANPAA A., TAKALO L.O., PURSIMO T., NILSSON K., HEINAEMAeki P., KATAJAINEN S., PIETILAE H., HANSKI M., REKOLA R., KIDGER M., et al.
- Mem. Soc. Astron. Ital., 67, 539-544 (1996); **Simultaneous optical and radio observations of the blazar OJ 287**; SILLANPAA A., TAKALO L.O., VALTAOJA E., TERASRANTA H., TORNIKOSKI M., HEIDT J., WAGNER S., BOCK H., SCHRAMM K.J., BORGEEST U., et al.
- Astron. Soc. Pacif., 110, 99-105 (1996/February-7); **Long-time Brightness Variations of OJ287 in the Binary Black Hole Model**; SUNDELIUS B., WAHDE M., LEHTO H.J. and VALTONEN M.J.
- Astrophys. J., 478, 527-529 (1997/March-3); **A precessing disk in OJ 287**; KATZ J.I.
- Astrophys. J., 484, 180-185 (1997/July-3); **A numerical simulation of the brightness variations of OJ 287**; SUNDELIUS B., WAHDE M., LEHTO H.J. and VALTONEN M.J.
- Astrophys. J., 503, 662-673 (1998/August-3); **Extraordinary activity in the BL Lacertae object OJ 287**; HUGHES P.A., ALLER H.D. and ALLER M.F.
- Astron. Astrophys., Suppl. Ser., 143, 357-368 (2000/May-1); **Tuorla quasar monitoring I. Observations of 1995-1997**; KATAJAINEN S., TAKALO L.O., SILLANPAA A., NILSSON K., PURSIMO T., HANSKI M., HEINAEMAeki P., KOTONEVA E., LAINELA M., NURMI P., et al.
- Astrophys. J., 643, L9-L12 (2006/May-3); **The 2005 November outburst in OJ 287 and the binary black hole model**; VALTONEN M.J., NILSSON K., SILLANPAA A., TAKALO L.O., LEHTO H.J., KEEL W.C., HAQUE S., CORNWALL D. and MATTINGLY A.
- Astrophys. J., Suppl. Ser., 174, 111-116 (2008/January-0); **CCD photometry and optical variability of the BL Lacertae object H0323+022**; ZHANG X., ZHENG Y.G., ZHANG H.J. and HU S.M.
- Nature, 452, 851-853 (2008); **A massive binary black-hole system in OJ 287 and a test of general relativity**; VALTONEN M.J., LEHTO H.J., NILSSON K., HEIDT J., TAKALO L.O., SILLANPAA A., VILLFORTH C., KIDGER M., POYNER G., PURSIMO T., et al.

- Astronomy and Astrophysics, volume 477, 407-412 (2008/1-2); **The structure of the October/November 2005 outburst in OJ 287 and the precessing binary black hole model**; VALTONEN M., KIDGER M., LEHTO H. and POYNER G.
- Astrophys. J., Suppl. Ser., 181, 466-472 (2009/April-0); **Photometric monitoring of OJ 287 from 2002 to 2007**; FAN J.H., ZHANG Y.W., QIAN B.C., TAO J., LIU Y. and HUA T.X.
- Astrophys. J., 698, 781-785 (2009/June-2); **Tidally induced outbursts in OJ 287 during 2005-2008**; VALTONEN M.J., NILSSON K., VILLFORTH C., LEHTO H.J., TAKALO L.O., LINDFORS E., SILLANPAA A., HENTUNEN V.-P., MIKKOLA S., ZOLA S., et al.
- Astronomy and Astrophysics, volume 516, A60-60 (2010/6-2); **H-alpha monitoring of OJ 287 in 2005-08**; NILSSON K., TAKALO L.O., LEHTO H.J. and SILLANPAAE A.
- Astron. Rep., 55, 1078-1085 (2011); **Optical variability of the blazar OJ 287 in 2005-2009**; BLINOV D.A., HAGEN-THORN V.A., HAGEN-THORN E.I., TAKALO L.O. and SILLANPAA A.
- Astrophys. J., Suppl. Ser., 194, 29 (2011/June-0); **Blazars in the Fermi era: the OVRO 40 m telescope monitoring program**; RICHARDS J.L., MAX-MOERBECK W., PAVLIDOU V., KING O.G., PEARSON T.J., READHEAD A.C.S., REEVES R., SHEPHERD M.C., STEVENSON M.A., WEINTRAUB L.C., et al.
- Astron. J., 141, 65 (2011/February-0); **Color behavior of BL Lacertae object OJ 287 during an optical outburst**; DAI Y., WU J., ZHU Z.-H., ZHOU X. and MA J.
- Astrophys. J., 764, 5 (2013/February-2); **Precursor flares in OJ 287**; PIHAJOKI P., VALTONEN M., ZOLA S., LIAKOS A., DROZDZ M., WINIARSKI M., OGLOZA W., KOZIEL-WIERZBOWSKA D., PROVENCAL J., NILSSON K., et al.
- Astronomy and Astrophysics, volume 557A, 28-28 (2013/9-1); **A helical jet model for OJ 287**; VALTONEN M. and PIHAJOKI P.
- Astrophys. J., 832, 47-47 (2016/November-3); **Detection of possible quasi-periodic oscillations in the long-term optical light curve of the BL Lac object OJ 287**; BHATTA G., ZOLA S., STAWARZ L., OSTROWSKI M., WINIARSKI M., OGLOZA W., DROZDZ M., SIWAK M., LIAKOS A., KOZIEL-WIERZBOWSKA D., et al.
- Mon. Not. R. Astron. Soc., 468, 426-434 (2017/June-2); **Characterizing long-term optical, ultraviolet and X-ray variability in different activity states of OJ 287**; SIEJKOWSKI H. and WIERZCHOLSKA A.
- Mon. Not. R. Astron. Soc., 465, 4423-4433 (2017/March-2); **Multiband optical variability of the blazar OJ 287 during its outbursts in 2015-2016**; GUPTA A.C., AGARWAL A., MISHRA A., GAUR H., WIITA P.J., GU M.F., KURTANIDZE O.M., DAMLJANOVIC G., UEMURA M., SEMKOV E., et al.
- Astrophys. J., 835, 275-275 (2017/February-1); **Flux and polarization variability of OJ 287 during the early 2016 outburst**; RAKSHIT S., STALIN C.S., MUNEER S., NEHA S. and PALIYA V.S.
- Astronomy and Astrophysics, volume 597A, 80-80 (2017/1-1); **Location of γ -ray emission and magnetic field strengths in OJ 287**; HODGSON J.A., KRICHBAUM T.P., MARSCHER A.P., JORSTAD S.G., RANI B., MARTI-VIDAL I., BACH U., SANCHEZ S., BREMER M., LINDQVIST M., et al.
- Mon. Not. R. Astron. Soc., 480, 407-430 (2018/October-2); **Strong X-ray flaring activity of the BL Lacertae source OJ 287 in 2016 October-2017 April**; KAPANADZE B., VERCELLONE S., ROMANO P., HUGHES P., ALLER M., ALLER H., KAPANADZE S. and TABAGARI L.
- Mon. Not. R. Astron. Soc., 478, 3199-3219 (2018/August-2); **OJ287: deciphering the 'Rosetta stone of blazars'**; BRITZEN S., FENDT C., WITZEL G., QIAN S.-J., PASHCHENKO I.N., KURTANIDZE O., ZAJACEK M., MARTINEZ G., KARAS V., ALLER M., et al.

- J. Phys. Conf., 942, (2018/January-3); **OJ287 taken to pieces: the origin of a precessing and rotating jet**; BRITZEN S., FENDT C., WITZEL G., PASHCHENKO I., KURTANIDZE O., ZAJACEK M., MARTINEZ G., KARAS V., ALLER M., ALLER H., ECKART A. NILSSON N., AREVALO P., CUADRA J., WITZEL A., et al.
- Astrophys. J., 864, 67-67 (2018/September-1); **Optical emission and particle acceleration in a quasi-stationary component in the jet of OJ 287**; SASADA M., JORSTAD S., MARSCHER A.P., BALA V., JOSHI M., MacDONALD N.R., MALMROSE M.P., LARIONOV V.M., MOROZOVA D.A., TROITSKY I.S., et al.
- Astron. J., 157, 95-95 (2019/March-0); **Characterizing optical variability of OJ 287 in 2016-2017**; GUPTA A.C., GAUR H., WIITA P.J., PANDEY A., KUSHWAHA P., HU S.M., KURTANIDZE O.M., SEMKOV E., DAMLJANOVIC G., GOYAL A., et al.
- Galaxies, 7, 2 (2019/June); **Fractional Variability—A Tool to Study Blazar Variability**; SCHLEICHER B., ARBET-ENGELS A., BAACK D., BALBO M., BILAND A., BLANK M., BRETZ T., BRUEGGE K., BULINSKI M., BUSS J., DOERR M., BRETZ T., BRUEGGE K. BULINSKI M., BUSS J. et al.