კორონული ხვრელების დინამიკის და კორონულ ხვრელებში არსებული ჯეტების პარამეტრებისა და ევოლუციის შესწავლა

სალომე ბაგაშვილი

სადისერტაციო ნაშრომი წარდგენილია ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტის საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა და მედიცინის ფაკულტეტზე ფიზიკის დოქტორის აკადემიური ხარისხის მინიჭების მოთხოვნების შესაბამისად

პროგრამა: ფიზიკისა და ასტრონომიის სადოქტორო პროგრამა

სამეცნიერო ხელმძღვანელები: ასოც. პროფესორი ბიძინა შერგელაშვილი, ასოც. პროფესორი დარეჯან ჯაფარიძე

> ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტი თბილისი, 2019

განაცხადი

როგორც წარდგენილი სადისერტაციო 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.

> სალომე ბაგაშვილი 29 ივლისი, 2019 წელი

აბსტრაქტი

მზის ატმოსფეროში მიმდინარე მოვლენები მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს საპლანეტაშორისო სივრცეზე, მათ შორის დედამიწის ზედა ატმოსფეროსა და მაგნიტოსფეროზე. მათ კვლევას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება მზე-ჰელიოსფეროს კავშირების ასახსნელად და კოსმოსური ამინდის მონიტორინგისათვის. ნაშრომში წარმოდგენილია მზის კორონული ხვრელების ბრუნვის მახასიათებლების და კორონულ ხვრელებში არსებული დინამიური წარმონაქმნების - კორონული ჯეტების კვლევის შედეგები. პირველ ამოცანას წარმოადგენს კორონული ხვრელების ბრუნვის სიჩქარეების გაზომვა, მათი განედის და კორონული ხვრელების ფართობების მიხედვით განაწილების შესწავლა, მიღებული პროფილების შედარება მზის ფოტოსფერული და შიდა ფენების ბრუნვის პროფილებთან. მეორე ამოცანა გულისხმობს კორონულ ხვრელებში არსებულ კაშკაშა წერტილებში წამოქმნილი კორონული ჯეტების შესწავლას, გათი ევოლუციის მახასიათებელი თვისებების გამოვლენასა და სხვადასხვა პარამეტრების შეფასებას.

კორონული ხვრელების შესასწავლად გამოვიყენეთ SDO/AIA 193 Å ტალღის სიგრძის მონაცემებზე დაყრდნობით SPoCA-suite-ს მიერ შექმნილი მონაცემების სერია. შევისწავლეთ 01/01/2013-20/04/2015 პერიოდში მზის ცენტრიდან ±60° განედსა და გრძედს შორის დაკვირვებული 540 კორონული ხვრელი. ბრუნვის კუთხური სიჩქარეები გამოთვლილია ობიექტების შესაბამისი მრავალკუთხედის გეომეტრიული ცენტრების გადაადგილების გაზომვით. კორონული ხვრელების საშუალო სიდერული ბრუნვის სიჩქარე შეადგენს 13.86 (± 0.05) °/დღეს. მათ ბრუნვაში დიფერენციულობა ფოტოსფეროსთან შედარებით ნაკლებადაა გამოხატული. ეკვატორულ არეში კორონული ხვრელებისა და ფოტოსფეროს ჰელიოსეისმოლოგიური კვლევებით მიღებული ბრუნვის პროფილები ერთმანეთის მსგავსია, 35-40° განედს ზემოთ კორონული ხვრელების ბრუნვის კუთხური სიჩქარე აღემატება ფოტოსფეროს ბრუნვის სიჩქარეს. კორონული

ii

ხვრელების ბრუნვის ხასიათი არ გავს ფოტოსფეროში დაკვირვებულ არც ერთ ბრუნვის პროფილს და თითქმის სრულად ემთხვევა ტახოკლინის და კოვექციური ზონის ქვედა ფენების ბრუნვის მახასიათებლებს დაახლოებით 0.71 *R*_o -ზე. ეს მიუთითებს, რომ შესაძლებელია კორონული ხვრელები დაკავშირებული იყოს მზის გლობალურ მაგნიტურ ველთან, რომელიც ტახოკლინში აღნიშნულ სიღრმეზე წარმოიქმნება.

კორონულ ხვრელებში და მათ საზღვრებთან წარმოქმნილი ჯეტების შესასწავლად გამოვიყენეთ SDO/AIA 193 Å გამონასახები. შესწავლილი კორონული ჯეტების სიკაშკაშის ევოლუცია ერთმანეთის მსგავსია: კაშკაშა წერტილის ინტენსივობაში მუდმივად დაიკვირვება რხევები და შეშფოთებები, ჯეტის გამოფქვევის წინ ინტენსივობა იზრდება, შემდეგ კლებულობს, რასაც მოსდევს ინტენსივობის მკვეთრი ზრდა - მთავარი ამოფრქვევა. მთავარი ამოფრქვევის წინ კაშკაშა წერტილის საშუალო ინტენსოვობის შეშფოთებებს განვიხილავთ როგორც კორონული ჯეტის წინმსწრებ მოვლენას - ე. წ. პრეკურსორს. პრეკურსორი დაფიქსირებული იყო 23-დან 20 შემთხვევაში. ის სისტემატურად დაიკვირვება როგორც ცალკეული ისე რეკურენტული ჯეტების შემთხვევაში და როგორც ჩანს წარმოადგენს კორონული ჯეტის დამახასიათებელ თვისებას. პრეკურსორების შიდა სტრუქტურის ანალიზმა გამოავლინა მათი დროში ევოლუციის კვაზი-რხევითი ხასიათი, საშუალოდ 3 წუთიანი პერიოდულობით. დაიკვირვება უფრო მცირე რხევის პერიოდების მოდულაციაც. სავარაუდოდ, კაშკაშა წერტილის ევოლუციის საყოველთაოდ მიღებულ სცენართან ერთად შესაძლოა აღიძრას განსაზღვრული მაგნიტოჰიდროდინამიკური (MHD) რხევითი და ტალღისმაგვარი მოძრაოზეზი, რასაც სავარაუდოდ მნიშვნელოვანი ადგილი უჭირავს ჯეტების დაკვირვებულ დინამიკაში. აღნიშნულმა კვაზი-რხევითმა ფენომენმა შესაძლოა ითამაშოს დამაკავშირებელი როლი კორონული ჯეტის აღძვრის და ევოლუციის სხვადასხვა ეტაპებს შორის და იყოს MHD ტალღების აღძვრის მიმანიშნებლები.

ბირითადი საბიებო სიტყვები: მზე, მზის კორონა, დიფერენციული ბრუნვა, კორონული ხვრელები, კორონული ჯეტები, კაშკაშა წერტილები.

iii

Abstract

Events occurring in the solar atmosphere have a significant impact on interplanetary space, including the Earth's upper atmosphere and magnetosphere. Their investigation is important for our understanding of the connections between the Sun and heliosphere, also for the monitoring of space weather. We present the results of the investigation of solar Coronal Hole (CH) rotation rates and small scale transient features in CHs - Coronal Jets (CJ). The first goal is to measure CH rotation rates, study their distribution over latitude and their area sizes, and compare their rotation rates to the solar photospheric and inner layer rotational profiles. The second goal is to study CJs that occurred in CHs, investigate the temporal evolution of the jet bright point mean brightness, and evaluate their characteristic properties and parameters.

To study CHs we used data provided by the Spatial Possibilistic Clustering Algorithm (SPoCA-suite), which creates CH data series from SDO/AIA 193 Å channel images. We studied 540 CHs observed within $\pm 60^{\circ}$ latitude and longitude from the solar disc centre during the time span from 01/01/2013 to 20/04/2015. The angular rotation rates are calculated by measuring the displacement of CH geometric centers. The average sidereal rotation rate for examined CHs is 13.86 (± 0.05) °/d. The inhomogeneity is less pronounced than in the case of the photosphere rotation. In the vicinity of the equator the rotation rates of CHs are quantitatively similar to the photospheric rotation values obtained from the helioseismological observations, the CH angular velocities exceed the photospheric angular velocities at latitudes higher than 35–40 degrees. The latitudinal characteristics of CH rotation do not match any known photospheric rotation profile and perfectly coincides with the rotation characteristics of tachocline and the lower layers of convection zone at around 0.71 R_{\odot} ; this indicates that CHs may be linked to the solar global magnetic field, which originates in the tachocline region.

We used data from SDO/AIA 193 Å channel images to study CJs that originated in CHs and near CH boundaries. The brightness evolution is similar for all investigates CJ events: we

systematically observe the oscillations and disturbances in the intensity of jet bright point, the intensity increases before jet outflow, then decreases, followed by the sharp increase that represents the main jet event. We consider such fluctuations of bright point mean intensity as precursors of CJs. The precursor was identified in 20 out of 23 cases. They are systematically observed in the absolute majority of the cases either single or recurrent CJs and apparently, they are a characteristic feature of CJs. The analysis of precursors internal structure revealed an oscillatory-like behavior with characteristic periods approximately 3 minutes. The smaller modulation of the oscillation periods is also observed. We assume that along with the conventionally accepted scenario of bright point evolution certain MHD oscillatory and wavelike motions can be excited and these can take an important place in the observed dynamics of CJs. These quasi-oscillatory phenomena might play the role of links between different epochs of the CJ ignition and evolution.

Key Words: Sun, Solar Corona, Differential Rotation, Coronal Holes, Coronal Jets, Bright Points.

მადლობა

დისერტანტი მადლობას უხდის სადისერტაციო შრომის ხელმძღვანელებს ასოც. პროფესორ ბიძინა შერგელაშვილს და ასოც. პროფესორ დარეჯან ჯაფარიძეს მათ მიერ გაწეული უდიდესი შრომისა და დახმარებისთვის.

დისერტანტი მადლობას უხდის თანამშრომლობისთვის დისერტაციაში გამოყენებული სტატიების თანაავტორებს: ვასილ კუხიანიძეს, სტეფან პუდსს, ბიძინა ჩარგეიშვილს, ალექსანდერ კოსოვიჩევს, თეიმურაზ ზაქარაშვილს, გიორგი რამიშვილს, პატრიკ დე კაუსმაეკერს, მაქსიმ ხოდაჩენკოს.

დიდი მადლობა შოთა რუსთაველის ეროვნულ სამეცნიერო ფონდს, რომლის დაფინანსებითაც განხორციელდა სადოქტორო კვლევის ნაწილი.

სარჩევი

სარჩევი	vii
ცხრილების ჩამონათვალი	ix
ნახაზების ჩამონათვალი	X
აბრევიატურების ჩამონათვალი	xiii
თავი 1. შესავალი	1
1.1. მზე	2
1.1.1. მზის შიდა ნაწილისა და ატმოსფეროს სტრუქტურა	2
1.1.2. მზის დიფერენციული ბრუნვა	4
1.2. მზის კორონული ხვრელები	8
1.2.1. კორონული ხვრელებისა და მზის ქარის კავშირი	11
1.2.2. კორონული ხვრელების ბრუნვის თავისებურებები	12
1.3. მზის კორონული ჯეტები	13
1.3.1. კორონული ჯეტების კლასიფიკაცია; ფორმირებისა და ევოლუციის	
მოდელები	17
1.3.2. კორონული ჯეტების კავშირი სხვა კორონულ წარმონაქმნებთან	19
1.4. კვლევის მოტივაცია, მიზნები და ნაშრომის მოკლე აღწერა	20
თავი 2. კოსმოსური სადამკვირვებლო მისიების მონაცემები და მათი	
დამუშავების მეთოდები	24
2.1. მზის დინამიკის ობსერავატორია	26
2.2. დაკვირვებითი მონაცემების მიღების და დამუშავების პროგრამული	
ინსტრუმენტები	30

2.3. კორონული ხვრელების ბრუნვის მახასიათებლების შესწავლის მეთოდი3	1
2.3.1. კორონული ხვრელების იდენტიფიკაცია; "სივრცითი ალბათობრივი	
კლასტერიზაციის ალგორითმი" (SPoCA-suite)31	1
2.3.2. კორონული ხვრელების კატალოგი34	4
2.3.3. კორონული ხვრელების ბრუნვის კუთხური სიჩქარის გამოთვლის მეთოდი35	5
2.4. კორონული ჯეტებისა და მათთან დაკავშირებული კაშკაშა წერტილების	
შესწავლის მეთოდი30	6
2.4.1. კორონული ჯეტების იდენტიფიკაცია30	6
2.4.2. მონაცემების დამუშავების და ანალიზის მეთოდები	8
2.4.3. კაშკაშა წერტილის ინტენსივობის ევოლუციის შესწავლის მეთოდი39	9
თავი 3. კორონული ხვრელების ბრუნვის სტატისტიკური მახასიათებლები4	1
3.1. კორონული ხვრელების განაწილება განედის და ფართობების მიხედვით42	1
3.2. სხვადასხვა ფართობის მქონე კორონული ხვრელების ბრუნვის პროფილები45	5
3.3. კორონული ხვრელების ბრუნვის პარამეტრების შედარება მზის სხვადასხვა	
ფენების ბრუნვის პროფილებთან48	8
თავი 4. კორონული ხვრელებში წარმოქმნილი ჯეტების პარამეტრები და ევოლუცია5	1
4.1. კორონული ჯეტების პრეკურსორები5	1
4.2. კვაზი-პერიოდული რხევები კორონული ჯეტების პრეკურსორებში60	0
4.3. კორონული ჯეტებისა და მათი პრეკურსორების პარამეტრები	2
თავი 5. დისკუსია და ინტერპრეტაცია60	6
5.1. კორონული ხვრელების დინამიკის კვლევის შედეგების განხილვა60	6
5.2. კორონული ჯეტების დინამიკის კვლევის შედეგების განხილვა69	9
თავი 6. დასკვნა და სამომავლო განვითარება72	2
ბიბლიოგრაფია70	6

ცხრილების ჩამონათვალი

ცხრილი	1:	А,	В	და	С	კოეფი	იციენ	ტების	მნი	აშვნე	ლობ	ები	კორ	ონუ	ული	ხვ	რელ	ეზის
სიდერუღ	ლი შ	არუ	ნვი	სათ	ვის			•••••							•••••	•••••	•••••	47
ცხრილი :	2: კი	ურო	ანუ	ლივ	XIC	ეებისა	და მა	თი პრ	თეკუ(რსორ	ნების	პარ	ამეტ	რებ	0	•••••	•••••	59
ცხრილი	3: კ	ორო	ინუ	ლი	XI	<u>უე</u> ბის	და მა	თი პრ	;ეკუ(რსორ	ნების	პარ	ამეტ	რებ	ის მ	აქსი	ამალ	ური
ალბათობ	ები	ç	და	საშ	შუა	ლო	96	იშვნედ	ლობე	ეზი	შესა	ბამი	სი	QC	ისპერ	აიძი	ითა	და
ცდომილ	ებეն	ბით							•••••		•••••		•••••				•••••	64

ნახაზების ჩამონათვალი

ნახაზი 1.1. მზის სტრუქტურა, მისი სხვადასხვა რეგიონების ზომები, ტემპერატურა და
სიმკვრივე
ნახაზი 1.2. სხვადასხვა მეთოდით მიღებული ფოტოსფეროს ბრუნვის პროფილები6
ნახაზი 1.3. მზის შიდა ფენების ბრუნვის პროფილები 0°, 30° და 60° განედებზე6
ნახაზი 1.4. მზის კორონული ხვრელები8
ნახაზი 1.5. პოლარული კორონული ხვრელების მაგნიტური ველის სტრუქტურა9
ნახაზი 1.6. კორონული ხვრელებიდან მომდინარე მზის ქარი11
ნახაზი 1.7. მზის კორონული ჯეტი14
ნახაზი 1.8. მაგნიტური გადაერთების შედეგად კორონული ჯეტის ამოფრქვევის სქემატური მოდელი
ნახაზი 2.1. მზის დაკვირვებისათვის განკუთვნილი დასრულებული, მოქმედი და მომავალი მთავარი კოსმოსური მისიები25
ნახაზი 2.2. SOHO-ს, STEREO-ს და SDO-ს მიერ დაკვირვებული მზის დისკოს EUV
გამონასახების შედარება26
ნახაზი 2.3. SDO/HMI-სა და SDO/AIA-ს გამონასახები29
ნახაზი 2.4. კორონის გამონასახი კორონული ხვრელების იდენტიფიკაციამდე; კორონის
გამონასახი SPoCa-suite გამოყენებით დაფიქსირებული კორონული ხვრელებით33
ნახაზი 2.5. კორონული ხვრელების კატალოგი34
ნახაზი 2.6. კაშკაშა წერტილის გამონასახების მიმდევრობა ჯეტის ამოფრქვევამდე და
ამოფრქვევის პროცესში (CJ1)39

ნახაზი 2.7. კაშკაშა წერტილისა და კორონული ჯეტის ინტენსივობის ევოლუცია დროში
(CJ5, CJ6)40
ნახაზი 3.1. კორონული ხვრელების განაწილება განედების და ფართობების მიხედვით
2013-2015 წლებში42
ნახაზი 3.2. კორონული ხვრელების განაწილება ფართობთა ცალკეული ჯგუფების
მიხედვით 2013-2015 წლებში43
ნახაზი 3.3. შერჩეული 540 კორონული ხვრელის განაწილება განედის და ფართობის
მიხევით
ნანაზი 3.4. შესწავლილი კოროხული ხვრელების განაწილება განედური ზონების
მიხედვით44
ნახაზი 3.5. კორონული ხვრელების სიდერული ბრუნვის სიჩქარეები 3.75° სიგანის 32
განედური ზონისათვის, და მათი შესაბამისი მორგებული მრუდები ორივე
ნახევარსფეროსათვის ცალცალკე46
ნახაზი 3.6. მზის შიდა ფენებისა და კორონული ხვრელების ბრუნვის კუთხური
სიჩქარეების შედარება
ნანაზი 3.7. კავნიოი კოოოსულ ხვოელებსა და მზის მიდა ფენებს მოოის
ნახაზი 4.1. ერთჯერადი კორონული ჯეტის ინტენსივობის მრუდები (CJ1)52
ნახაზი 4.2. CJ1-ის ევოლუცია - SDO/AIA 193 Å და SDO/HMI ფოტოსფერული
მაგნიტოგრამების კომბინაცია54
F_{1}
0305 06 4.5. 0035@30035 @3@@00 068@0000 წარ0ო@8ე06ლი კათკათა წერტილის 060906
.XJQ00 20030J3J300 2004GJ000 (C)1)
ნახაზი 4.4. რეკურენტული კორონული ჯეტების ინტენსივობის მრუდები (CJ2/CJ3/CJ4)
ნახაზი 4.5. კორონული ჯეტი CJ16-ის ინტენსივობის მრუდები - მთავარი ამოფრქვევის
წინ მნიშვნელოვნად გამოხატული შეშფოთებების გარეშე58

ნახაზი 4.6. კ	ორონული ჯეტები	ს პრ	რეკურ	სორების FF	T პერიოდოგრა	მები	61
ნახაზი 4.7.	პრეკურსორებისა	და	მათი	შესაბამისი	პარამეტრების	მოხდენის	სიხშირის

ნახაზი 5.1. მზის სხვადასხვა ფენების სიდერული ბრუნვის პროფილების შედარება67

ნახაზი 5.2. კორონული ჯეტის წარმოქმნის სცენარი Sterling et al. (2015)-ის მიხედვით ..71

აბრევიატურების ჩამონათვალი

- AIA Atmospheric Imaging Assembly (ატმოსფერული გამონასახების მიმღები ნაკრები)
- CH- Coronal Hole (კორონული ხვრელი)
- CIR Co-rotating Interactive Region (თანაბრუნვადი ურთიერთმოქმედი რეგიონი)
- CJ Coronal Jet (კორონული ჯეტი)

CME - Coronal Mass Ejection (კორონალური მასის ამოფრქვევა)

EDS - Event Detection System (მოვლენათა დეტექტირების სისტემა)

ESA - European Space Agency (ევროპის კოსმოსური სააგენტო)

EUV - Extreme Ultraviolet (უკიდურესი ულტრაიისფერი)

EVE - Extreme Ultraviolet Variablity Experiment (უკიდურესი ულტრაიისფერი ცვალებადობის ექსპერიმენტი)

FFT- Fast Fourier Transform (სწრაფი ფურიე გარდაქმნა)

FITS - Flexible Image Transport System (გამოსახულების გადაცემის მოქნილი სისტემა)

HCR - Heliophysics Coverage Registry (ჰელიოფიზიკური დაფარვის რეესტრი)

HEK - Heliophysics Events Knowledgebase (ჰელიოფიზიკურ მოვლენათა ცოდნის ბაზა)

HER - Heliophysics Events Registry (ჰელიოფიზიკური მოვლენების რეესტრი)

Hinode/XRT – Hinode/ The X-Ray Telescope (ჰინოდე/რენტგენული ტელესოპი)

HMI - Helioseismic and Magnetic Imager (ჰელიოსეისმური და მაგნიტური გამონასახების მიმღები)

IDL - Interactive Data Language (ინტერაქტიულ მონაცემთა ენა)

IRIS - Interface Region Imaging Spectrograph (რეგიონალური საზღვრების გამონასახების მიმღები სპექტროგრაფი)

LWS -Living with a star (ვარსკვლავთან ერთად ცხოვრება)

MHD – Magnitohydrodynamics (მაგნიტოჰიდროდინამიკა)

NASA - National Aeronautics and Space Administration (აერონავტიკის და კოსმოსური სივრცის კვლევის ეროვნული სამმართველო)

NRL - Naval Research Laboratory (საზღვაო კვლევის ლაბორატორია)

PROBA2/SWAP - Project for On-Board Autonomy 2 / Sun Watcher using Active Pixel System detector and Image Processing (პროექტი კოსმოსური ასტრონომიისთვის 2/მზის დამკვირვებელი, რომელიც იყენებს აქტიური პიქსელების სისტემის დეტექტორსა და გამონასახების დამუშავებას)

SDO - Solar Dynamic Observatory (მზის დინამიკის ობსერვატორია)

SOHO - Solar and Heliospheric Observatory (მზის და ჰელიოსფერული ობსერვატორია)

EIT - Extreme ultraviolet Imaging Telescope (უკიდურესი ულტრაიისფერი გამონასახების მიმღები ტელესკოპი)

SOLSPANET - Solar and Space Weather Network of Excellence (მზის და კოსმოსური ამინდის კვლევის ქსელი)

SPoCA - Spatial Possibilistic Clustering Algorithm (სივრცითი ალბათობრივი კლასტერიზაციის ალგორითმი)

SSW – SolarSoftWare (მზის პროგრამული უზრუნველყოფა)

STEREO - Solar Terrestrial Relations Observatory (მზე-დადამიწის კავშირების ობსერვატორია)

EUVI - Extreme Ultraviolet Imager (უკიდურესი ულტრაიისფერი გამონასახების მიმღები)

SECCHI - Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (მზე-დედამიწის კავშირების კორონული და ჰელიოსფერული კვლევა)

SXR – Soft X-Ray (რბილი რენტგენული)

UV – Ultraviolet (ულტრაიისფერი)

WL – White Light (თეთრი სინათლე)

ა.ე. - ასტრონომიული ერთეული

მზე საუკუნეების განმავლობაში წარმოადგენდა დიდი აღტაცების და ინტერესის ობიექტს, რაც აისახებოდა სხვადასხვა კულტურებში. ათასწლეულებს ითვლის მისი მეცნიერული შესწავლის ისტორიაც. მზე წარმოადგენს პლაზმის უზარმაზარ სფეროს, რომლის ენერგიის წყარო თერმობირთვული რეაქციებია. ის ჩვენი უახლოესი ვარსკვლავია და მის მიერ გამოსხივებული სითბო და სინათლე გადამწყვეტ როლს ასრულებს დედამიწაზე ცოცხალი სამყაროს არსებობისთვის. მზის აქტივობის ისეთი გამოვლინებები, როგორიცაა ანთებები, კორონული მასის ამოფრქვევები (Coronal Mass Ejection - CME), მზის ქარი და სხვა მოვლენები მნიშვნელოვან ზეგავლენას ახდენს დედამიწის მაგნიტოსფეროსა და ატმოსფეროზე, რაც მზის შესწავლას განსაკუთრებით აქტუალურს ხდის.

ბოლო ათწლეულების განმავლობაში მნიშვნელოვნად გაიზარდა როგორც დედამიწიდან ისე გარეატმოსფერული ობსერვატორიებიდან მიღებული მონაცემების რაოდენობა და ხარისხი, რამაც ხელი შეუწყო დაკვირვებითი და თეორიული კვლევების სწრაფ განვითარებას. შედეგად მზის მკვლევარებს საშუალება მიეცათ დეტალურად აღეწერათ და აეხსნათ მზეზე მიმდინარე მრავალი მოვლენა და პროცესი, რაც მოიცავს, როგორც მზის აქტივობის გლობალურ გამოვლინებებს, ისე მცირე მასშტაბის ტრანზიენტულ მოვლენებს. ფართომასშტაბიანი კვლევების მიუხედავად ჯერ კიდევ მრავალი მნიშვნელოვანი კითხვა რჩება პასუხგაუცემელი, მათ შორისაა: რა განაპირობებს მზის აქტივობის ციკლურობას, როგორ ცხელდება ქრომოსფერო და კორონა, როგორია მზის ამოფრქვევების მექანიზმები, როგორ ხდება მზის ქარის აჩქარება და სხვა. აღნიშნული საკითხების გადაჭრა ფართო და მრავალმხრივ თეორიულ და დაკვირვებით კვლევებს საჭიროებს.

1.1. მზე

მზე დაახლოებით 4.7 მილიარდი წლის წინ ჩამოყალიბდა. ის დედამიწიდან საშუალოდ 149 600 000 კმ-თია დაშორებული (1 ასტრონომიული ერთეული - ა.ე.). მზე შედგება ~75% წყალბადის, ~24% ჰელიუმის და მცირე რაოდენობით შედარებით მძიმე ელემენტებისაგან (ნახშირბადი, ჟანგბადი, ნეონი, რკინა და სხვა). მისი ზედაპირის ტემპერატურა ~5778 K-ია. დიამეტრი 109-ჯერ (1.392*10⁶ კმ) აღემატება დედამიწის დიამეტრს, ხოლო მასა 333000-ჯერ (1.989*10³⁰) აღემატება დედამიწის მასას.

1.1.1. მზის შიდა ნაწილისა და ატმოსფეროს სტრუქტურა

მზის შიდა ნაწილი შედგება ბირთვის, რადიაციული და კონვექციურ ზონებისგან. მზის ხილული ზედაპირია ფოტოსფერო. ფოტოსფეროდან იწყება მზის ატმოსფერო, რომელიც მოიცავს ქრომოსფეროს, გარდამავალ ზონასა და კორონას (ნახ. 1.1.). თითოეულ შრეში განსხვავებული ფიზიკური პროცესები მიმდინარეობს.

ბირთვი მდებარეობს 0.25 R_{\odot} -მდე, მისი ტემპერატურა 15 მლნ K-ს აღწევს, სიმკვრივე კი 1.6*10⁵ კგ მ⁻³-ია. ასეთი ექსტრემალური პირობები უზრუნველყოფს თერმობირთვული რეაქციების მიმდინარეობას, რაც მზის ენერგიის წყაროა. ბირთვის შემდეგ იწყება რადიაციული ზონა, სადაც ენერგიის გადატანის მირითადი საშუალება ელექტრომაგნიტური ტალღების ენერგიის ნაწილაკების მიერ შთანთქმა და შემდგომ მათი ხელახალი გამოსხივებაა. კონვექციური ზონა დაახლოებით 0.7-დან 1 R_{\odot} -მდე მდებარეობს. აღნიშნულ რეგიონში ადგილი აქვს ტურბულენტურ კონვექციურ მომრაობას, შესაბამისად ენერგიის გადატანა კონვექციის საშუალებით ხდება. კონვექციური ზონის ქვედა საზღვართან მდებარეობს მლიერი წანაცვლებითი შრე ტახოკლინი, სადაც დინამო თეორიის მიხედვით სავარაუდოდ მზის მსხილმასშტაბოვანი მაგნიტური ველი წარმოიქმნება.



ნახაზი 1.1. მზის სტრუქტურა, მისი სხვადასხვა რეგიონების ზომები, ტემპერატურა (K) და სიმკვრივე (კგ მ⁻³). სხვადასხვა შრეების სისქე მასშტაბით არაა მოცემული. დაშტრიხული რეგიონით აღნიშნულია ცვალებადი საზღვარი ქრომოსფეროსა და კორონას შორის (Priest, 2014).

ფოტოსფერო წარმოადგენს რამდენიმე ასეული კმ სისქის რეგიონს, საიდანაც მზის ხილული სინათლის უდიდესი ნაწილი გამოსხივდება. ფოტოსფეროში პერიოდულად დაიკვირვება მზის ლაქები, რომლებიც წარმოადგენენ გარემომცველ რეგიონებთან შედარებით ნაკლები ტემპერატურის მქონე ბნელ უბნებს, რაც განპირობებულია ძლიერი მაგნიტური ველის არსებობით. მზის მაგნიტურ აქტივობას ახასიათებს 11 წლიანი პერიოდულობა, რასაც მზის ლაქათა ციკლი ან მზის აქტივობის ციკლი ეწოდება (Hathaway, 2015). ეს ცვლილებები გავლენას დედამიწის კლიმატზეც ახდენს. მზის მაქსიმუმის პერიოდში შესამჩნევად იმატებს მზის ანთებები და კორონალური მასის ამოფრქვევები, რაც თავის მხრივ გავლენას ახდენს დედამიწის გარე ატმოსფეროსა და მაგნიტოსფეროზე (Haigh, 2007). ფოტოსფეროს ზემოთ მდებარეობს შედარებით გაიშვიათებული და გამჭვირვალე ქრომოსფერო. ის ფოტოსფეროდან დაახლოებით 2000 კმ სიმაღლემდე ვრცელდება. ქრომოსფეროსა და კორონაში დაიკვირვება სხვადასხვა ფართო მასშტაბის დინებები, არაერთგაროვნებები და ტალღური მომრაობები. ქრომოსფეროსა და კორონას შორის მდებარეობს გარდამავალი რეგიონი, რომელიც წარმოადგენს თხელ დაახლოებით 100 კმ სისქის შრეს და მირითადად უკიდურეს ულტრაიისფერ (Extreme Ultraviolet - EUV) ემისიურ ხაზებში დაიკვირვება.

გარდამავალი რეგიონის შემდეგ იწყება კორონა. მზის ატმოსფეროს კორონა შელიარაღებელი თვალით დაიკვირვება მზის დაბნელების დროს. მისი გამონასახების მიღება შესაძლებელია გარეატმოსფერულ თანამგზავრებზე განთავსებული ინსტრუმენტებიდან რენტგენულ და EUV დიაპაზონში. მიღებული გამონასახებიდან გამოიყოფა კორონის სამი ტიპის არე: კორონული ხვრელები, აქტიური არეები (კაშკაშა კორონული მაგნიტური მარყუჟები) და წყნარი კორონა. მთელ კორონაშია გაბნეული პატარა ინტენსიური წარმონაქმნები - კაშკაშა წერტილები.

სიმაღლის ზრდასთან ერთად მზის ატმოსფეროში ნაწილაკების სიმკვრივე საკმაოდ სწრაფად ეცემა (ფოტოსფეროში 10^{23} მ⁻³ - დან, ქრომოსფერო და გარდამავალი რეგიონი - 10^{12} მ⁻³, 1 R_{\odot} - 10^7 მ⁻³, 1 ა.ე. - 10^6 მ⁻³). თავდაპირველად მიიჩნევდნენ, რომ სიმაღლის ზრდასთან ერთად ტემპერატურაც უნდა შემცირებულიყო. თუმცა კვლევების მიხედვით ფოტოსფეროს ქვედა ნაწილში ტემპერატურა 6600 K-ია, დაახლოებით 500 კმ სიმაღლეზე ის 4300 K-მდე ეცემა, რის შემდეგაც ნელნელა იმატებს ქვედა ქრომოსფეროში 25 000 K-მდე და საკმაოდ თხელ გარდამავალ რეგიონში მკვეთრად იზრდება რამდენიმე მილიონ K-მდე (Priest, 2014).

1.1.2. მზის დიფერენციული ბრუნვა

მზე საკუთარი ღერძის გარშემო არ ბრუნავს მყარტანოვნად. მისი ბრუნვა დიფერენციული ხასიათისაა და ცვალებადია როგორც განედის ისე სიღრმის მიხედვით.

მზის ატმოსფეროს და მისი შიდა ნაწილის სხვადასხვა ფენების ბრუნვის მახასიათებლების შესწავლას დიდი მნიშვნელობა აქვს მზის აქტივობის და მზედედამიწის კავშირების ასახსნელად.

მზის ბრუნვის შესწავლა მე-17 საუკუნეში მზის ლაქების აღმოჩენასთან ერთად დაიწყო. ამ მიმართულებით მწიშვნელოვანი აღმოჩენები დაიწყო 1850 წლიდან, როდესაც რიჩარდ კრისტოფერ კერინგტონმა მზის ლაქების მოძრაობაზე დაკვირვებების შედეგად დაადგინა, რომ ბრუნვის სიჩქარე განსხვავდება განედის მიხედვით (Carrington, 1858). მას შემდეგ, მზის სხვადასხვა ფენების (ფოტოსფერო, ქრომოსფერო, კორონა, ფოტოსფეროსქვედა ფენები) ბრუნვის მახასიათებლები მრავალი ავტორის მიერაა შესწავლილი სხვადასხვა მეთოდებით. კერძოდ, მზის ლაქების, დოპლერის წანაცვლების, წარმონაქმნების სიჩქარის გაზმოვით, ასევე ჰელიოსეიმოლოგიური მაგნიტური მეთოდებით (Snodgrass & Ulrich, 1990; Schou et al. 1998; Badalyan & Sýkora, 2005). ფოტოსფეროს ბრუნვის მახასიათებლების შესწავლისას სხვადასხვა მეთოდებით მიღებული შედეგები ერთმანეთისგან განსხვავდება, რაც ჩანს ნახ. 1.2-ზე. ბრუნვის მახასიათებლები იცვლება აქტივობის 11 წლიანი ციკლის მიხედვითაც (Clark et al. 1979).

ფოტოსფეროს ბრუნვის სიჩქარე აღიწერება ფაის (H. Faye) ფორმულით: $\omega = A + B \sin^2(\varphi) + C \sin^4(\varphi)$, სადაც ω კუთხური სიჩქარეა °/დღე-ში, φ - განედია, ხოლო A, B და C კოეფიციენტების მნიშვნელობა დამოკიდებულია გაზომვის ტექნიკაზე და მზის ციკლის ფაზაზე. ფოტოსფეროს ბრუნვის სიდერული პერიოდი ეკვატორთან დაახლოებით 24.47 დღეა, 26° განედთან - 25.38 დღე, პოლუსებზე კი დაახლოებით 31 დღე (Priest, 2014).

ჰელიოსეისმოლოგიის განვითარებამ მეცნიერებს შესაძლებლობა მისცა განესაზღვრათ მზის შიდა ფენების ბრუნვაც (Howe, 2009). ჰელიოსეისმოლოგიური მეთოდებით დადგინდა, რომ კონვექციური ზონა ბრუნავს დიფერენციულად, ხოლო ტახოკლინის ქვმოთ მდებარე რადიაციული ზონა მყარტანოვნად (ნახ. 1.3; Schou et al. 1998). ტახოკლინში არსებობს ძალიან ძლიერი წანაცვლებითი შრე. ვარაუდობენ რომ



ნახაზი 1.2. სხვადასხვა მეთოდით მიღებული ფოტოსფეროს ბრუნვის პროფილები (A. Kosovichev, Stanford Lecture Courses: Solar and Solar-Terrestrial Physics).



ნახაზი 1.3. მზის შიდა ფენების ბრუნვის პროფილები 0°, 30° და 60° განედებზე (A. Kosovichev, Stanford Lecture courses: Solar and Solar-Terrestrial Physics).

სწორედ ამ ადგილას უნდა ხდებოდეს მზის გლობალური მაგნიტური ველის წარმოქმნა. ამიტომ ტახოკლინის ზუსტი მახასიათებლების დადგენა ერთერთი მთავარი გამოწვევაა.

მიუხედავად დაკვირვების მეთოდების გაუმჯობესებისა, მზის კორონის ბრუნვის კვლევის შედეგები საკმაოდ არაერთგავროვანია და საბოლოო დასკვნების გაკეთება რთულია. კორონის დიფერენციული ბრუნვის შესაფასებლად ტრასერებად იყენებენ კორონულ კაშკაშა წერტილებს (Hara, 2009; Brajša et al, 2014; Wöhl et al., 2010; Chandra et al. 2010; Kariyappa 2008; Karachik et al. 2006), კორონულ ხვრელებს (Obridko & Shelting, 1988; Shelke & Pande, 1985; Navarro-Peralta & Sanchez-Ibarra, 1994; Insley et al., 1995; Japaridze et al., 2015) და სხვა კორონულ წარმონაქმნებს.

Hara (2009), Karachik et al. (2006), Wöhl et al. (2010) მიხედვით კორონის დიფერენციულ ბრუნვის ხასიათი ფოტოსფეროს მსგავსია. დიფერენციულ ბრუნვაზე მიანიშნებს Chandra et al. (2010) SXR გამონასახების შესწავლის შედეგებიც: ეკვატორულ არეში კორონა ფოტოსფეროს და ქრომოსოფეროს მსგავსად ბრუნავს; ბრუნვის პროფილი ცვალებადია დაკვირვების პერიოდის განმავლობაში და ამჟღავნებს მზის აქტივობის ციკლზე დამოკიდებულებას. Kariyappa (2008) რენტგენული კაშკაშა წერტილების შესწავლისას მსგავს დასკვნებამდე მივიდა, იმ განხვავებით, რომ მისი შედეგები არ უჩვენებდა ცვალებადობებს მზის ციკლის ფაზის მიხედვით. კორონულ მწვანე ხაზში (Fe XIV 530.3 nm) კორონის ბრუნვის შესწავლისას მიღებული შედეგების მიხედვით, მზის კორონის ზრუნვის სინოდური პერიოდი ეკვატორზე 27 დღეა და $\pm 40^\circ$ განედებზე იზრდება 29 დღემდე და დიფერენციული ბრუნვა ფოტოსფეროსთან შედარებით ნაკლებადაა გამოხატული; ±45° ზემოთ დიფერენციულობა მკვეთრად მცირდება და ბრუნვა პოლუსებამდე მყარტანოვან ხასიათს ატარებს (29.5 დღე) (Badalyan & Sýkora, 2005). O VI 1032 Å სპექრტულ ხაზში სინოპტიკური დაკვირვებები აჩვენებს, რომ კორონული მაგნიტური სტრუქტურები ბრუნავენ ნაკლებ დიფერენციულად და მეტად სწრაფად ვიდრე მზის ატმოსფეროს უფრო ქვედა ფენები, ეს მახასიათებელი განსაკუთრებით შესამBნევია 40° განედს ზემოთ (Mancuso & Giordano, 2011). 17 GHz რადიო გამონასახების შესწავლის შედეგები აჩვენებს, რომ კორონა ნაკლებად დიფერენციულად ბრუნავს ვიდრე ფოტოსფერო და ქრომოსფერო (Chandra et al. 2009).

1.2. მზის კორონული ხვრელები

მზის კორონული ხვრელები (Coronal Hole - CH) წარმოადგენს კორონის ყველაზე მუქ, ცივ და დაბალი სიმკვრივის მქონე რეგიონებს (ნახ. 1.4). ისინი პირველად იდენტიფიცირებული იყო 1956 წელს ვალდმაიერის მიერ. ვალდმაიერმა კორონული ხვრელები უწოდა მზის კიდის ზემოთ მწვანე 5303 Å ემისიურ ხაზში ხანგრძლივად არსებულ ძალიან დაბალი ინტენსივობის რეგიონებს (Waldmeier, 1975).



ნახაზი 1.4. მზის კორონული ხვრელები

კორონული ხვრელები ხელახლა აღმოჩენილი იქნა 1960-იანი წლების ბოლოს და 1970-იანი წლების დასაწყისში მზის კორონის ულტრაიისფერ (Ultraviolent - UV) და რენტგენულ გამონასახებზე მუქი წამონაქმნების სახით. Tousey et al. (1968) 1963-1967 წლებში მზის აქტივობის მინიმუმში მოპოვებულ გამონასახებზე დაყრდნობით დაადგინა, რატომ იყო UV გამოსხივება ნაკლები პოლუსების თავზე. მზის დისკოს ამ რეგიონებს, კიდეზე დაკვირვებული რეგიონების მსგავსად, უწოდეს კორონული ხვრელები. 1973-74 წლებში ჩრდილოეთ და სამხრეთ პოლარულ კორონულ ხვრელებთან ერთად კორონული ხვრელები დაკვირვებული იყო დაბალ განედებზეც.



ნახაზი 1.5. პოლარული კორონული ხვრელების მაგნიტური ველის სტრუქტურა. (a) მაგნიტური ნაკადის მილები გრანულათაშორის ზოლებში, (b) ორმოები დაკავშირებული სუპერგრანულების ქსელის ზოლებთან, (c) - გაფართოებული კორონა (Cranmer, 2009).

კორონული ხვრელები წარმოადგენენ ღია მაგნიტური ველის მქონე სტრუქტურებს (Munro & Withbroe 1972, Altschuler et al 1972), ისინი მდებარეობენ ფოტოსფეროს დიდი უნიპოლარული რეგიონების თავზე (ნახ. 1.5). მზის დაბნელების დროს ან კორონოგრაფით დაკვირვებისას ვხედავთ, რომ მუქი კორონული ხვრელები შემოსაზღვრულია კაშკაშა სტრიმერებით. სტრიმერები წარმოადგენენ ჩაკეტილი ძალწირების მქონე მასშტაბურ თაღის მსგავს რეგიონებს, რომელებიც ძირითადად აქტიური არეების თავზე ყალიბდება (Wang et al., 2000, Wang & Sheeley Jr, 2006; Wang et al., 2007). კორონულ ხვრელებში სიმკვრივე სტრიმერების სიმკვრივეზე ათჯერ ნაკლებია. დაბალი სიმკვრივის გამო კორონული ხვრელები შედგება დაუჯახებადი პლაზმისგან. იონიზებული ატომები და ელექტრონები თავისუფლად მიედინებიან მაგნიტური ველის ძალწირების გასწვრივ და აყალიბებენ მზის ქარის სწრაფ კომპონენტს (Krieger et al. 1973). კორონულ ხვრელებში გარემომცველ რეგიონებთან შედარებით ნაკლებია ტემპერატურაც (Priest 2014).

კორონული ხვრელები არიან მზის ყველაზე მუქი და ნაკლებად აქტიური არეები. ისინი კორონის დანარჩენი ნაწილისგან გამოირჩევა ნაკლები გამოსხივებით ელექტრომაგნიტური სპექტრის UV და რენტგენულ უბანში (ნახ. 1.4). მზის ქვედა ატმოსფეროში კორონული ხვრელების იდენტიფიკაცია ძნელია. $10^5 K$ ტემპერატურამდე ჩვეულებრივ შეუძლებელია ინტენსოვობის რაიმე განსხვავების შემჩნევა ხვრელსა და მის მიმდებარე რეგიონებს შორის. ისინი გაცილებით უკეთ დაიკვირვება კორონალურ და გარდამავალი რეგიონის ხაზების შესაბამის სიმაღლეებზე. საზღვარი კორონულ ხვრელსა და გარემომცველ გარემოს შორის შესაბლოა იყოს როგორც მკვეთრი, ასევე გაბნეული, ზოგჯერ გვხვდება მრავალი მცირე ზომის მარყუჟიც (Hudson, 2002).

კორონული ხვრელების მრავალი მახასიათებელი - სიჩქარე, ჰელიოგრაფიული მდებარეობა, რაოდენობა, ზომა, მორფოლოგია და პლაზმის პარამეტრები დამოკიდებული მზის აქტივობაზე (Miralles et al., 2001, 2002, 2006). დაბალი აქტივობის დროს მზის ჩრდილოეთ და სამხრეთ პოლარულ არეებს ფარავს დიდი ზომის კორონული ხვრელები. ციკლის შედარებით აქტიურ პერიოდში კორონული ხვრელები ფაქტიურად ყველა განედზე დაიკვირვება, თუმცა ისინი მხოლოდ რამდენიმე მზის შემობრუნების განმავლობაში არსებობენ. ახლახანს გამოკვლეული იქნა კორონული ხვრელების ცალკეული შემთხვევები და დადგინდა მათი ევოლუციის სამი ძირითადი ეტაპის (ზრდის, მაქსიმუმის და მილევის) არსებობა (Heinemann et al., 2018a,b)

კორონული ხვრელები ღრმად უნდა იყვნენ ჩამაგრებული მზის წიაღში. მათი ევოლუცია კონტროლდება არა მზის ზედაპირზე არსებული წარმონაქმნებისა და აქტივობების, არამედ უფრო ღრმად კონვექციურ ზონაში მიმდინარე პროცესების მიერ (Gilman, 1977). კორონული ხვრელების განაწილება მსხვილმასშტაბოვანი ბუნებისაა და დაკავშირებულია მზის გლობალურ მაგნიტურ ველთან, რის გამოც მათ ხშირად

განიხილავენ მზის კორონის მსხვილმასშტაბოვანი მაგნიტური ველის ინდიკატორებად (Harvey & Sheeley, 1987; Obridko & Shelting, 1989; Bumba et al., 1995, Bilenko & Tavastsherna, 2016).

1.2.1. კორონული ხვრელებისა და მზის ქარის კავშირი

მზის შიდა ნაწილსა და ატმოსფეროსთან დაკავშირებული მნიშვნელოვანი მაჩვენებელია მზის ქარი. მზის ქარი წარმოადგენს პლაზმის ნაკადს, რომელიც მოედინება მზიდან საპლანეტაშორისო სივრცეში. ის შედგება ორი კომპონენტისგან - მზის სწრაფი ქარისგან, რომელიც საპლანეტაშორისო სივრცეში დაახლოებით 700 კმ/წმ სიჩქარით ვრცელდება და ნელი ქარისგან, რომლის სიჩქარე შედარებით ნაკლებია და დაახლოებით 400 კმ/წმ-ს შეადგენს.



ნახაზი 1.6. კორონული ხვრელებიდან მომდინარე მზის ქარი (წყარო: <u>SPACEWEATHER</u>).

კვაზიმდგრადი სწრაფი მზის ქარი წარმოიქმება კორონულ ხვრელებში (ნახ. 1.6.; Wang & Sheeley Jr, 2006; Wang et al., 2007). მზის ნელი ქარის კორონული წყაროები ქაოსურია (Schwenn, 2006). ყველაზე ხშირად მიიჩნევენ, რომ მზის ნელი ქარის წყაროს წარმოადგენს კორონულ ხვრელებსა და სტრიმერებს შორის საზღვრები, ან პლაზმის დენური ნაკადური შრე, რომელიც ფართოვდება კორონაში სტრიმერების მახვილი წვეროების ზემოთ (Wang et al., 2000). მზის ციკლის შედარებით აქტიურ ფაზაში ნელი მზის ქარის ნაკადი ასევე მოედინება მცირე კორონული ხვრელებიდან (Nolte et al., 1976; Zhang et al., 2003) და აქტიური რეგიონებიდან (Hick et al., 1995; Sakao et al., 2007).

მზის აქტივობის მინიმუმში დიდი კორონული ხვრელები უმთავრესად კონცენტრირებულია პოლუსებზე და მაღალ განედებზე, ხოლო სტრიმერების სარტყელი და ჰელიოსფეროს დენური შრე განლაგებულია ეკვატორთან. ამ პერიოდში პოლუსებიდან ვრცელდება მზის ქარის სწრაფი კომპონენტი, ხოლო დაბალ განედებზე და ეკვატორთან მზის ნელი ქარი გვხვდება. მზის აქტივობის მაქსიმუმის დროს მზის ატმოსფეროში მრავლად ჩნდება შედარებით მცირე ზომის კორონული ხვრელები და სტრიმერები და ქრება მზის ქარის სწრაფი და ნელი კომპონენტების მკაცრი დაყოფა. შედეგად ვიღებთ სწრაფი ქარის, წელი ქარის და თანაბრუნვადი ურთიერთმოქმედი რეგიონების (Corotating Interactive Region – CIR) მეტნაკლებად ერთგვაროვან ნარევს როგორც განედის ისე გრმედის მიხედვით. მიუხედავად იმისა, რომ მზის ქარის სწრაფი და ნელი კომპონენტების წარმოშობის წყაროები და აჩქარების მექანიზმები სრულად არ არის შესწავლილი, დიდ კორონულ ხვრელებსა და მაღალი სიჩქარის მქონე მზის ქარის ნაკადებს შორი მიზეზ-შედეგობრივი კავშირი მტკიცედაა დადასტურებული.

1.2.2. კორონული ხვრელების ბრუნვის თავისებურებები

მზის ბრუნვის მახასიათებელი სხვადასხვა ტიპის ტრასერებს შორის ერთ-ერთია კორონული ხვრელებიც. მათი ბრუნვის შესწავლის პირველი შედეგები მყარტანოვან ბრუნვაზე მიანიშნებდა (Wagner, 1975; Bohlin, 1977; Hiremath & Hegde, 2013; Japaridze et al., 2015). თუმცა, მრავალი კვლევის მიხედვით კორონული ხვრელების ბრუნვაშიც შეინიშნება დიფერენციული ხასიათი. Shelke & Pande, 1985 შედეგების მიხედვით კორონული ხვრელების ბრუნვის პერიოდი განედის ფუნქციაა. Obridko & Shel'Ting, 1988 მიხედვით კორონული ხვრელების ბრუნვის შემცირებული დიფერენციული ხასიათი მხოლოდ მზის მინიმუმისთვისაა დამახასიათებელი, სხვა პერიოდებში კი კორონულ ხვრელებში, ისევე როგორც მთლიან კორონაში, მნიშვნელოვნადაა გამოხატული დიფერენციული ბრუნვა. Insley et al., 1995 კვლევებში აღნიშნულია, რომ მიუხედავად იმისა, რომ საშუალო განედების კორონა ფოტოსფეროსთან შედარებით მყარტანოვნად ბრუნავს, მაინც მნიშვნელოვნადაა გამოხატული დიფერენციული ბრუნვა. Navarro-Peralta & Sanchez-Ibarra, 1994 მიხედვითაც იზოლირებული კორონული ხვრელებისთვის დამახასიათებელია დიფერენციული მოძრაობა. ზოგიერთი თანახმად კვლევის კორონული ხვრელების ბრუნვის ხასიათი დამოკიდებულია მზის ციკლზე და ისინი მზის მინიმუმის დროს მაქსიმუმთან შედარებით მყარტანოვნად უნდა ბრუნავდნენ (Harvey & Sheeley, 1987; Obridko & Shel'Ting, 1988; Navarro-Peralta & Sanchez-Ibarra, 1994). კორონული ხვრელების ბრუნვის ხასიათისა და მისი მიზეზების სრულყოფილად წარმოსაჩენად საჭიროა დამატებითი დაკვირვებითი და თეორიული კვლევები (Müller et al., 2013; Fox et al., 2016).

1.3. მზის კორონული ჯეტები

მზის კორონული ჯეტები (Coronal Jet – CJ) ტრანზიენტული მოვლენაა და წარმოადგენს კორონაში პლაზმის ამოფრქვევის მცირემასშტაბიან ხანმოკლე პროცესს (ნახ. 1.7). მზის კორონაში არსებული ტრანზიენტული მოვლენების ფართო სახესხვაობები 1970-იან წლებში იქნა აღმჩენილი (Demastus et al., 1973). უშუალოდ კორონულ ჯეტებს პირველად 70-იან წლებში Skylab-ის რენტგენული ექსპერიმენტის დროს დააკვირდნენ. 1980-იან წლებში კოსმოსურ ხომალდზე განთავსებული აშშ-ს საზღვაო კვლევის ლაბორატორიის (U.S. Naval Research Laboratory - NRL) ულტრაიისფერი ტელესკოპით კორონული ჯეტები დაფიქსირდა UV გამონასახებზეც. ამ ობიექტების შესწავლა და პირველი მოდელების შექმნა დაიწყო მოგვიანებით 90-იანი წლების დასაწყისში იაპონური კოსმოსური ხომალდის Yohkoh-ს მიერ რენტგენული ჯეტების დაკვირვების შემდეგ (Yokoyama & Shibata 1995, Shibata et al., 1992; Shimojo et al., 1996, 2001). გარეატმოსფერული დაკვირვებების ხარისხის გაუმჯობესებასთან ერთად, ჯეტის მსგავსმა მოვლენებმა დაიკავა მნიშვნელოვანი ადგილი კორონის დაკვირვებებში და კორონის დინამიკის კვლევებში.



100 120 140 160 180 100 120 140 160 180 100 120 140 160 180

ნახაზი 1.7. მზის კორონული ჯეტი (Kumar et al. 2018).

კორონული ჯეტები პლაზმის კონცენტრირებული ნაკადია, რომელიც ამოიფრქვევა კორონაში რამდენიმე ასეული კმ/წმ სიჩქარით. ისინი დაიკვირვება EUV, რენტგენულ და თეთრი სინათლის (White Light - WL) გამონასახებზე და მიუხედავად მზის ციკლის ფაზისა გვხვდება ფაქტიურად ყველა რეგიონში - როგორც წყნარ კორონაში, ასევე აქტიურ არეებსა (Shimojo et al., 1996, Wang & Sheeley, 2002, Schmieder et al. 2013; Raouafi et al. 2016) და კორონულ ხვრელებში (Sterling et al. 2015; Young & Muglach 2014a,b; Young 2015). ისინი განსაკუთრებით კარგად დაიკვირვება კორონული ხვრელების ფონზე.

კორონული ჯეტები უმეტესწილად წარმოიქმნება კაშკაშა წერტილებში. კაშკაშა წერტილებს პირველად დააკვირდნენ რენტგენულ გამონასახებზე 1970-იან წლებში. ისინი წარმოადგენენ მცირე ზომის (60"-მდე) სტრუქტურებს, რომლებიც არსებობენ რამდენიმე საათიდან რამდენიმე დღემდე (Vaiana et al., 1973). შემდგომი კვლევებით დადგინდა, რომ კაშკაშა წერტილები წარმოადგენენ მცირე ზომის მარყუჟებს, რომელიც ასოცირდება ფოტოსფეროში მდებარე მცირე ზომის მაგნიტურ ბიპოლთან (Golub et al., 1976). მოგვიანებით ეს წარმონაქმნები დაკვირვებული და აღწერილი იქნა EUV გამონასახებზეც (Habbal & Withbroe, 1981).

კაშკაშა წერტილები კორონაში მუდმივად ასეულობით დაიკვირვება (Golub et al. 1974). მათი ევოლუციის პროცესში ხშირია სიკაშკაშის სუსტი მატება, კვაზი-პერიოდული გაელვებები და ჯეტების წარმოქმნა (Aulanier et al. 2007; Schmieder et al. 2013). კორონული ხვრელების საზღვრებთან და კორონულ ხვრელებში კაშკაშა წერტილები ხშირად ასოცირდება ჯეტებთან - კაშკაშა წერტილების ჩაკეტილი მარყუჟები ახლი ამოსული მაგნიტური ნაკადის ან არსებულის გაქრობის გამო ურთიერთქმედებს გარემომცველ საწინააღმდეგო პოლარობის მაგნიტური ველის ძალწირებთან, ხდება გადაერთება, რაც იწვევს პლაზმის ნაკადის სვეტისებურ ამოფრქვევას. Mou et al. 2018-მა წყნარ კორონაში არსებული კაშკაშა წერტილების 76%-ში დააფიქსირა მინიმუმ ერთი ამოფრქვევა მათი სიცოცხლის განმავლობაში. Hong et al. (2014)-ის მიხედვით კი კაშკაშა წერტილების თითქმის 1/3-ში დაიკვირვება ერთი ან მეტი მინიბოჭკოს ამოფრქვევა. შემთხვევებს, როდესაც ერთი და იმავე წყაროდან ჯეტის გამოფრქვევა ხდება რამდენჯერმე რეკურენტული ჯეტებს უწოდებენ (Shibata et al. 1992; Wang & Sheeley, 2002; Madjarska 2011).

კოსმოსური მისიების მზის და ჰელიოსფერული ობსერვატორიის (Solar and Heliospheric Observatory - SOHO), ჰინოდეს (Hinode), მზე-დადამიწის კავშირების ობსერვატორიისა (Solar Terrestrial Relations Observatory – STEREO), რეგიონალური საზღვრების გამონასახების მიმღები სპექტროგრაფის (Interface Region Imaging Spectrograph – IRIS) სპექტროსკოპიულმა, EUV და რენტგენულ გამონასახებზე დაკვირვებამ მნიშვნელოვანი წინსვლის საშუალება მოგვცა მზის ტრანზიენტული მოვლენების, განსაკუთრებით კი კორონული ჯეტების, ფორმირებისა და ევოლუციის შესწავლაში. კვლევებმა გამოავლინა, რომ სხვადასხვა კორონული ჯეტი განსხვავებულ ქცევასა და დინამიკას უჩვენებს. Nisticò et al. (2009) STEREO/SECCHI-ის მონაცემებით შეისწავლა 79 ჯეტი და მათ მორფოლოგიაზე დაყრდნობით გამოყო რამდენიმე ტიპი:

'ეიფელის კოშკის', 'ლამდას' ტიპის, მიკრო-CME-ს ტიპის, ჯეტების ნაწილი კი მათი არაწერსიერი ფორმის გამო არც ერთი ტიპისთვის არ მიუკუთნებიათ. რამდენიმე ჯეტის ამოფრქვევისას დაიკვირვებოდა სპირალური სტრუქტურაც. სხვადასხვა ავტორები მოვლენის დროს აკვირდებიან მინიბოჭკოს მსგავსი სტრუქტურის ამოფრქვევასაც (Hong et al., 2011; Sterling et al., 2015; Hong et al., 2016). ჯეტის ისრის გასწვრივ ხშირად დაიკვირვება პლაზმოიდები და მცირე მასშტაბის კვაზი-პერიოდული პლაზმის ნაკადები (Chandrashekhar et al., 2014).

სხვადასხვა მეთოდებით ჯეტების კინემატიკის შესწავლის შედეგად მიღებულია მათი პლაზმის გამოტყორცნის სიჩქარეები 100-დან 1000 კმ/წმ-მდე (Shimojo & Shibata 2000; Wang & Sheeley, 2002; Savcheva et al. 2007, Paraschiv et al. 2010; Nisticò et al., 2009). EUV ჯეტების ამოფრქვევის სიჩქარე საშუალოდ 250-400 კმ/წმ დიაპაზონში მერყეობს. ზოგიერთ შემთხვევაში სწრაფ იმპულსურ ამოფრქვევას მოსდევს პლაზმის შედარებით ნელი რამდენიმე ათეული კმ/წმ რიგის სიჩქარის ნაკადი (Patsourakos et al., 2008), რაც დამახასიათებელია კვაზიმდგრად მაგნიტოჰიდროდინამიკურ (Magnitohydrodynamics -MHD) სისტემაში არამდგრადობების გაჩენასთან (Pariat et al., 2009).

ჯეტების პლაზმის ტემპერატურის შეფასების შედეგები არაერთგვაროვანია და სხვადასხვა ავტორს განსხვავებული ტემპერატურა აქვთ მიღებული დაახლოებით 0.4-დან 5 მეგა K-მდე (Nisticò et al. 2011; Pucci et al., 2013). ზოგიერთ ჯეტში შედარებით ცივი ქრომოსფერული ტემპერატურის პლაზმაც დაიკვირვება (Moore et al. 2013). ჯეტები არ წამოადგენენ მონოლითურ სტრუქტურებს და შეიცავენ სხვადასხვა ტემპერატურის მქონე პლაზმის კომპონენტებს. ჯეტების ფეხებთან ტემპერატურა რამდენიმე ათეულ მეგა K-საც აღწევს (Bain & Fletcher 2009).

კორონული ჯეტების სიცოცხლის ხანგრძლივობა რამდენიმე წუთიდან 2 საათამდე მერყეობს. საშუალო სიცოცხლის ხანგრძლივობა 20-40 წუთს შეადგენს (Savcheva et al., 2007; Nisticò et al., 2009). STEREO-ს მონაცემებზე დაყრდნობით კორონული ჯეტების მასა იცვლება $3.2^{*10^{15}}$ - $1.8^{*10^{14}}$ გ შუალედში. ჯეტის სიმკვრივე შეფასებულია 0.8^{*10^9} - $5^{*10^{10}}$ სმ⁻³, რაც დაბალი კორონის და ქრომოსფეროს სიმკვრივის შესაბამისია (Feng et al., 2012). კორონული ჯეტების სიმაღლე იცვლება რამდენიმე მეგა მ-დან რამდენიმე R_{\odot} -მდე. რენტგენული და EUV ჯეტები შედარებით მცირე ზომებისაა (დაახლოებით 10⁴ კმ-დან), თუმცა WL ჯეტები რამდენიმე R_{\odot} -ზეც ვრცელდება (Wang et al., 2006; Nitta et al., 2008). STEREO-ს დაკვირვებები მიუთითებს, რომ EUV და WL ჯეტებს შორის საკმაოდ დიდი კორელაციაა - 73-78% (Paraschiv et al., 2010). ზოგიერთი მოსაზრებით WL ჯეტები წარმოადგენენ EUV ჯეტების გაგრძელებას კორონის შედარებით ზედა ნაწილში (Wang & Sheeley, 2002). EUV ჯეტების მინიმალური სიგანე ინსტრუმენტების სივრცულ გარჩევას შეესაბამება და დაახლოებით 1150 კმ-ია (1.6"), მაქსიმუმ კი რამდენჯერმე 10⁴ კმ-ს აღწევს (Raouafi 2016).

1.3.1. კორონული ჯეტების კლასიფიკაცია; ფორმირებისა და ევოლუციის მოდელები

Moore et al. (2010)-მა Hinode/XRT რენტგენულ გამონასახებზე დაკვირვებული ჯეტების მორფოლოგიის მიხედვით ისინი დაყო ორ ტიპად: სტანდარტულ და აფეთქებად (blowout) ჯეტებად. სტანდარტული ჯეტის შემთხვევაში დაიკვირვება მკრთალი ბაზისი და წვრილი ისარი. აფეთქებადი ჯეტისთვის დამახასიათებელია ძირის გაკაშკაშება და ამოფრქვევის პროცესში ჯეტის ისრის გაფართოება (Moore, et al. 2013). აღსანიშნავია, რომ ყველა დაკვირვებული მოვლენის სტანდარტული ან აფეთქებადი ჯეტისთვის მიკუთნება ვერ ხერხდება. ასევე შესაძლებელია, რომ სტანდარტული და აფეთქებადი ჯეტები ერთი და იგივე ფენომენია, მათ წარმართავს მსგავსი მექანიზმი და დაკვირვებულ მორფოლოგიას განსაზღვრავს ბოჭკოს ამოფრქვევის თავისებურებები (Sterling et al., 2015).

სტანდარტული ჯეტების უმრალესობა შეიცავს ცხელ EUV და რენტგენულ კომპონენტს (29/32, Moore et al., (2013)), აფეთქებად ჯეტებს კი დამატებთ აქვთ ცივი პლაზმის კომპონენტიც (16/19), რომელიც დაიკვირვება ქრომოსფეროსა და გარდამავალი რეგიონისათვის დამახასიათებელ სპექტრალურ ხაზებში (304 Å). სავარაუდოდ აფეთქებადი ჯეტები არიან უფრო ცხელი, აქვთ უფრო დიდი გამოტყრცნის სიჩქარე და დაკავშირებული არიან უფრო ძლიერი მაგნიტური ველის მქონე რეგიონებთან (Pucci et al. 2013).

არსებობს ზოგადი კონსესუსი, რომ ყველა ჯეტის მსგავს მოვლენას უნდა ქონდეთ მსგავსი ფორმირების მექანიზმი (ნახ. 1.8), რაც გულისხმობს მაგნიტური გადაერთების შედეგად თავისუფალი მაგნიტური ენერგიის გამოთავისუფლებას (Pariat et al. 2009). სხვადასხვა მოდელებში ჯეტის ამოქმედებისათვის საერთო პირობა არის მაგნიტური ველის კონფიგურაციაში ე.წ. ნულოვანი წერტილის არსებობა, რომელიც წარმოადგენს თხელ დენურ შრეს - ადგილს სადაც ხდება ფეთქებადი სახის მაგნიტური გადაერთება (Lau & Finn, 1990).



ర్వెరికరా 1.8. రెవిర్రంత్రీగ్రాగం వ్రాయ్యరింగు ర్రెయ్రివిల ప్రొత్యావింది ప్రాయానికి సార్రాలు స్రాంగ్ కిరియ్రిలు ట్రైరెపిత్రీగాగం రాయ్రులాం (Moore et al., 2010). గొంద్రాలాం ఇ్రాగందా కలరొందొర్రాలాంని వ్రింత్రుగుద్దార్పిల్లాం రెప్లాగోంగ్సురిం. లాల్రాగ్యు రెప్లాగ్ రార్యరిం న్లుగు వర వ్రిప్తుర్రాలు పర్ ట్యంగు రాయ్ సింత్రు ప్రారార్థు ప్రా పెంగ్యర్రాలం: వ్రాలాంగు ప్రారాశ్యారిందిన న్లుగు వరి వ్రిప్తుర్రాలు పర్ ట్యంగు ప్రారాశాధి పారి వ్రారాగు ప్రారాశ్య పరిగుత్రంగ్రారిం. లాల్రాగ్యు ప్రారాశ్యారింగి న్లుగు పరిగుత్రాలు పర్ ట్యార్లు పర్ ట్యంగు సారాశ్యారింద్రు పరిగు పరిగుత్రంగ్రారిం లాల్లు ప్రారాశ్యారిందిం వ్రారాశ్య స్రార్లు పరిగు ప్రారాశ్యం లాల్లు పరిగుత్తింది. స్రార్యం స్రారాగు ప్రారాశ్యార్ స్రారాగం ప్రారాశం స్రార్లు ప్రారాశార్రాలు ప్రారాశ్యాత్రంగు ప్రారాశ్యారింది ప్రార స్రార్యారిలు స్రారాశ్యారిం స్రారాగిం స్రార్యాలికి పరిగాత్రాగ్రం ప్రారాశం దేశ్యం లాంగ్రారం స్రారాశ్యం స్రారం స్రార్యారిం రెంగులు రావిల్లంగి పరిగిత్రాశ్య స్రార్యాలు ప్రారాశార్రి ప్రారాశ్యారి ప్రారాశార్రం స్రారాశ్యారి ప్రారా ప్రారాశ్యారిం రెంగులు రావిల్లాగు పరిపాత్రాశ్రశ్రవర్రిప్రికి పరిగాలు ప్రారాశార్రి: వ్రర్రారం రెంగ్రారిం స్రారం స్రారాశ్రంగ్రులు రెంగులు రావిల్లంగు పరిగిత్రాశ్రశ్రవర్రాలు ప్రారాశారం ప్రారారం స్రారారం ప్రారం రిక్రం సారం స్రారం స్రారాలు స్రారం స్రారాగం స్రారాలు స్రారాలు ప్రారాలు స్రారం స్రారం స్రారం స్రారాలు ప్రారాలు స్రారం స్రారం స్రారం స్రారం స్రారం ప్రారాం స్రారాలు స్రారం స్రారం స్రారం స్రారాలు స్రారం స్ర సారారం స్రారం సారం స్రారం స్ సారారం స్రారం స్ర స్రారం స్రార

ჯეტის ამოქმედებისათვის განიხილება რამდენიმე სავარაუდო სცენარი: ახალი მაგნიტური ნაკადის ამოსვლა (Yokoyama & Shibata 1995; Moreno-Insertis & Galsgaard, 2013; Archontis & Hood, 2013); უკვე არსებული ნაკადის გაქრობა (Young & Muglach, 2014b; Panesar et al. 2016); მინიბოჭკოს ამოფრქვევა (Sterling et al. 2015; Hong et al. 2016).

ნაკადის ამოსვლის მოდელის თანახმად ფოტოსფეროს ქვემოდან ამოდის ახალი მაგნიტური ნაკადი და ეჯახება უკვე არსებულ კორონულ მაგნიტურ ველს, რაც იწვევს აღნიშნული ორი სისტემის ურთიერთქმედებას - გადაერთებას. ნაკადის გაქრობის დროს ადგილი აქვს სისტემაში არამდგრადობას - წონასწორობის დარღვევას. ამ დროს ნულოვანი წერტილის ქვემოთ არსებული ჩაკეტილი მარყუჟები იწყებენ გარემომცველ მაგნიტური ველის ძალწირებთან გადაერთებას. გადაერთებას აქვს ფეთქებითი ხასიათი, იწყება სპონტანურად, და გამოწვეულია ჩაკეტილი ველის სისტემაში კორონული ველის რეორგანიზაციის გამო. ორივე სცენარში, ჯეტის ამოქმედება ხდება ჯეტის წყაროს (უმეტეს შემთხვევაში კაშკაშა წერტილის) და გარემომცველი კორონის მაგნიტური ველის ძალწირებს შორის გადაერთების შედეგად გამოთავისუფლებული მაგნიტური ენერგიის საშუალებით. ბოლო წლებში განსაკუთრებული ყურადღება ეთმობა მინიბოჭკოს ამოფრქვევის შედეგად ჯეტის წარმოქმნის სცენარსაც. ჯეტის ამოფრქვევამდე დაიკვირვება მცირე ზომის მუქი წარმონაქმნი, რომელიც ქრომოსფერული მინიბოჭკოს მსგავსია. მინიბოჭკოს ზემოთა მიმართულებით გადაადგილებას მოსდევს ჯეტის კაშკაშა წერტილში გადაერთებები და შედეგად ჯეტის გამოფრქვევა (Sterling et al., 2015). აღნიშნული პროცესი დიდი ბოჭკოების ამოფრქვევის მსგავსია.

ჯერჯერობით რთულია შეფასება რამდენად კარგად აღწერს წარმოდგენილი მოდელები ზოგადად კორონულ ჯეტებს. ამ პროცესების ფუნდამენტური თვისებების ახსნა საჭიროებს კომბინირებულ დაკვირვებით და მოდელირების სამუშაოებს. ასევე, უფრო ფართო დაკვირვებითი და თეორიული კვლევებია საჭირო, რომ დავადგინოთ მინიბოჭკო რამდენად მნიშვნელოვან როლს თამაშობს ჯეტის და კაშკაშა წერტილის ჩამოყალიბებასა და დინამიკაში.

1.3.2. კორონული ჯეტების კავშირი სხვა კორონულ წარმონაქმნებთან

კორონული ჯეტები მჭიდრო კავშირშია მზის სხვადასხვა წარმონაქმნებთან და კორონაში მიმდინარე პროცესებთან. კორონული ჯეტები მზის ატმოსფეროში საკმაოდ ხშირი მოვლენაა (Savcheva et al., 2007, Paraschiv et al., 2010, Young 2015). საკმაოდ დიდი

რაოდენობით დაიკვირვებიან კორონულ ხვრელებში და მნიშვნელოვან როლს უნდა თამაშობდნენ მათ ევოლუციაში. ჯეტები და სხვადასხვა გარდამავალი გაკაშკაშებების 70% კორონულ ხვრელებში და მის საზღვრებთან უკავშირდება პლაზმის ნაკადის გამოტყორცნას ან მარყუჟის გაფართოებას (Subramanian et al. 2010).

მკვლევარები ვარაუდობენ, რომ ჯეტები პოლარული ამოფრქვევადი სვეტების (Plumes) პრეკურსორებს წარმოადგენენ და მონაწილეობას იღებენ მათ ჩამოყალიბებაში (Raouafi et al., 2008). ჯეტები ხშირად ხდება პოლარული ამოფრქვევადი სვეტების 'ფეხებთან', და სავარაუდოა, რომ მათ პლაზმით ამარაგებდნენ (Wilhelm et al., 2011). კორონულ ჯეტებს ხშირად აკავშირებენ სპიკულებთან და მაკროსპიკულებთანაც (Moore et al. 2010; 2013). ასევე დაკვირვებულია კორელაცია III ტიპის რადიო ანთებების და ჯეტის ამოფრქვევას შორის (Bain & Fletcher 2009). Shibata et al. 1992-ის მიხედვით მრავალი ჯეტი შესაძლოა ასოცირდებოდეს ამოფრქვევებთანაც. კორონულ ჯეტებს ასევე უკავშირებენ მზის ენერგეტიკულ ნაწილაკებს (Nitta et al., 2008).

1.4. კვლევის მოტივაცია, მიზნები და ნაშრომის მოკლე აღწერა

ზოგადად, სხვადასხვა პლაზმის ნაკადების ფორმირებისა და აჩქარების მექანიზმები დაკავშირებულია მზის ახლოს მიმდინარე ფიზიკური პროცესებთან და მათი ახსნა საჭიროებს ჰელიოსფეროს როგორც ერთიანი სისტემის კვლევას (მაგ. Shergelashvili & Fichtner, 2012 მიერ წარმოდგენილი ალფენური ტურბულენტობით მზის ქარის გაცხელების ანალიზური მოდელი). გარდა ამისა კორონული ხვრელები შედგებიან დაბალი სიმკვრივის მქონე პლაზმისაგან (Munro & Withbroe 1972), რის გამოც ისინი ოპტიმალურ ობიექტებს წარმოადგნენ დაუჯახებადი კინეტიკური და შესაბამისი დისიპაციური პროცესების შესასწავლად. კორონული ხვრელები ასოცირდებიან სწრაფად გაფართოებად ღია მაგნიტურ ველთან და მზის ქარის აჩქარებასთან (Krieger et al. 1973; Noci 1973; Pneuman 1973; Nolte et al., 1976), რომლის მექანიზმი ჯერაც გაურკვევლია და რომელიც მზის შიდა ნაწილის მის ატმოსფეროსთან კავშირის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ინდიკატორს წარმოადგენს. კორონული ხვრელები კავშირშია დედამიწის ზედა

ატმოსფეროსა და მაგნიტოსფეროს მნიშვნელოვან შეშფოთებებთან, რადგან დედამიწაზე წარმოქმნილი ქარიშხალების გეომაგნიტური ത്രത ნაწილს იწვევს მათთან დაკავშირებული სწრაფი ქარი. შესაბამისად, კორონული ხვრელების კვლევას, მათ შორის კორონული ხვრელების, როგორც მზის სწრაფი ქარის რეგიონების, მოძრაობის სტატისტიკური მახასიათებლების შესწავლას, დიდი პრაქტიკული მნიშვნელობა აქვს კოსმოსური ამინდის და დედამიწის ახლო კოსმოსის გარემოს პირობების პროგნოზირებისათვის.

მიუხედავად იმისა, რომ კორონული ჯეტები მცირე ზომისა და სიცოცხლის ხანგრძლივობის მქონე ტრანზიენტული წარმონაქმნებია, ისინი კორონაში მინდინარე მრავალ პროცესში იღებენ მონაწილეობას და მნიშვნელოვან გავლენას ახდენენ ზოგად დინამიკაზე. ჯეტის მსგავსი წარმონაქმნების ენერგია ჩვეულებრივ მზის ანთებებსა და კორონალური მასის ამოფრქვევებზე ნაკლებია. თუმცა ამ ობიექტებს აკავშირებთ საერთო მახასიათებლები, კერძოდ აფეთქების მგავსი მაგნიტურად ამოქმედებული დინამიკა. სხვადასხვა ავტორები ხშირად მიიჩნევენ, რომ კორონულ ჯეტებს გარკვეული წვლილი შეაქვთ მზის ატმოსფეროს გაცხელებასა და მზის ქარის აჩქარებაში (Aulanier et al. 2007; Nistico et al., 2009; Subramanian et al., 2010). ისინი ასევე დიდ როლს უნდა თამაშობდნენ კორონული ხვრელის ევოლუციაში (Subramanian et al., 2010). ჯერჯერობით უცნობია არსებობენ თუ არა კორონული ჯეტები, რომლებიც უფრთო მცირე მასშტაბისაა ვიდრე დღევანდელი ხელსაწყოების სივრცული და დროითი გარჩევაა, მცირე მასშტაბის ჯეტების დიდი რაოდენობით არსებობა შესაძლოა წარმოადგენდეს კორონის გაცხელების ერთ-ერთი ხელშემწყობ ფაქტორს. ასევე უცნობია მათი როლი სხვადასხვა კორონული სტრუქტურების (მაგ. პოლარული ამოფრქვევადი სვეტები, სპიკულები) ფორმირებაში. აქედან გამომდინარე, კორონული ჯეტების თვისებებისა და წარმოქმნის მექანიზმების სრულყოფილად შესწავლა, საშუალებას გვაძლევს გავაუმჯობესოთ ჩვენი ცოდნა მზის კორონის კვლევაში არსებულ ფართო მასშტაბების პრობლემებზე, ტრანზიენტული წარმონაქმნების ფიზიკაზე, მზის უფრო დიდი და კომპლექსური მოვლენების მექანიზმებზე, კორონის გაცხელების ძირითად პროცესებსა და მზის ქარის აჩქარებაზე.
წარმოდგენილი სადისერტაციო კვლევის მიზანს წარმოადგენს მზის კორონული ხვრელების დინამიკის კვლევა, მათი ბრუნვის მახასიათებლების სტატისტიკური შესწავლა, და მიღებული ბრუნვის სიჩქარეების შედარება ფოტოსფერულ და მზის ღრმა ფენების ბრუნვის პროფილებთან; ასევე მზის დისკოზე არსებულ კორონულ ხვრელებში და კორონული ხვრელების საზღვრებთან არსებულ კაშკაშა წერტილებში წამოქმნილი კორონული ჯეტების კვლევა, კაშკაშა წერტილებისა და ჯეტების ევოლუციის შესწავლა. ჩვენი მიზანია EUV მონაცემებიდან მოვახდინოთ კორონული ჯეტების კაშაკაშა წერტილების საშუალო ინტენსივობის დროითი ქცევის ხასიათის ანალიზი და დავადგინოთ რამდენადაა ის დაკავშირებული კორონული ჯეტის გამოფრქვევის პროცესთან.

ჩამოყალიბებული მიზნების მისაღწევად უნდა გადაგვეჭრა შემდეგი ამოცანები:

- კორონული ხვრელების 2013-2015 წლების მონაცემების დამუშავება. მათი
 მზის დისკოზე განაწილების შესწავლა და ანალიზი.
- კორონული ხვრელების ბრუნვის კუთხური სიჩქარეების გამოთვალა.
 ბრუნვის მახასიათებლების ანალიზი 3.75° სიგანის 32 განედურ ზოლში.
- ბრუნვის სიჩქარეების ანალიზი პატარა (10000 მეგა მ²-მდე), საშუალო (10000-40000 მეგა მ²) და დიდი (40000 მეგა მ²-დან) ფართობის მქონე კორონული ხვრელებისთვის.
- ბრუნვის სიჩქარის განედზე და ფართობზე დამოკიდებულების გამოვლენა.
 კორონული ხვრელების ბრუნვის პროფილების შექმნა.
- ფოტოსფეროს და ფოტოსფეროს ქვემოთ 0.6-დან 1 R_o მდე ბრუნვის სიჩქარეების არსებული პროფილების შესწავლა და ჩვენს მიერ მიღებულ კორონული ხვრელების ბრუნვის პროფილებთან შედარება.
- კორონის EUV გამონასახებიდან კორონული ჯეტების იდენტიფიკაცია.
- შემუშავებული პროგრამის საშუალებით გამონასახებიდან მზის დისკოს
 შესასწავლი რეგიონების ამოჭრა და თითოეული ობიექტის დროითი

სერიების შექმნა. ჯეტების საშუალო ინტენსივობის მრუდების, მათი EUV გამონასახებისა და ვიდეოების შექმნა.

- კორონულ ჯეტებთან დაკავშირებული კაშკაშა წერტილების საშუალო ინტენსივობის დროში ევოლუციის შესწავლა. ჯეტების ამოფრქვევის წინა პერიოდის შესწავლა.
- კორონული ჯეტებისა და მასთან დაკავშირებულ კაშკაშა წერტილების
 საშუალო ინტენსივობის რხევების შესწავლა.
- კორონული ჯეტისა და მასთან დაკავშირებული კაშკაშა წერტილების
 სხვადასხვა პატამეტრების შეფასება.

სადისერტაციო ნაშრომი შედგება 6 თავისგან. პირველ თავში წარმოდგენილია შესავალი, რომელშიც ზოგადად არის აღწერილი მზე, მზის კორონა, კორონული ხვრელები და კორონული ჯეტები, განხილულია კორონული ხვრელებისა და კორონული ჯეტების შესახებ არსებული კვლევები, დასაბუთებულია მათი შესწავლის მნიშვნელობა, ჩამოყალიბებულია განსახორციელებული კვლევის მიზნები და ამოცანები; მეორე თავში განხილულია კოსმოსური სადამკვირვებლო მისიების მონაცემების მოპოვებისა და დამუშავების საშუალებები, კორონული ხვრელებისა და კორონული ჯეტების იდენტიფიკაციისა და შემდგომი კვლევის მეთოდები. მესამე თავში მოცემულია კორონული ხვრელების ბრუნვის კუთხური სიჩქარეების გაზომვის შედეგები, მიღებული ბრუნვის პროფილები და მათი შედარება მზის სხვადასხვა ფენების ბრუნვის პროფილებთან; მეოთხე თავში - კორონული ჯეტებისა და მათთან დაკავშირებული კაშკაშა წერტილების საშუალო ინტენსივობის დროში ევოლუციის ანალიზი, კორონული ჯეტების პრეკურსორებში არსებული კვაზი-პერიოდული რხევების შეფასების შედეგები, კორონული ჯეტებისა და მათი პრეკურსორების პარამეტრები; მეხუთე თავში - შედეგების ანალიზი, ინტერპრეტაცია და დისკუსია; მეექვსე თავში კი შეჯამებულია კვლევის საზოლოო შედეგები, წარმოდგენილია მიღებული და სამომავლო დასკვნები განვითარების შესაძლებლობები. სადისერტაციო კვლევის შედეგები გამოქვეყნებულია ორი სტატიის სახით ჟურნალებში The Astrophysical Journal Letters და Astronomy and Astrophysics (Bagashvili et al., 2017, 2018).

თავი 2. კოსმოსური სადამკვირვებლო მისიების მონაცემები და მათი დამუშავების მეთოდები

სადისერტაციო ნაშრომში დასახული მიზნების მისაღწევად და ამოცანების განსახორციელებლად საჭირო იყო მზის კორონის EUV გამონასახები. როგორც საყოველთაოდ ცნობილია, მზის გამოსხივების მნიშვნელოვანი ნაწილი ვერ აღწევს ატმოსფეროში და შეუძლებელია მათი დედამიწიდან დაკვირვება. დედამიწის ატმოსფერო ბლოკავს EUV ტალღის სიგრძის გამოსხივებასაც. შესაბამისად, კვლევისთვის საჭირო მონაცემების მიღება მხოლოდ გარეატმოსფერულ თანამგზავრებზე განთავსებული ინსტუმენტების დახმარებით არის შესაძლებელი.

გვიანი 1950-იანი წლებიდან მოყოლებული კოსმოსურ დაკვირვებებს უმნიშვნელვანესი უჭირავს მზის შესწავლაში ადგილი მზის (http://www.scholarpedia.org/article/Solar_Satellites). გარეატმოსფერული ობსერვატორიების სწრაფ განვითარებას ხელს უწყობს თანამედროვე ცივილიზაციის კოსმოსურ ტექნოლოგიებზე დამოკიდებულების ზრდა.

ნახაზზე 2.1 წარმოდგენილია მზის შესწავლისათვის განხორციელებული ყველაზე მნიშვნელოვანი კოსმოსური მისიები, მათ შორისაა მთავარი მოქმედი და სამომავლო მისიებიც. 90-იანი წლებიდან მათი რაოდენობის ზრდამ და ინსტრუმენტების ხარისხის გაუმჯობესებამ განაპირობა მნიშვნელოვანი წინსვლა მზის შესწავლაში. დღესდღეობით მკვლევარებს საშუალება აქვთ უწყვეტად აწარმოონ კოსმოსური ამინდის მონიტორინგი, ნებიემიერ ტალღის სიგრძეზე შეისწავლონ მზის ატმოსფეროში მიმდინარე მოვლენები, მათ შორის მცირე ზომის ტრანზიენტული წარმონაქმნები.



ნახაზი 2.1. მზის დაკვირვებისათვის განკუთვნილი დასრულებული, მოქმედი და მომავალი მთავარი კოსმოსური მისიები (წყარო: <u>SCHOLARPEDIA</u>).

მოქმედი კოსმოსური მისიებიდან ჩვენი კვლევისათვის გამოსადეგი დაკვირვებები ხორციელდება მზის და ჰელიოსფერული კოსმოსური ობსერვატორიის (Solar and Heliospheric Observatory - SOHO), მზე-დადამიწის კავშირების ობსერვატორიისა (Solar Terrestrial Relations Observatory – STEREO) და მზის დინამიკის ობსერვატორიის (Solar Dynamics Observatory – SDO) მიერ. სამივე მათგანი აღჭურვილია ინსტუმენტებით, რომელებიც გვაწვდიან მზის მთლიანი დისკოს EUV გამონასახებს. SDO საშუალებას იძლევა ყველაზე მაღალი სივრცული და დროითი გარჩევით შევისწავლოთ მზის კორონაში მიმდინარე პროცესები. ის ერთ გამოსახულებას ყოველ 1 წამში იღებს (STEREO ერთ გამოსახულებას იღებს ყოველ 3 წუთში, SOHO - ყოველ 12 წუთში), ხოლო მისი EUV გამონასახების სივრცული გარჩევა 2-ჯერ აღემატება STEREO-ს და 4-ჯერ SOHO-ს გამონასახების გარჩევას (ნახ. 2.2; https://sdo.gsfc.nasa.gov/mission/instruments.php). კორონული ხვრელების მსგავსი მასშტაბური და შედარებით სტატიკური წარმონაქმნების შემთხვევაში ამ მახასიათებლებს შედარებით ნაკლები მნიშვნელობა ენიჭება. თუმცა კორონული ჯეტებისათვის, რომელებიც მცირე ზომის ტრანზიენტული მოვლენებია, გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს ინსტრუმენტების როგორც სივრცულ ისე დროით გარჩევას. გარდა ამისა, SDO თითქმის უწყვეტად და მნიშვნელოვანი პრობლემების გარეშე ფუნქციონირებს გაშვების მომენტიდან. შესაბამისად, წარმოდგენილ კვლევაში დავეყრდნობით აღნიშნული კოსმოსური ობსერვატორიის ინსტრუმენტების მიერ მიღებულ დაკვირვებით მონაცემებს.



ნახაზი 2.2.. SOHO-ს, STEREO-ს და SDO-ს მიერ დაკვირვებული მზის დისკოს EUV გამონასახების შედარება (წყარო: <u>NASA</u>)

2.1. მზის დინამიკის ობსერავატორია (Solar Dynamics Observatory - SDO)

SDO პირველი კოსმოსური სადამკვირვებლო პროექტია, რომელიც ხორციელდება ვარსკვლავთან ცხოვრების პროგრამის (Living with a star - LWS) ფარგლებში აშშ-ს აერონავტიკის და კოსმოსური სივრცის კვლევის ეროვნული სამმართველოს (National Aeronautics and Space Administration - NASA) მიერ. LWS პროგრამა შეიქმნა მზის ცვალებადობის მიზეზების შესასწავლად და ამ ცვალებადობის დედამიწაზე გავლენის შესაფასებლად.

SDO გაშვებული იქნა 2010 წლის 11 თებერვალს ატლას V რაკეტით კენედის კოსმოსური ცენტრიდან ფლორიდიდან (აშშ). ხომალდი საწვავის ჩათვლით 3100 კგ-ს იწონის, მისი სიმაღლე 4.5 მ, ხოლო სიგრძე და სიგანე 2-2 მ-ია. ის განთავსებულია დახრილ გეოსინქრონულ ორბიტაზე. გეოსინქრონულ ორბიტაზე განთავსებული თანამგზავრის ორბიტული პერიოდი ემთხვევა დედამიწის საკუთარი ღერძის გარშემო ბრუნვის პერიოდს. ამ ტიპის ორბიტა უზრუნველყოფს თითქმის უწყვეტ მაღალი სიჩქარის კავშირს მხოლოდ ერთ სახმელეთო სადგურთან. SDO დედამიწის ერთი და იმავე რეგიონის თავზე გაწელილი რვიანის ფორმის ტრაექტორიას დღეში ერთხელ შემოწერს და თითქმის უწყვეტად აგზავნის მონაცემებს ნიუ მექსიკოში (აშშ) განთავსებულ სადგურში. ინსტრუმენტების მუშაობის მოცდენის ან შეწყვეტის ძირითადი მიზეზებია დაბნელებები (Pesnell et al. 2012). დედამიწის ჩრდილით დაბნელება ხდება წელიწადში ორჯერ 2-3 კვირის განმავლობაში. აღნიშნული ორბიტისთვის ასევე დამახასაიათებელია წელიწადში სამჯერ მთვარით დაბნელება. დაკვირვების პროცესის შეფერხება შესაძლოა გამოწვეული იყოს სხვადასხვა დაგეგმილი ოპერაციებითაც (მაგ. თანამგზავრის დაგეგმილი მანერვები, ინსტრუმენტის კალიბრაცია და სხვ.). გამორიცხული არაა დაუგეგმავი შეფერხებებიც, თუმცა ობსერვატორიის ამოქმედების დღიდან სერიოზულ ხარვეზებს ადგილი არ ჰქონია.

SDO შეისწავლის მზის ატმოსფეროს მცირე სივრცულ და დროით მასშტაბებში ერთდროულად მრავალ ტალღის სიგრძეში. მისი მიზანია შევისწავლოთ (და მომავალში შევძლოთ პროგნოზირება) მზის ცვალებადობა, რომელიც გავლენას ახდენს დედამიწაზე სიცოცხლის არსებობაზე და ტექნოლოგიური სისტემების ფუნქციონირებაზე. ამისათვის SDO-მ უნდა განსაზღვროს: როგორ წარმოიქმნება და სტრუქტურირდება მზის მაგნიტური ველი, როგორ ვრცელდება მისი ენერგია მზის ქარის, მაღალენერგეტიკული ნაწილაკების და მზის გამოსხივების სახით. მისიის მთავარი სამეცნიერო მიზნები გულისხმობს გავაუმჯობესოთ ჩვენი ცოდნა შემდეგი სამეცნიერო საკითხების შესახებ (Pesnell et al. 2012):

1. რა მექანიზმი ამოქმედებს მზის აქტივობის კვაზი-პერიოდულ 11 წლიან ციკლს;

- როგორ არის აქტიური არეების მაგნიტური ნაკადი სინთეზირებული, კონცენტრირებული და გაბნეული მზის ზედაპირზე;
- როგორ ახდენს მცირე მასშტაბის მაგნიტური გადაერთებები მსხვილმასშტაბოვანი ველის ტოპოლოგიის და დენური სისტემის რეორგანიზაციას, რამდენად მნიშვნელოვანია ეს პროცესი კორონის გაცხელებისა და მზის ქარის აჩქარებისათვის;
- სად წარმოიქმნება მზის EUV სპექტრულ გამოსხივებაში დაკვირვებული ცვალებადობები და როგორაა ეს დაკავშირებული მზის მაგნიტური აქტივობის ციკლთან;
- 5. მაგნიტური ველის როგორი კონფიგურაციები იწვევს CME-ებს, წყალბადის ბოჭკოების ამოფრქვევას და მზის ანთებებს, რომლებიც წარმოქმნიან ენერგეტიკულ ნაწილაკებსა და რადიაციას;
- შესაძლებელია თუ არა მზის ზედაპირთან ახლოს არსებული მაგნიტური ველის კონფიგურაციებისა და ატმოსფერული სტრუქტურების შესწავლით განვსაზვროთ დედამიწასთან ახლოს არსებული მზის ქარის დინამიკა და სტუქტურა;
- შესაძლებელია თუ არა კოსმოსური ამინდისა და კლიმატის ზუსტი და საიმედო პროგნოზირება.

SDO წარმოადგენს სამი ინსტრუმენტის ერთობლიობას: ატმოსფერული გამონასახების მიმღები ნაკრები (Atmospheric Imaging Assembly - AIA), ჰელიოსეისმური და მაგნიტური გამონასახების მიმღები (Helioseismic and Magnetic Image - HMI), უკიდურესი ულტრაიისფერი ცვალებადობის ექსპერიმენტი (Extreme Ultraviolet Variablity Experiment - EVE). თითოეული ინსტრუმენტი ერთდროულად ახორციელებს სხვადასხვა სახის გაზომვებსა და დაკვირვებებს მზის ფოტოსფეროში, ქრომოსფეროსა და კორონაში (Pesnell et al. 2012).

SDO/AIA-ს (Lemen et al., 2012; Boerner et al., 2012) მთავარი მიზანია SDO-ს სხვა ინსტრუმენტებთან და სხვა ობსერვატორიებთან ერთად შეისწავლოს მზის ატმოსფეროში არსებული აქტივობები და ამ აქტივობების წარმმართავი ფიზიკური მექანიზმები. SDO/AIA გვაწვდის მზის კორონისა და გარდამავალი რეგიონის მთლიანი დისკოს 28 გამონასახებს ფოტოსფეროდან დაახლოებით 0.5 R_{\odot} -მდე სიმაღლეზე. ის 4 ტელესკოპის ერთობლიობაა, რომლებიც გამოსახულებას იღებენ დაახლოებით 1.5″ სივრცული რეზოლუციით ყოველ 12 წამში 10 სხვადასხვა ტალღის სიგრძის ფილტრით. ესენია (ნახ. 2.3): შვიდი EUV ფილტრი (Fe XVIII (94 Å), Fe VIII, XXI (131 Å), Fe IX (171 Å), Fe XII, XXIV (193 Å), Fe XIV (211 Å), He II (304 Å), Fe XVI (335 Å); C IV ხაზი (1600 Å), ახლო კონტინიუმი (ფოტოსფეროს უწყვეტი სპექტრი, 1700 Å), და თეთრი სინათლე (4500 Å).



ნახაზი 2.3. SDO/HMI-სა და SDO/AIA-ს გამონასახები (წყარო: <u>The Sun today</u>).

SDO/HMI (Scherrer et al. 2012) შექმნილია ფოტოსფეროში არსებული რხევებისა და მაგნიტური ველის შესასწავლად. SDO/HMI აკვირდება მთლიან მზის დისკოს და გვაწვდის გამონასახებს 1'' რეზოლუციით. ინსტრუმენტის მთავარი პროდუქტებია (ნახ. 2.3): დოპლეროგრამები (მზის ფოტოსფეროში არსებული სიჩქარეების რუკები), კონტინიუმი (ფოტოსფეროს უწყვეტი სპექტრის გამონასახები Fe I-ის 6173 Å შთანთქმით ხაზში) და მაგნიტოგრამები (ფოტოსფეროს მაგნიტური ველის რუკები).

SDO/EVE (Woods et al. 2012) მაღალი სპექტრული და დროითი გარჩევით ზომავს მზის EUV გამოსხივებას და გვაწვდის სხვადასხვა სპექტრულ და ფოტომეტრულ პროდუქტებს.

2.2. დაკვირვებითი მონაცემების მიღების და დამუშავების პროგრამული ინსტრუმენტები

SDO გვაწვდის დიდი რაოდენობით მონაცემებს, რაც საჭიროებს მონაცემთა ეფექტური იდენტიფიკაციისა და წვდომის ინსტრუმენტების არსებობას. ამ მიზნისთვის შეიქმნა ჰელიოფიზიკურ მოვლენათა ცოდნის ბაზა (Heliophysics Event Knowledgebase -HEK; Hurlburt et al, 2012). HEK მონაცემთა ავტომატური მოძებნის და მიღების საშუალებას იძლევა. ის შედგება ორი მთავარი მონაცემთა ბაზისაგან: ჰელიოფიზიკური მოვლენების რეესტრი (Heliophysics Event Registry - HER) და ჰელიოფიზიკური დაფარვის რეესტრი (Heliophysics Coverage Registry - HCR). HER-ში მოცემულია მზის როგორც ავტომატურად ისე ვიზუალურად იდენტიფიცირებული წარმონაქმნები და მახასიათებლები; HCR მომხმარებელს საშუალებას აძლევს მოძებნოს ამა თუ იმ მოვლენის სხვადასხვა ინსტრუმენტების მიერ წარმოებული დაკვირვებითი მონაცემები. ის გვიჩვენებს რომელი მონაცემები არის ხელმისაწვდომი და კონკტერული დაკვირვება "სად", "როდის" და "როგორ" განხორციელდა.

SDO-ს მონაცემები HEK-დან ხელმისაწვდომია თითქმის რეალურ დროში. მონაცემების მოძებნის, მიღების და მანიპულაციისთვის გამოიყენება SolarSoftWare სისტემის, ან მოკლედ, SolarSoftWare-ს (SSW) სხვადასხვა სერვისები.

დისერტაციის ფარგლებში დასახული ამოცანების განსახორციელებლად (რაც გულსხმობს როგორც მონაცემების მიღების, ასევე გამოთვლების შესრულებას, გამონასახების დამუშავებასა და ანალიზს) ვიყენებთ SSW/IDL-ს შესაძლებლობებს. SSW

წარმოადგენს პროგრამირებისა და მონაცემთანა ანალიზის ერთიან გარემოს მზის ფიზიკოსებისათვის. ის მზის მისიების მონაცემთა ანალიზისთვის შეიქმნა 90-იანი წლების დასაწყისში. SSW ძირითადად დაფუძნებულია Interactive Data Language (IDL) პროგრამირების ენაზე და წარმოადგენს პროგრამების ერთობლიობას, რომელიც შედგება ბაზებისაგან, მონაცემთა სპეციალური ბიბლიოთეკებისაგან და სისტემური საშუალებებისაგან. SSW-ს შესაძლებლობები საკმაოდ ფართოა და მოიცავს ისეთ მნიშვნელოვან ფუნქციებს, როგორიცა: დროითი სერიეზის ანალიზი, დროის გარდაქმნები, სპექტრული მორგება, გამონასახების და გამონასახების ვიდეოების ჩვენება და შექმნა, მზის კიდის მორგება, საწყისი მონაცემების სხვადასხვა ფორმატის ფაილებად გარდაქმნები და სხვა (<u>https://sohowww.nascom.nasa.gov/solarsoft/</u>).

მონაცემების მიღების ეფექტურობის გასაზრდელად, დამატებით მივმართავთ ალტერნატიულ საშუალებას, ე.წ. 'ამოჭრის სერვისს', რაც მომხმარებლებს საშუალებას აძლევს SDO/AIA-ს და SDO/HMI-ს მონაცემები შეუკვეთოს სერვერიდან გადმოსაწერად. აღნიშნული მეთოდი საშულებას გვაძლევს მოვიპოვოთ მზის მთლიანი დისკოს ან ნებისმიერი სასურველი რეგიონის გამონასახების დროითი სერია. ამ უკანასკნელში შეგვიძლია გადმოწერამდე გამოვრიცხოთ მზის ბრუნვის ეფექტი. მეთოდი ეფექტურია, როდესაც მცირე დროის მომენტში გვჭირდება მზის დისკოს მცირე უბნის შესწავლა. მხოლოდ კონკრეტული უბნის გამონასახების გამოყენებით მნიშვნელოვნად მცირდება მონაცემთა მოცულობა, რაც თავის მხრივ ამცირებს მისი დამუშავებისთვის აუცილებელ დროს და საჭირო კომპიუტერულ რესურსის რაოდენობას.

2.3. კორონული ხვრელების ბრუნვის მახასიათებლების შესწავლის მეთოდი

2.3.1. კორონული ხვრელების იდენტიფიკაცია; "სივრცითი ალბათობრივი კლასტერიზაციის ალგორითმი" (SPoCA-suite)

კორონული ხვრელები მკაფიოდ დაიკვირვება მზის EUV და რენტგენულ გამონასახებზე ჩაბნელებული არეების სახით. თუმცა მათი იდენტიფიკაცია საკმაოდ რთული ამოცანაა. ყველაზე მკაცრი მეთოდების გამოყენებითაც კი შესაძლებელია მათი 31 წყალბადის ბოჭკოებში არევა, რომლებიც მიუხედავად იმისა, რომ სრულიად განსხვავებულ მაგნიტურ სტრუქტურებს წარმოადგენს (Mackay et al. 2010; de Toma 2011), კორონული ხვრელების მსგავსად მუქ რეგიონებიად დაიკვირვება. ამ პრობლემის გადასაჭრელად საჭიროა ინფორმაცია სხვადასხვა ტალღის სიგრძის გამონასახებიდან, მაგნიტოგრამებიდან, ან კორონული ხვრელის კანდიდატის ფიზიკური პარამეტრების ევოლუციის დაკვირვება გარკვეული დროის განმავლობაში (Verbeeck et al., 2014).

კორონული ხვრელების ადრეული კვლევების დროს მათი იდენტიფიკაცია ხდებოდა გამოცდილი დამკვირვებლის მიერ ვიზუალურად. კორონული ხვრელების დეტექტირების თანამედროვე მეთოდები ძირითადად გამოსახულების ადაპტირებადი სეგმენტაციის (adaptive image segmentation) ალგორითმებზეა დაფუმნებული. ალგორითმი ცალკეული (ან რამდენიმე) გამონასახის ინტენსივობის მიხედვით გამოსახულებას ყოფს რამდენიმე გამოკვეთილ რეგიონად (მაგ. Aschwanden, 2010), როგორიცაა კორონული ხვრელები, აქტიური არეები და წყნარი კორონა. ინტენსივობის ბარიერის (threshold) მეთოდი კორონული ხვრელების დეტექტირების ყველაზე განვითრებული მეთოდია (Delouille et al., 2007; Kirk et al., 2009; Krista & Gallagher, 2009; Rotter et al., 2012), თუმცა ბოლო დროს ყურადღება ეთმობა კორონული წარმონაქმნების გეომეტრიული კლასიფიკაციის (Reiss et al., 2014) და "კონტროლირებული მანქანური სწავლების" (supervised machine learning) ალგორითმებსაც (Reiss et al., 2015).

კვლევაში ვიყენებთ მონაცემებს "სივრცითი ალბათობრივი კლასტერიზაციის ალგორითმი"-დან (the Spatial Possibilistic Clustering Algorithm – SPoCA-suite; Verbeeck et al., 2013, 2014). SPoCA-suite წარმოადგენს სეგმენტაციის პროცედურების ერთობლიობას, რომელიც ინტენსივობის დონის მიხედვით ახდენს გამონასახების მსგავს რეგიონებად (კორონული ხვრელები, აქტიური არეები და წყნარი კორონა) სეგმენტაციას.

SPoCA-suite ფუნქციონირებს 1997 წლიდან და სხვადასხვა კოსმოსური ობსერვატორიების (SOHO/EIT, STEREO/EUVI, PROBA2/SWAP, SDO/AIA) EUV გამონასახებზე დაყრდნობით ახდენს აქტიური რეგიონებისა და კორონული ხვრელების ლოკალიზაციას და დახასიათებას. 2011 წლიდან ის გვაწვდის მონაცემებს SDO/AIA-

დანაც. ნახაზზე 2.4 მოცემულია კორონის თავდპირველი გამოსახულება (მარცხნივ) და გამოსახულება SPoCA-suite-ის მიერ დეტექტირებული კორონული ხვრელებით (მარჯვნივ).



ర్వెర్వారం 2.4. నైదిగారంగ్ స్విరిదార్పోట్రకారం నైదిగారాల్లో కి సినిస్తాల్సారింగ్ నిల్లారిల్లో స్వార్యాల్ సినిస్ పైదిగారంగ్ స్విరిగార్ సినిగార్ సినిసి సిన సినిసి సినిసి

SPoCA-suite-ს ფუნქციონირებას უძღვება SDO-ს მოვლენათა დეტექტირების სისტემა (Event Detection System - EDS; Hurlburt et al. 2012) წარმონაქმნების მოძიების გუნდის პროქტის (Feature Finding Team project) ფარგლებში. SDO EDS ყოველ 4 საათში ერთხელ HEK-ის სისტემაში ტვირთავს SPoCA-suite-ს მიერ SDO/AIA 193 Å გამონასახებზე დაყრდნობით მიღებულ ინფორმაციას. HEK-ში ატვირთული ინფორმაცია მზის ფიზიკით დაინტერესებული საზოგადოებისთვის თითქმის რეალურ დროშია ხელმისაწვდომია გრაფიკული ინტერფეისის iSolSearch-ის, SSW/IDL-ის და JHelioviewer-ის ვიზუალიზაციის ხელსაწყოების საშუალებით.

2.3.2. კორონული ხვრელების კატალოგი

კორონული ხვრელების ბრუნვის კუთხური სიჩქარეების გამოსათვლელად გამოვიყენეთ ევროკომისიის მე-7 ჩარჩო პროგრამის მხარდაჭერით განხორციელებული პროექტის "მზის და კოსმოსური ამინდის კვლევის ქსელის" (Solar and Space Weather Network of Excellence - SOLSPANET) ფარგლებში შექმნილი კორონული ხვრელების კატალოგი. კატალოგი ეფუძნება HEK-ში განთავსებულ მონაცემებს და მოიცავს 2011-2015 წლების პერიოდს. SOLSPANET-ს ვებ გვერდზე (http://www.solspanet.eu) განთავსებული კორონული ხვრელების კატალოგის ნიმუში წარმოდგენილია ნახ. 2.5-ზე.

Coronal Holes Download CSV Download Excell													
« < Page 6099		All Years	*	All Months •	Clear filter 25 •								
4													
Start Time	End Time	HPC T		Area (Mm2)	Observatory	Obs Channel (Angstrom)	SpecificID	Image					
		Coord X	Coord Y										
2015-04-20T00:13:55	2015-04-20T04:13:55	435.57	- <mark>581.9</mark> 3	2420.82	SDO	AIA 193	SPoCA_v1.0_CH_0000020315						
2015-04-20T00:13:55	2015-04-20T04:13:55	210.89	-893.62	61728.40	SDO	AIA 193	SPoCA_v1.0_CH_0000020240						
2015-04-20T04:13:55	2015-04-20T08:13:55	-351.11	-859.67	36459.30	SDO	AIA 193	SPoCA_v1.0_CH_0000020372						
2015-04-20T04:13:55	2015-04-20T08:13:55	475.46	-221.41	18803.70	SDO	AIA 193	SPoCA_v1.0_CH_0000020295						
2015-04-20T04:13:55	2015-04-20T08:13:55	201.89	-896.84	59850.90	SDO	AIA 193	SPoCA_v1.0_CH_0000020240						
2015-04-20T08:13:55	2015-04-20T12:13:55	-350.93	-858 .4 4	41260.90	SDO	AIA 193	SPoCA_v1.0_CH_0000020372						
2015-04-20T08:13:55	2015-04-20T12:13:55	200.50	-897.95	58906.30	SDO	AIA 193	SPoCA_v1.0_CH_0000020240						
2015-04-20T08:13:55	2015-04-20T12:13:55	510.84	-220.56	17655.30	SDO	AIA 193	SPoCA_v1.0_CH_0000020295						

ნახაზი 2.5. კორონული ხვრელების კატალოგი (<u>http://www.solspanet.eu</u>).

კორონული ხვრელების კატალოგისათვის SSW-ის დახმარებით მოვძებნეთ და ჩვენთვის სასურველი ფორმატით შევინახეთ მითითებულ პერიოდში დაკვირვებული კორონული ხვრელების შესახებ არსებული სრული ინფორმაცია. მონაცემთა ბაზის შექმნის შემდეგ შევარჩიეთ კორონული ხვრელები, რომლებიც SPoCA-suite-ს გამოყენებით იყო დეტექტირებული. კატალოგი შეიცავს თითოეული კორონული ხვრელის ანასახის ისეთ მახასიათებელ პარამეტრებს, როგორიცაა: დაკვირვების მეთოდი, ობსერვატორია, დაკვირვების ინსტრუმენტის დასახელება, ტალღის სიგრძე, დაკვირვების დრო, ობიექტის აღმოჩენის მეთოდი, ობიექტის დასახელება, საიდენტიფიკაციო ნომერი, დაწყების დრო, დასრულების დრო, კორონული ხვრელის ფორმაზე მორგებული მრავალკუთხედის კუთხეების კოორდინატები, ცენტრის კოორდინატები, ფართობი და სხვა (http://www.lmsal.com/helio-informatics/hpkb/VOEvent_Spec.html). წარმოდგენილი კვლევისთვის გამოყენებული იქნა ის პარამეტრები, რომლებიც კორონული ხვრელების კუთხური სიჩქარის გამოთვლისთვისაა საჭირო. ესენია: კორონული ხვრელების საიდენტიფიკაციო ნომერი; კორონული ხვრელის მზის დისკოზე გამოჩენის და მიმალვის დრო; დაკვირვების განმავლობაში ობიექტის ცენტრის კოორდინატები (დეკარტის კოორდინატთა სისტემაში); კორონული ხვრელის ფართობი (პროექციის ეფექტი გამორიცხულია SPoCA-suite-ს მიერ; Verbeeck et al., 2014).

კორონული ხვრელების საშუალო კუთხური სიჩქარის გამოსათვლელად გამოვიყენეთ მონაცემები 2013 წლის 1-ლი იანვრიდან 2015 წლის 20 აპრილემდე. აღნიშნული პერიოდი შეესაბამება მზის 24-ე ციკლის მაქსიმუმს.

2.3.3. კორონული ხვრელების ბრუნვის კუთხური სიჩქარის გამოთვლის მეთოდი

კორონული ხვრელების ბრუნვის კუთხური სიჩქარე გამოვთვალეთ თითოეული კორონული ხვრელის მორგებული მრავალკუთხა პოლიგონის გეომეტრიული ცენტრის ადგილმდებარეობის ცვლილების მიხედვით. გეომეტრიული ცენტრის სიჩქარე ასახავს თავად კორონული ხვრელის სიჩქარეს. რადგან იგულისხმება რომ მისი ყველა ნაწილი დაახლოებით ერთნაირად გადაადგილდება მზის ბრუნვასთან ერთად.

კორონული ხვრელების ბრუნვის კუთხურ სიჩქარეს ვზომავთ ყოველ 4 საათში, რაც დროის საკმაოდ მცირე ინტერვალია იმისთვის, რომ მნიშვნელოვანი ცვლილებებს ჰქონდეთ ადგილი მის ფართობსა ან ფორმაში. თუმცა გვხვდება შემთხვევებიც, როცა ობიექტის ფართობი და ფორმა მნიშვნელოვნად იცვლება. ასევე შესაძლებელია 35 კორონული ხვრელი გაიყოს რამდენიმე ნაწილად ან შეუერთდეს სხვა ხვრელს. ასეთ მომენტებში ობიექტის გეომეტრიული ცენტრის სიჩქარე აღარ ასახავს აღნიშნული ობიექტის სიჩქარეს. ამიტომ ეს კონკრეტული შემთხვევები ცალკეული კორონული ხვრელის საშუალო კუთხური სიჩქარის გამოთვლისას გათვალისწინებული არ არის.

IDL პროგრამირების ენაზე ჩვენს გამოთვლები განხორციელდა მიერ განვითარებული კოდის გამოყენებით, რომელიც კორონული ხვრელების გეომეტრიული ცენტრის ჰელიოგრაფულ კოორდინატებზე დაყრდნობით ითვლის თვითოეული ობიექტის განედის გასწვრივ გადაადგილების კუთხურ სიჩქარეს. ბრუნვის კუთხური სიჩქარეები გამოთვლილია ±60° განედსა და გრძედს შორის. მზის ზედაპირი დავყავით 3.75 გრადუსი სიგანის მქონე 32 განედურ ზოლად. შესაბამისად, ანალიზი ჩავატარეთ 0-±3.75°, ±3.75-7.5°, ±7.5-11.25°, ... , ±56.25-60° განედური ზოლებისათვის. ანალიზი ჩატარდა ასავე სხვადასხვა ფართობების კორონული ხვრელების კლასიფიცირებული ჯგუფების მიხედვით: 10 000 მეგა მ²-ზე მცირე ზომის, 10 000-დან 40 000 მეგა მ²-მდე და 40 000 მეგა მ²-ზე დიდი ფართობის მქონე ობიექტებისთვის.

საბოლოოდ, გამოვთვალეთ 540 კორონული ხვრელის საშუალო კუთხური სინოდური სიჩქარე. სიდერული ბრუნვის სიჩქარის მისაღებად მოვახდინეთ სინოდური ბრუნვის სიჩქარის კორექტირება 0.9865 °/დღით (Wittmann 1996, Roša et al. 1995).

2.4. კორონული ჯეტებისა და მათთან დაკავშირებული კაშკაშა წერტილების შესწავლის მეთოდი

2.4.1. კორონული ჯეტების იდენტიფიკაცია

კორონული ჯეტების იდენტიფიკაცია მნიშვნელოვანი ამოცანაა, რადგან ჯეტების სრულყოფილი კატალოგი არ არის შექმნილი და HEK-ის მონაცემებთა ბაზებში მხოლოდ ცალკეული შემთხვევებია დაფიქსირებული. ამ დინამიური მოვლენის აღმოჩენისა და აღრიცხვისათვის საჭიროა გამონასახების თანმიმდევრულად დეტალური შესწავლა. კვლევისათვის გამოსადეგი კორონული ჯეტების მოძებნისა და იდენტიფიკაციისთავის

გამოვიყენეთ ევროპის კოსმოსური სააგენტოს (European Space Agency - ESA) სამეცნიერო ჯგუფის მიერ შექმნილი აპლიკაცია - JHelioviewer.

SDO-დან მიღებული მონაცემების გადმოწერა მათი დიდი მოცულობის და გადმოწერისთვის საჭირო დროის გამო პრობლემურია. მკვლევარებისთვის სერიოზული გამოწვევაა მონაცემებთან სწრაფი ეფექტური წვდომა, და დათვალიერეზის შესაძლებლობა და მისთვის საინტერესო მონაცემების მოძებნა. ამ პრობლემის გადასაჭრელად შეიქმნა JHelioviewer. JHelioviewer (Müller et al. 2017) წარმოადგენს მზის ობსერვატორიების (SOHO, STEREO, SDO სხვადასხვა და სხვ.) მონაცემების ვიზუალიზაციისთვის შექმნილ აპლიკაციას და ხელმისაწვდომია ნეზისმიერი დაინტერესებული პირისთვის. მომხმარებლებს JHelioviewer-ის დახმარებით შეუძლიათ ნებისმიერი პერიოდის მზის ვიზუალიზაცია 1991 წლის სექტემბრიდან დღემდე. ასევე შესაძლებელია სხვადასხვა მარტივი ოპერაციების შესრულება, როგორიცაა მზის რომელიმე წარმონაქმნის ევოლუციისთვის თვალის მიდევნება, სასურველი პერიოდის ვიდეოს შექმნა და სხვ.

JHelioviewer-ის გამოყენებით შევისწავლეთ მზის 193 Å ტალღის სიგრძის გამონასახების სერია 01/12/2015-დან 01/05/2016-მდე პერიოდისთვის. შევარჩიეთ კორონული ხვრელები, რომლებშიც მრავლად დაიკვირვებოდა კაშკაშა წერტილები და შესაბამისი ჯეტები. კორონული ხვრელები შერჩეული იყო მზის დისკოს ორივე ნახევარსფეროს ყველა არეში გარდა მზის კიდეებისა. შესაბამისად, კაშკაშა წერტილების და მათთან წარმოქმნილი ჯეტების დინამიკა შესწავლილი იქნა კორონულ ხვრელებში და მათ საზღვრებთან მზის თითქმის მთელ დისკოზე.

გამონასახების შესწავლის შემდეგ აღმოჩენილ იქნა რამდენიმე ათეული ჯეტის მსგავსი ტრანზიენტული დინამიკური მოვლენა. დამატებითი მკაფიო კრიტერიუმების გამოყენებით კვლევისათვის შერჩეული იქნა 23 ობიექტი, რომლებიც კარგად დაიკვირვება გამონასახებზე და შესამლებელი იყო მათი შემდგომი დამუშავება და მახასიათებელი პარამეტრების დადგენა. შერჩეულ მოვლენებს შორის არის რეკურენტული ჯეტებიც, რომელთა შემთხვევაში თითოეული ამოფრქვევა განხილულია

ცალ-ცალკე. შერჩეული კორონული ჯეტების კატალოგი წარმოდგენილი და აღწერილია თავში 4.1.

2.4.2. მონაცემების დამუშავების და ანალიზის მეთოდები

ჯეტებისა და მათთან დაკავშირებული კაშკაშა წერტილების შესწავლის მიზნით გამოვიყენეთ SDO/AIA 193 Å ტალღის სიგრძის გამონასახები. სხვადასხვა ტალღის სიგრძის გამონასახების შედარების მიზნით ერთი შერჩეული კორონული ჯეტისთვის (CJ1) აგრეთვე გამოყენებული იყო SDO/AIA 171 და 304 Å მონაცემები. CJ1-სთვის შევისწავლეთ SDO/HMI ფოტოსფერული მაგნიტოგრამებიც.

დაკვირვებითი მონაცემების დამუშავებისა და ანალიზის ერთიანი პროგრამული უზრუნველყოფა განხორციელდა SSW/IDL-ს საშუალებით. მონაცემთა ანალიზის პროცესში ასევე გამოყენებული იყო Matlab-ის ინსტრუმენტები. SSW/IDL საშუალებით გადმოვიწერეთ ყველა მოვლენის შესაბამისი FITS (Flexible Image Transport System) ფორმატის ფაილები. ფაილების დამუშავებისათვის განვავითარეთ პროგრომული კოდი, რომელიც უზრუნველყოფს aia prep.pro-ს გამოყენებით 1.0 დონის მონაცემების გადაყვანას 1.5 დონის მონაცემებად. aia_prep.pro SSW-ს სტანდარტული პროცედურაა და საჭიროა დაზიანებული პიქსელეზის კოსმოსური სხივების ეფექტის და კორექტირებისათვის, ასევე სხვა ტალღის სიგრძის მონაცემებთან სინქრონიზაციისთვის. შემდეგ ხდება rot_xy ფუნქციის გამოყენებით მზის ბრუნვის ეფექტის გამორიცხვა, საბოლოოდ კი ჯეტის შესაბამისი რეგიონის ამოჭრა და მისი მიმდევრობის შექმნა.

თითოეული ჯეტისთვის ამოვჭერით მაქსიმუმ 150X150 პიქსელის ზომის მატრიცები. ამოჭრილი რეგიონის არჩეული ზომა უნდა უზრუნველყოფდეს, რომ კაშკაშა წერტილი მუდმივად იყოს სრულად მოქცეული მოცემული ზომის მატრიცის ცენტრში, გამონასახზე ჩანდეს ჯეტის გამოფრქვევის პროცესი და მინიმუმადე იყოს დაყვანილი კადრში სხვა კაშკაშა ობიქტების მოხვედრის შესაძლებლობა.



ნახაზი 2.6. კაშკაშა წერტილის გამონასახების მიმდევრობა ჯეტის ამოფრქვევამდე და ამოფრქვევის პროცესში (CJ1).

საბოლოოდ მივიღეთ 23 გამოსახულების მიმდევრობა, რომელთა ხანგრძლივობა სხვადასხვაა და დამოკიდებულია ობიექტის სიცოცხლის ხანგრძლივობაზე. მიღებული მასალების საშუალებით დეტალურად შევისწავლეთ თითოეული გამონასახი (მაგ. ნახ. 2.6. რომელზეც წარმოდგენილია მხოლოდ 5 დროის მომენტი. თუმცა მთელი პროცესი რამდენიმე ასეულ კადრს მოიცავს), გამოვთვალეთ და შევაფასეთ მათი სხვადასხვა პარამეტრები, შევქმენით თითოეული კორონული ჯეტის სურათები და ვიდეოები.

2.4.3. კაშკაშა წერტილის ინტენსივობის ევოლუციის შესწავლის მეთოდი

კორონულ ჯეტთან დაკავშირებული კაშკაშა წერტილი ინტენსივობის ევოლუციის შესასწავლად შევქმენით თითოეული კორონული ჯეტისა და მისი შესაბამისი კაშკაშა წერტილის ორი სახის ინტენსივობის მრუდი. პირველი ტიპის მონაცემები (მონაცემთა წყება 1) შეიცავს კაშკაშა წერტილის ამოჭრილი მართკუთხა არის ყველა პიქსელის გამოყენებით მიღებულ საშუალო ინტენსივობებს. მეორე ტიპის მრუდის (მონაცემთა წყება 2) მისაღებად თითოეულ გამონასახის საშუალო ინტენსივობა გამოვთვალეთ მხოლოდ იმ პიქსელების გამოყენებით, რომელთა მნიშვნელობა მთლიანი მართკუთხა არის საშუალო ინტენსივობის მნიშვნელობაზე მაღალია. აღწერილი მეთოდი Chandrashekhar et al. (2013)-ის მიერ გამოყენებული მეთოდის მსგავსია, სადაც ავტორები კაშკაშა წერტილის EUV გამოსხივების შესაფასებლად ითვლიან თითოეული გამონასახის საშუალო ინტენსივობაზე მეტი სიკაშკაშის მქონე წერტილების მნიშვნელობათა ჯამს. ასეთი ხერხით მიღებულ საბოლოო მწიშვნელობებში არ შედის კაშკაშა წერტილის გარშემო არსებული დაბალი ინტენსივობის მქონე ხმაურის შემცველი რეგიონები.

შედეგად, მონაცემთა წყება 2-ში ფონის ხმაურის ეფექტი შემცირებულია და ტრანზიენტული შეშფოთებები უფრო მკვეთრად დაიკვირვება (ნახ. 2.7).



ნახაზი 2.7. კაშკაშა წერტილისა და კორონული ჯეტის ინტენსივობის ევოლუცია დროში (CJ5, CJ6).

თავი 3. კორონული ხვრელების სტატისტიკური მახასიათებლები

კორონული ხვრელების კვლევისას ჩვენი მთავარი ამოცანა იყო ამ ობიექტების ბრუნვის კუთხური სიჩქარეების განაწილების შესწავლა განედების და სხვადასხვა ფართობების კორონული ხვრელების კლასიფიცირებული ჯგუფების მიხედვით, ასევე ჩვენი მიზანი იყო კორონული ხვრელების ბრუნვის თავისებურებების შედარება ფოტოსფეროს და მზის შიდა ფენების ბრუნვის მახასიათებლებთან. დასახული მიზნების მისაღწევად აუცილებელი იყო შემდეგი ამოცანების გადაწყვეტა: კორონული ხვრელების იდენტიფიკაცია, კორონული ხვრელების კატალოგის შედგენა, სხვადასხვა ფართობის მქონე კორონული ხვრლების ბრუნვის კუთხური სიჩქარის განსაზღვრა, მიღებული შედეგების ანალიზი სხვადასხვა განედური ზოლების მიხედვით, კორონული ხვრლების მიღებული ბრუნვის მახასიათებლების შედარება მზის სხვადასხვა ფენების ბრუნვის განედურ პროფილებთან. მიღებული შედეგები გამოქვეყნებულია ჟურნალში Astronomy and Astrophysics (Statistical properties of coronal hole rotation rates: are they linked to the solar interior?; Bagashvili et al., 2017).

3.1. კორონული ხვრელების განაწილება განედის და ფართობების მიხედვით

შევისწავლეთ სხვადასხვა ფართობის მქონე კორონული ხვრელების მზის დისკოზე ფართობის გადანაწილების ხასიათი. დაკვირვებული ობიექტების მიხედვით ანალიზისათვის გამოვთვალეთ თითოეული მათგანის საშუალო ფართობი. ცალკეული ხვრელის ფართობი შეფასებულია ყოველ 4 საათში SPoCA-suite ალგორითმის მიერ (Verbeeck et al., 2014) და მისი მნიშვნელობები მოცემულია კატალოგში. მზის დისკოზე კორონული ხვრელების გადანაწილება შევისწავლეთ განედის მიხედვით. ნახაზზე 3.1 წარმოდგენილია საკვლევ პერიოდში დაკვირვებული ყველა 3056 კორონული ხვრელის ორგანზომილებიანი განაწილება. აბცისათა ღერძი შეესაბამება განედს, ხოლო ორდინატთა ღერძი კორონული ხვრელების საშუალო ფართობს. x ნიშნები აღნიშნავს

ცალკეულ კორონულ ხვრელს. შესწავლილ პერიოდში (მზის აქტივობის მაქსიმუმი) კორონული ხვრელები ყველა განედზე დაიკვირვება. მზის მინიმუმისგან განსხვავებით (de Toma, 2011), როდესაც ისინი მხოლოდ მაღალ განედებზე და პოლუსებთან გვხვდებიან.



ნახაზი. 3.1. კორონული ხვრელების განაწილება განედების და ფართობების მიხედვით 2013-2015 წლებში. x ნიშნები შეესაბამება ცალკეულ კორონულ ხვრელს.

კორონული ხვრელების კლასიფიკაცია ფართობის მიხედვით მოხდა სამ ჯგუფად შედარებით პატარა, საშუალ და დიდი ზომის კორონულ ხვრელებად, რაც შეესაბამება 10 000 მეგა მ²-მდე, 10 000-დან 40 000 მეგა მ²-მდე და 40 000 მეგა მ²-დან ფართობებს.

ნახაზი 3.2 უჩვენებს განაწილებას პატარა (3.2a, 674 ობიექტი), საშუალო (3.2b, 2263 ობიექტი), და დიდი (3.2c, 119 ობიექტი) კორონული ხვრელებისათვის. მიღებული განაწილების მთავარი მახასიათებელი არის ის, რომ პატარა ობიექტები, 2000 მეგა მ²-ზე ნაკლები ფართობით, არ დაიკვირვებიან ეკვატორულ ზონაში, რაც ცხადად ჩანს ნახ. 3.2aზე. ნახაზზე 3.2c ვხედავთ, რომ მოცემულ რეგიონში არ გვხვდება ექსტრემალურად დიდი კორონული ხვრელებიც. საშუალო ფართობის მქონე ობიექტების განაწილება შედარებით ერთგვაროვანია (ნახ. 3.2b).

შესწავლილ პერიოდში დაკვირვევებული კორონული ხვრელების განაწილებაში შეინიშნებოდა ჩრდილო-სამხრეთ ასიმეტრია. ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში დაახლოებით 1.48-ჯერ მეტი ობიექტი დაფიქსირდა (1822, 59.62 %) ვიდრე სამხრეთ ნახევარსფეროში (1234, 40.38 %). ზოგადად, კორონული ხვრელების ზომები საკმაოდ დიდ დიაპაზონში იცვლება, და ცალკეული ხვრელის ფართობმა შესაძლებელია მზის ზედაპირის ფართობის ერთ მესამედსაც მიაღწიოს. ჩვენ შემთხვევაში ყველაზე პატარა დაკვირვებული ობიექტიის ფართობი შეადგენდა 71 მეგა მ²-ს (მზის დისკოს ზედაპირის ფართობის 0.0012 %). ყველაზე დიდ წარმონაქმნს კი 203.257 მეგა მ² ის ტოლი ფართობი ჰქონდა (მზის დისკოს ზედაპირის ფართობის 9.24 %).



ర్వెక్వరం. 3.2. კორონული ხვრელების განაწილება ფართობთა ცალკეული ჯგუფების მიხედვით 2013-2015 წლებში. (a) - კორონული ხვრელები, რომელთა საშუალო ფართობი 10 000 მეგა მ²-ზე ნაკლებია; (b) - კორონული ხვრელები საშაულო ფართობით 10 000-დან 40 000 მეგა მ²-მდე; (c) - 40 000 მეგა მ²-ზე დიდი ფართობის მქონე კორონული ხვრელები.

საკვლევ პერიოდში რეგისტრირებული 3056 ობიექტიდან ბრუნვის კუთხური სიჩქარეების გამოთვლისთვის შეირჩა 540 ობიექტი. შერჩევისას ვიხელმძღვანელეთ შემდეგი კრიტერიუმებით: (i) ისინი უნდა მდებარეობდნენ მზის ცენტრიდან განედის და გრძედის ±60°-ის ფარგლებში; (ii) სიცოცხლის ხანგრძლივობა უნდა ყოფილიყო მინიმუმ 12 საათი (რათა გვქონოდა თუნდაც რამდენიმე გაზომვის ჩატარების საშუალება); (iii) დაკვირვების პერიოდში ობიექტის ფორმა და ფართობი მნიშვნელოვნად არ უნდა შეცვლილიყო.

შერჩეული კორონული ხვრელების განედური განაწილება არ არის ერთგვაროვანი (ნახ. 3.3) და მსგავსია ნახ. 3.1-ზე წარმოდგენილი ყველა კორონული ხვრელის განაწილებისა. მიუხედავად იმისა, რომ ანალიზი ჩატარდა საკმაოდ ვიწრო 3.75°-ის ტოლ განედურ ზოლებში, თითოეულ ზოლში მინიმუმ 4 ობიექტი იყო მოთავსებული. ამასთან 10-ზე ნაკლები კორონული ხვრელი მხოლოდ 6 განედურ ზოლში იქნა შესწავლილი.



ნახაზი 3.3. შერჩეული 540 კორონული ხვრელის განაწილება განედების და ფართობების მიხედვით.



ნახაზი 3.4. შესწავლილი კორონული ხვრელების განაწილება განედური ზონების მიხედვით. (a) - კორონული ხვრელები, რომელთა საშუალო ფართობი 10 000 მეგა მ²-ზე ნაკლებია; (b) - კორონული ხვრელები საშუალო ფართობით 10 000-დან 40 000 მეგა მ²-მდე; (c) - 40 000 მეგა მ²-ზე დიდი ფართობის მქონე კორონული ხვრელები.

ფართობთა ჯგუფების მიხედვით განედური განაწილება წარმოდგენილია ნახ. 3.4ზე. 10000 მეგა მ²-ზე ნაკლები ფართობის მქონე წარმონაქმნების განაწილება ყველა კორონული ხვრელის განაწილების მსგავსია. ისინი წარმოადგენენ დაკვირვებული ობიექტების უმრავლესობას. კორონული ხვრელების საერთო რიცხვის დაახლოებით 53% მოთავსებულია ამ კატეგორიაში (285 CHs, ნახ. 3.4a). საერთო ჯამში 195 საშაულო ზომის კორონული ხვრელი იქნა შესწავლილი ყველა განედურ ზოლში (ნახ. 3.4b). 40 000 მეგა მ²ზე დიდი ზომის კორონული ხვრელები ყველაზე იშვიათია. მხოლოდ 60 ობიექტი მოხვდა ამ კატეგორიაში. 32-დან 13 განედურ ზოლში ვერ მოხდა კორონული ხვრელების ბრუნვის კუთხური სიჩქარეების შეფასება. (ნახ. 3.4c).

3.2. სხვადასხვა ფართობის მქონე კორონული ხვრელების ბრუნვის პროფილები

შერჩეული კორონული ხვრელებისათვის 2.3.3 თავში აღწერილი მეთოდის გამოყენებით გამოთვლილი იქნა ბრუნვის კუთხური სიჩქარეები. მიღებული შედეგების საფუძველზე აგებული იქნა სხვადასხვა ფართობის მქონე კორონული ხვრელების ბრუნვის განედური პროფილები მზის როგორც ჩრდილოეთ, ისე სამხრეთ ნახევარსფეროებისათვის (ნახ. 3.5).

ნახაზი 3.5-ზე წარმოდგენილია კორონული ხვრელების ბრუნვის პროფილები ყველა (540 კორონული ხვრელი), პატარა, საშაულო და დიდი ზომის კორონული ხვრელებისათვის. ნახაზებზე აგრეთვე დავიტანეთ ორი სხვადასხვა მეთოდით მიღებული ფოტოსფეროს ბრუნვის პროფილი: პირველი ჰელიოსეისმოლოგიური მეთოდებით მიღებული (Schou et al., 1998; შავი წყვეტილი წირი) და მეორე, დოპლერის წანაცვლებით მიღებული შედეგები (Snodgrass & Ulrich, 1990; შავი წერტილოვან-წყვეტილი წირი). შავი ვარსკვლავებით აღნიშნულია მოცემულ განედურ ზოლში კორონული ხვრელების ბრუნვის საშუალო კუთხური სიჩქარე. წითელი და ლურჯი მრუდები აგებულია ჩვენს მიერ დამუშავებულ დაკვირვებით მონაცემებზე პარაბოლური წირის (A+Bsin²(θ)+Csin4(θ), ფორმულა არის ემპირიული და გამოიყენება სტანდარტულად მზის ბრუნვის შესწავლისას) მორგების საშუალებით და შეესაბამება კორონული ხვრელების ბრუნვის განედურ პროფილს ჩრდილოეთ (ლურჯი) და სამხრეთ (წითელი) ნახევარსფეროებში



(ნახ. 3.5). მორგების შემდეგ მიღებული კოეფიციენტების მნიშვნელობები მოცემულია ცხრილში 1.

ნახაზი 3.5. კორონული ხვრელების სიდერული ბრუნვის სიჩქარეები 3.75° სიგანის 32 შესაბამისი მორგებული განედური ზონისათვის, Сs ിട്ടാറ *പ്രപ്പെ*യാറ്റെ ორივე ნახევარსფეროსათვის ცალცალკე. შავი წყვეტილ-წერტილოვანი მრუდი ფოტოსფეროს ത്രന്ട്രാന്ത്രി പ്രാമ്യ്യാന്ത്രാന് പ്രാമ്യ്യാന് മുന്നു പ്രാമ്യ്യാന് പ്രാമ്യ്യാന് പ്രാമ്യ്യാന് പ്രാമ്യ്യാന് പ്രാമ്യം പ წყვეტილი მრუდი - ფოტოსფეროს ჰელიოსეისმოლოგიური დაკვირვებებით მიღბული ชัตราชีวุกษ บกหารทุ่ (Schou et al., 1998). สีงวุก วุงศ์ปรุวตางวุกชิก - วุศศุกษรราชกา ชุวุตาชุกษาชิกษ หิวุกษีป მიერ გაზომილ ბრუნვის საშუალო კუთხური სიჩქარე შესაბამის განედზე. წითელი - კორონული ხვრელების ბრუნვის დაკვირვებული პროფილი სამხრეთ *მრუდი* ნახევარსფეროში, ლურჯი მრუდი - ბრუნვის პროფილი ჩრდილოეთ ნახავარსფეროში. (a) - კორონული ხვრელები, რომელთა საშუალო ფართობი 10 000 მეგა მ²-ზე ნაკლებია, მისი შესაბამისი ცდომილებაა 0.07 °/დღე (2.25 nHz); (b) - კორონული ხვრელები საშაულო ფართობით 10 000-დან 40 000 მეგა მ²-მდე, ცდომილება=0.1 °/დღე (3.22 nHz); (c) - 40 000

∂ეგა ∂²-ზე დიდი ფართობის ∂ქონე კორონული ხვრელები, ცდომილებაა 0.09 °/დღე (2.89 nHz); (d) - ყველა 540 კორონული ხვრელისათვის მიღებული შედეგები, ცდომილებაა 0.07 °/დღე (2.25 nHz). სტანდარტული ცდომილება ფართობთა თითოეული ჯგუფისათვის გამოთვლილია ფორმულით σ/v/N, სადაც σ სტანდარტული გადახრაა, N - ჯგუფში შემავალი ობიექტების რაოდენობაა.

ცხრილი 1. Α, Β და C კოეფიციენტების მნიშვნელობები კორონული ხვრელების სიდერული ბრუნვისათვის. კოეფიციენტები მიღებულია მონაცემების A+Bsin²(θ)+Csin⁴(θ) ნიმუშის მიხედვით მორგების შედეგად. ყველა კოეფიციენტი მოცემულია °/დღეში.

კოეფ.	სამხ. ნახ. ჩრდ. ნახ.		სამხ. ნახ.	ჩრდ. ნახ.	სამხ. ნახ.	ჩრდ. ნახ.	სამხ. ნახ.	ჩრდ. ნახ.
	ყველა CHs	ყველა CHs	პატარა CHs	პატარა CHs	საშუალო CHs	საშუალო CHs	യറയറ CHs	დიდი CHs
Α	14.07	13.94	14.18	13.83	14.05	14.09	13.31	13.28
В	-0.48	-0.92	-1.74	0.91	-0.24	-2.86	0.26	1.21
С	-1.71	-0.27	0.99	-2.49	-1.4	3.18	-1.66	-3.33

ნახაზებზე 3.5a და 3.5b წარმოდგენილია პატარა და საშუალო ზომის კორონული ხვრელების ბრუნვის პროფილები. ორივე შემთხვევაში ბრუნვის დიფერენციული ხასიათი ფოტოსფეროსთან შედარებით ნაკლებადაა გამოხატული. ეკვატორულ არეში მათი ბრუნვის კუთხური სიჩქარე ფაქტობრივად იდენტურია და შეადგენს 14.04-14.25 (± 0.07) °/დღეს პატარა კორონული ხვრელების და 14.27-14.08 (± 0.1) °/დღეს საშუალო კორონული ხვრელების შემთხვევაში. მაღალ განედებზე სიჩქარე მნიშვნელოვნად ეცემა და ± 50 -60° განედურ ზონაში მერყეობს დაახლოებით 11.85-13.55 (± 0.07) °/დღე შუალედში.

ნახაზზე 3.5c წარმოდგენილია დიდი კორონული ხვრელებისათვის მიღებული შედეგები. ამ შემთხვევაში, შესასწავლი ობიექტების მცირე რაოდენობის გამო, ყველა გენედურ ზოლში არ გვაქვს წარმოდგენილი კუთხური სიჩქარეების მნიშვნელობები. რის გამოც დიდი კორონული ხვრელების ბრუნვის პროფილი არასრულყოფილია და ეკვატორულ რეგიონში ფაქტიურად ცარიელია. თუმცა, არსებული მონაცემების შეფასების შედეგად ვხედავთ, რომ ყველაზე დიდი ზომის კორონული ხვრელების სიჩქარე ჩამოუვარდება დანარჩენი ობიექტების ბრუნვის სიჩქარეს - არც ერთ განედურ ზოლში მათი კუთხური სიჩქარე არ აღემატება 13.60 °/დღეს.

ნახაზზე 3.5d მოცემულია ყველა ობიექტისათვის მიღებული ბრუნვის კუთხური სიჩქარეების მნიშვნელობები და პროფილი. ეკვატორის მიდამოში სიჩქარე დაახლოებით 14.15 (± 0.07) °/დღეა (ბრუნვის პერიოდია 25.5 დღე). ეს მნიშვნელობა პოლუსებისკენ თანდათან ეცემა, და $\pm 50-60$ ° განედურ ზოლში ბრუნვის კუთხური სიჩქარე უკვე 12.82 (± 0.07) °/დღეა სამხრეთ ნახევარსფეროში და 12.9 (± 0.07) °/დღე ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში (ბრუნვის პერიოდი - 28.1-27.9 დღე). ყველა კორონული ხვრელის ბრუნვის საშუალო კუთხური სიჩქარე შეადგენს 13.86 (± 0.05) °/დღეს.

3.3. კორონული ხვრელების ბრუნვის პარამეტრების შედარება მზის სხვადასხვა ფენების ბრუნვის პროფილებთან

კორონული ხვრელების ბრუნვის მიღებული პროფილების მზის სხვა ფენების ბრუნვის მახასიათებლებთან შესადარებლად გამოყენებული იქნა სხვა ავტორების მიერ სხვადასხვა მეთოდით მიღებული შედეგები. კერძოდ, ფოტოსფეროს მონაცემებთან შესადარებლად გამოყენებული იქნა - Snodgrass & Ulrich-ის (1990) მიერ დოპლერის წანაცვლებით 1967-1987 წლების მონაცემებზე დაყრდნობით მიღებული შედეგები; ხოლო ფოტოსფეროს ქვემოთ მდებარე ფენების ბრუნვის მახასიათებლებთან შესადარებლად -Schou et al. (1998)-ის მიერ ჰელიოსეიმოლოგიური დაკვირვებებით მიღებული მონაცემები.

ნახაზ 3.5-ზე წარმოდგენილი თითოეული მრუდი მიუთითებს, რომ კორონული ხვრელების ბრუნვის პროფილები განსხვავდება ფოტოსფეროს ბრუნვის მრუდებისგან. კორონული ხვრელების ბრუნვა ატარებს ნაკლებად დიფერენციულ ხასიათს. ეკვატორულ არეში ის შეესაბამება ჰელიოსეისმოლოგიურ კვლევებზე დაყრდნობით მიღებულ ფოტოსფეროს ბრუნვას. 30-40° განედს ზემოთ მათი სიდერული კუთხური სიჩქარე აღემატება ფოტოსფეროში დაკვირვებულ მნიშვნელობებს.

ჰელიოსეისმოლოგიური კვლევების შედეგები ორივე ნახევარსფეროსთვის ერთად არის წარმოდგენილი. ამიტომ, კორონული ხვრელების ბრუნვის პროფილების შედარებისას მზის შიდა ფენების ბრუნვის პროფილებთან არ გვაქვს გამოყოფილი

ჩრდილოეთ და სამხრეთ ნახევარსფეროები. საერთო ჯამში შევადარეთ 3.75° სიგანის მქონე 16 განედური ზოლში გამოთვლილი კორონული ხვრელების საშუალო კუთხური სიჩქარეები იგივე განედურ ზოლში მიღებულ მზის შიდა ფენების ბრუნვის სიჩქარეების მნიშვნელობებს 0.6-დან 1 R_{\odot} -მდე. ამისათვის ავაგეთ ნახაზები თითეული განედური



ზოლისათვის, სადაც დატანილია მოცემულ განედურ ზოლში მზის შიდა ნაწილის ბრუნვის რადიალური პროფილი და იგივე განედურ ზოლში კორონული ხვრელების ბრუნვის საშუალო კუთხური სიჩქარე. მათი გადაკვეთის წერტილი აღნიშნავს სიღრმეს, სადაც მზის შიდა ნაწილი ბრუნავს იგივე სიჩქარით როგორც კორონული ხვრელები. ნახ. 3.6-ზე მოცემულია მაგალითები 0, 20°, 40° და 60° განედის შესაბამისი რეგიონებისათვის.

მომდევნო ნახაზზე (ნახ. 3.7) წარმოდგენილია თითოეული განედისათვის მიღებული მნიშვნელობები (აღნიშნულია ვარსკვლავებით), რომელიც ასახავს მზის სიღრმეს სადაც მოცემულ განედურ ზოლში მზის შიდა ნაწილი ბრუნავს იმავე სიჩქარით როგორც კორონული ხვრელები მზის კორონაში. ეს მნიშვნელობები იცვლება 0.62-დან 0.85 R_{\odot} -მდე, საშუალოდ შეადგენს 0.71 (±0.014) R_{\odot} -ს, რაც დაახლოებით ემთხვევა კონვექციური ზონის მირის და ტახოკლინის მდებარეობას.



ర్వారు చి.7. స్వెరెంగం సాగగార్నాలా ర్విగ్సుల్సారిటు యి రిరింట్ రెంయు బ్రార్సరిట్ రౌగుంట్. వెంగట్యెక్తాలు వ్రార్ పల్లర్ రోర్రాలు రోలు టంలాగర్ని, టుయ్య ర్నొట్యరికి రెంటు వ్రార్థుల్ని రెరింట్ రెంయు ర్యోంలాం రిగ్నార్యు రెంట్యా టంగ్రెస్త్రగ్రాలు గాష్ట్రింగ్లు స్వార్ స్వార్ స్వార్సుల్సారిం. క్రోక్రవ్రిత్రం దొవివాం రాష్ట్రంలు రాష్ట్రాలు రోర్యార్ట్రిల్లాలికి గ్రార్యాలింలాం రెవిరాం కిరింగం - ట్రిపర్యంగు ప్రాలుం ప్రార్థులు రాష్ట్రంలు స్రార్యాలు సింగం ప్రార్యార్లు సార్యాలు స్రార్యాలు స్రార్యంలు సింగం - సిర్రింగ్ రాలు సిరింగం సింగింలు సింగం సిరింగం సింగం సి

თავი 4. კორონული ხვრელებში წარმოქმნილი ჯეტების პარამეტრები და ევოლუცია

კორონული ჯეტების შესწავლისას ჩვენი მთავარი მიზანი იყო კორონული ხვრელებში და მათ საზღვრებთან წარმოქმნილი ჯეტების დინამიკის კვლევა, კორონული კაშკაშა წერტილების ინტენსივობის ევოლუციის შესწავლა. დასახული მიზნების მისაღწევად უნდა გადაჭრილიყო შემდეგი ამოცანები: კორონის EUV გამონასახებიდან კაშკაშა წერტილების და კორონული ჯეტების იდენტიფიკაცია; მათი საშუალო ინტენსივობის მრუდების, EUV გამონასახებისა და ვიდეოების შექმნა; კორონული ჯეტების პარამეტრების შეფასება; კორონულ ჯეტებთან დაკავშირებული კაშკაშა წერტილების საშუალო ინტენსივობის დროზე დამოკიდებულების შესწავლა; შედეგების სტატისტიკური მეთოდით შეფასება. მიღებული შედეგები გამოქვეყნებულია ჟურნალში The Astrophysical Journal Letters (Evidence for Precursors of the Coronal Hole Jets in Solar Bright Points; Bagashvili et al., 2018)

4.1. კორონული ჯეტების პრეკურსორები

შესწავლილი 23 შემთხვევიდან 9 წარმოადგენდა ერთჯერად ჯეტს, ხოლო დანარჩენი რეკურენტულ ჯეტს. ინტენსივობის მრუდების შესწავლისას რეკურენტული ჯეტების თითოეულ გამოფრქვევის პროცესს განვიხილავთ როგორც ცალკე შემთხვევას.

შემთხვევათა აბსოლუტურ უმრავლესობაში დავაფიქსირეთ კაშკაშა წერტილის სიკაშკაშის მატება, რაც რამდენიმე წუთით უსწრებს კაშკაშა წერტილის ინტენსივობის პიკს და ჯეტის მთავარ გამოფრქვევას. თითოეულ შემთხვევაში კორონული ჯეტისა და კაშკაშა წერტილის საშუალო ინტენსივობის ევოლუცია მსგავსია და ვითარდება შემდეგი სცენარით: კაშკაშა წერტილის ინტენსივობაში მუდმივად დაიკვირვება რხევები და შეშფოთებები, უშუალოდ ჯეტის გამოფქვევის წინ კი თითქმის ყველა შემთხვევაში გვაქვს ინტენსივობის მატება, შემდეგ კლება, რასაც მოსდევს ინტენსივობის მკვეთრი მატება - მთავარი ამოფრქვევა. მთავარი ამოფრქვევის წინ კაშკაშა წერტილის საშუალო ინტენსოვობაში დაფიქსირებულ შეშფოთებებს განვიხილავთ როგორც ჯეტის პრეკურსორს (ნახ. 4.1, 4.2). შესწავლილი 23 შემთხვევიდან პრეკურსორი დაფიქსირებული იქნა 20 შემთხვევაში.



ర్వెరికరా 4.1. గ్రార్యా స్లాగులం స్లాగులో స్లాలం స్ల్రాలింగ్ రెర్ర్రిరిగ్రాలింగ్ రిర్రార్థులు రెర్ర్యాలు రాష్ట్రి (CJ1). CJ1-ంగ పరిగాజ్రో శ్రివ్రివికి రాష్ట్రిలు 2015 గోలాంగ్ 9 ర్యుప్రిరిర్రిగు 17:28 UT. రెక్ లార్రిలు పెర్స్రాలం ప్రొస్ట్రాలు పర్స్రాలం స్ట్రాలం స్రాలం స్ట్రాలం స్రాలం స్ట్రాలం స్రాలం స్ట్రాలం స్రాలం స్రాం స్రాలం స్రా స్రాలం స

შესწავლილ ჯეტებში გამოყოფილი გვაქვს სამი კატეგორია: ერთჯერადი, რეკურენტული და ისეთი ჯეტები, რომლის ამოფრქვევის წინ ინტენსივობის მნიშნელოვანი შეშფოთება არა იყო დაკვირვებული. მოცემულ სადისერტაციო ნაშრომში თითოეული კატეგორიიდან წარმოდგენილი გვაქვს თითო საილუსტრაციო მაგალითი.

ნახაზ 4.1-ზე წარმოდგენილია ერთჯერადი ჯეტის შემთხვევა (CJ1). CJ1 დაიწყო 2015 წლის 9 დეკემბერს, 17:18 UT. ნახაზ 4.1-ის ზედა პანელზე კაშკაშა წერტილის ინტენსივობის მატება შეინიშნება ჯეტის ამოფრქვევამდე რამდენიმე წუთით ადრე. საშუალო ინტენსივობის ორივე მოცემულ მრუდზე (მონაცემთა წყება 1 (მრუდის წითელი ნაწილი) და მონაცემთა წყება 2 (მრუდის ლურჯი ნაწილი)) პრეკურსორის არსებობა ცხადად ჩანს. პრეკურსორი კომპლექსურია და შეიცავს რამდენიმე შეშფოთებას. აღმვრის ხანგრძლივობად მივიჩნევთ კაშკაშა წერტილის ინტენსივობის შეშფოთებაში არსებულ პირველ ყველაზე მაღალ პიკს. ის გამოვითვალეთ აღიშნულ პიკზე მორგებული გაუსის ფუნქციის ნახევარსიგანის შეფასებით და შეადგენს 1.75/1.28 წუთს (მონაცემთა წყება 1/მონაცემთა წყება 2). CJ1-ob დაწყებამდე პრეკურსორის სრული ევოლუცია მიმდინარეობდა 9.4/9.8 წუთის განმავლობაში. მთავარი ჯეტის ხანგრძლივობა გამოვითვალეთ მის შესაბამის პიკზე მორგებული გაუსის ფუნქციის ნახევარსიგანის შეფასებით და შეადგენს 7.16/8.13 წუთს (ცხრ. 2 – CJ1).

ნახაზ 4.2-ზე წარმოდგენილია CJ1-ის SDO/AIA 193 Å გამონასახები: პანელ (a)-ზე წარმოდგენილია კორონულ ხვრელში არსებული კაშკაშა წერტილი დროის იმ მომენტში, როდესაც ჯეტის ტიპის არამდგრადობა ან საშუალო ინტენსივობის მნიშვნელოვანი მომატება ჯერ არ დაიკვირვება (17:17 UT); პანელი (b) -ზე 17:19 UT დაიწყო კაშკაშა წეტილის ინტენსივობის გაზრდა, რომელიც პიკს აღწევს მომდევნო (c) პანელზე 17:20 UT; პანელ (d)-ზე დაახლოებით 17:28 UT დროისათვის პრეკურსორი დასრულებულია, მაგრამ ჯეტის ამოფრქვევის ნიშნები ჯერ არ შეინიშნება; 17:28:30 UT-დან სტრუქტურაში იწყება დესტაბილიზაცია, დაიკვირვება კაშკაშა წერტილის მარყუჟიდან ბოჭკოს მსგავსი მუქი წარმონაქმნის მომრაობა (პანელი (e)) და ჯეტის ტიპის არამდგრადობა; კორონული ჯეტის სრულად განვითარება გამოსახულია პანელებზე (f), (g), (h), სადაც დაიკვირვება კაშკაშა

წერტილის ქვედა მარჯვენა კიდის მიმართულებით გავრცელებული პლაზმის ფართო ნაკადი, რომელიც სრულდება დაახლოებით 17:42 UT-ზე (პანელი (i)).



ర్వక్ 4.2. CJ1-ంს ్రవ్రాధాత్రాద్రంస్ - SDO/AIA 193 Å და SDO/HMI త్రాంతార్రాత్రాత్రాత్రం రెవ్మర్ స్రాత్ సిర్మిలింగ్ ప్రాంత్రం స్రాత్రంగ్ లో స్రాత్రంగ్ లో సిల్లం స్రాత్రంగ్ స్రామిలింగి స్రామిలింగి స్రామిలింగి స్రామిల్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రామిలింగి స్రామిలింగి స్రామాలం స్ర స్రామిల్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగి స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రామిలింగి స్రామాలం స్రా స్రామిల్ స్రాత్రంగ్ (a) - స్రోస్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగి స్రాత్రాత్రంగ్ (b) - పెళ్ళప్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్ స్రాత్రంగ్ (c) - పెళ్ళప్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగా సెళ్ళప్రాత్రంగి స్రాత్రంగి స్రాత్రంగ్ (d) - థిళాగార్ సిత్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగా స్రాత్రంగి స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రోత్రంగ్ (c) - పెళ్ళప్రాత్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్ర స్రాత్రంగి స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగి స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రోత్రంగ్ సాతర్రాటింగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రంగ్ స్రాత్రాత్రంగిన్ సాత్రంగింగ్ స్రాత్రంగ్ (f), (g), (h) - స్ట్రాత్రంగు పరిగాత్రాశ్రంగింగ్ స్రాత్రంగ్ (i) - స్ట్రాత్రం టిళాత్రాత్రారింగిం.



కుపెపిరిగి 4.3. టిర్రెపెర్రుటిర్రెపె త్రిపాల్లాంట్ టర్నిగర్నిలేగ్ గ్రోహీరీగాయ్రెస్ రోపిగర్గి ప్రోస్తర్సి కొనిగిత్రంత్రాలు కొందిల్రొలేగి స్ప్రైలింట్ పరిగాత్రాశ్వర్త్యాంట్ పెరార్యాల్లిటింగ్ (CJ1). ర్నీయ్ టవిగి గంస్రెలెగ్ గ్రోహీరీగాయ్రెస్టర్ కారాన్ SDO/AIA 193, 304 యై 171 Å త్రిపాల్లాంట్ టర్నెగరేంట్ స్రిపెరిగికు యైప్ SDO/HMI త్రార్రాలు కొండిల్ త్రిగ్రాల్లాం టెస్టర్గ్రోత్స్ స్రోహ్లాం స్రోహ్లాలం స్రోహ్లాలం స్రోహిరిగాయ్రెస్టర్ లు SDO/HMI త్రార్రాలం స్రోహ్లాలం టెస్టర్గ్రోత్స్ స్రోహ్లాలం ప్రోహ్లాలం స్రోహ్లింగ్ స్ప్రేటిపిక్రికింట్ యైల్లింగాలు SDO/HMI త్రార్రాలం స్రోహ్లాలం స్పోహ్లాగ్ యై క్రహిర్రాలం ప్రోహ్లాలు ప్రోహ్లార్స్ స్పోహ్లం స్పోహ్లిగింది రాంగ్రహ్లింగా య్ క్రాంగ్ క్రార్స్ స్రార్లం స్రోహ్లింగ్ స్పోహ్లిగింగా స్పోహ్లాలం స్పోహ్లింగ్ స్పోహ్లింగ్ స్పోహ్లిలు స్పోహ్లాలు స్రోహ్లింగ్ స్పోహ్రాలు ప్రోహ్లార్సి. పెర్సోహిం (ఇ) - పోగ్రహ్రోగ్రహింగార్ఫ్ పోర్స్హోంటాగాంట్ టెస్హోహ్లిస్ స్పోహ్లాం (ఐ) -సోగ్రహ్రోలిగాగం స్పోహ్రాలు స్పోహ్రాలం స్పోహ్రాలం (ఐ) - పోగ్రహ్రాలు కొన్నపోరాలు స్పోహ్లింగి స్పోహ్రాలం (ఐ) -సోగ్రహ్రోట్లు స్పోహ్రాలం స్పార్స్ సెపర్సోహిం (c) - యోగాంట్ రోపిర్రోస్తిం పెర్సహ్రాం (d) -సోగ్రహ్రోలుగాగంట్ ట్రాహ్రహ్రేహ్రిస్ సెపర్సోహిం స్పోర్సింట్ స్పర్రిలం పరిర్రహ్రిస్ పెర్సోహ్రం (ర) -సోగ్రహ్రోట్లు స్పోహ్రాలం స్పార్స్ సెక్ స్రోహ్రం (ర) - యోగాంట్ ప్రిస్రోహిర్స్ స్పోహ్రాం (ర) -సోగిస్హోరిటాగంల్ ట్రాహ్రహ్రాల్స్ స్పోహ్రాం (ల) - పోస్రహ్రాలం స్పోర్రంట్ రెంపోర్సిసిం: సెకర్సోలాం (ర) -సోసిపోర్రాం గాయ్రిటిక్ స్రోహ్రిల్సాన్ ప్రోహ్రాలు స్పోర్స్ ప్రోహిం స్పోర్రాలం స్పోర్రంట్ స్పోర్స్ స్పోలం స్పోర్సార్సి స్పోర్సాలు స్పోహ్రాలు స్పోర్సాలు స్పోహ్రాలం స్పోర్సిల్ స్పోర్సిల్ స్పోహ్రం స్పోర్సాలు స్పోర్సార్సిస్ సిరిలాలం స్పోర్సార్సిల్లాలు స్పోహ్రాలం స్పోర్సాలం స్పోర్సిల్స్ స్పోర్రాల్ స్పోర్రాల్ స్పోర్రాలం స్పోర్ సిరిలాం స్ స్రోహ్రాల్ స్పోర్సాల్లం స్పోహిలం స్పోహిరిల్ స్పోర్స్ స్పోర్ స్పోర్లాలం స్పోర్లాలం స్పోర్ స్పోర్స్ స్రార్ స్రాలం స్రోర్స్ స్రార్ స్ స్రహిల్ స్పోర్లాలం స్రార్లాల్ స్పోర్రాలం స్పోర్రాలం స్ స్రోర్లంలు స్ స్రోహ్రాల్ స్పోర్లంలు స్రోర్లంలు స్రోర్లంల్ స్ స్రార్ స్రాలం స్రార్లాల్ స్రార్లంలు స్ స్రార్లంలు స్రోర్ల్ స్రాల్లం స్

CJ1-სათვის დამატებით შევისწავლეთ SDO/AIA-ს 304 და 171 Å ტალღის სიგრძის მონაცემები. ნახაზ 4.3-ზე წარმოდგენილია CJ1-ის გამონასახები, რომელიც შექმნილია SDO/AIA-ს 193, 304 და 171 Å ტალღის სიგრძის მონაცემებიდან და SDO/HMI-ს ფოტოსფერული მაგნიტოგრამებიდან. ზედა სამი რიგი მიღებულია SDO/AIA-ს 193, 304 და 171 Å ტალღის სიგრძის გამონასახებისა და SDO/HMI-ს ფოტოსფერული მაგნიტოგრამების კომბინაციით, ხოლო ქვედა რიგი შეესაზამეზა SDO/HMI-ს ფოტოსფერულ მაგნიტოგრამებს. ლურჯი და ყვითელი წირებით მითითებულია მაგნიტური ველის დადებითი და უარყოფითი პოლარობები. ყველა გამონასახზე შეგვიძლია დავინახოთ, რომ კაშკაშა წერტილის ცენტრში გვხვდება მცირე ბიპოლარული ჩაკეტილი მაგნიტური ველის სტრუქტურა (პატარა ყვითელი და ლურჯი კონტურები), რომელიც ჩამაგრებულია ფოტოსფეროში და კორონაში გრძელდება მცირე მაგნიტური მარყუჟის სახით. გარდა ამისა, ჩანს, რომ კორონული მარყუჟის ფეხები შემოსაზღვრულია მახლობლად განლაგებული სხვა მაგნიტური ველის კონცენტრაციის არეებით. აღნიშნული სხვადასხვა პოლარობის მქონე მაგნიტური ველის რეგიონები საკმაოდ ახლოს არის ერთმანეთთან განლაგებული და ასევე ჩამაგრებულია კორონული ხვრელების გლობალურ მაგნიტურ ველში, რომელიც ამ ჯეტის შემთხვევაში არის დადებითი პოლარობის მქონე. ნახაზ 4.3-ზე ნათლად ჩანს, რომ 193 Å-ში დაკვირვებული დინამიკა მეორდება 171 და 304 Å ტალღის სიგრძის გამონასახებზეც.

ნახაზ 4.4-ზე წარმოდგენილია რეკურენტული ჯეტის შემთხვევა (CJ2/CJ3/CJ4). მოვლენათა სერია დაიწყო 2015 წლის 30 დაკემბრის 22:56 UT, გაგრძელდა დაახლოებით საათნახევრის განმავლობაში, და შეიცავდა სამ პლაზმის ნაკადის გამოტყორცნას. ნახ. 4.4ზე ნათლად დაიკვირვება, რომ რეკურენტული ჯეტის შემთხვევაშიც კაშკაშა წერტილის ევოლუცია იმეორებს უკვე აღწერილ სცენარს: პრეკურსორი სისტემატურად ჩნდება თითოეული პლაზმის ნაკადის გამოტყორცნის წინ.

CJ2-ის წინმსწრები კაშკაშა წერტილის შეშფოთება კომპლექსურია და რამდენიმე პიკს შეიცავს. მისი ევოლუციის მთლიანი დრო 19.6 წუთია, ხოლო პრეკურსორის აღძვრის ხანგრძლივობა 4.54/.4.78 (მონაცემთა წყება 1/მონაცემთა წყება 2) წუთს შეადგენს. პირველი პლაზმის ნაკადის დასრულებისთანავე ჩნდება კაშკაშა წერტილის კიდევ ერთი

შეშფოთება, რის დასრულების შემდეგ (დაახლოებით 7.8 წუთში) ხდება CJ3. CJ3-ს შემდეგ ჩნდება კიდევ ერთი შეშფოთება, რომელიც გრძელდება 5.6 წუთის განმავლობაში და მოსდევს პლაზმის მესამე ინტენსიური ამოფრქვევა CJ4 (ცხრ. 2 – CJ2, CJ3, CJ4).



ర్వెరికారి 4.4. స్న్యూ స్రాశ్సర్ స్రాజాం వ్రాసారా స్పార్స్ సిరిగి గర్ఫ్ రెక్ సిర్యాలింగి (CJ2/CJ3/CJ4). స్పార్సం థుంగ్రో 2015 గో జాంకి 30 థ్య్యురిర్పిగు 23:16 UT థు రిగాండ్రువ్రథు కురి రావర్ రిధ్యాన్ స్రాజాం విజాకారింకి వ్రవిదాస్త్రికా 2015 గో జాంక్ 30 థ్య్యురిర్పిగ్ 23:16 UT థు రిగాండ్రువ్రథు కురి రావర్ రెండ్రు వ్ర పోల్ల స్టార్ స్టార్ కి సిరిగా స్రాజాంక్ స్టార్ స్టార్ స్టార్ శ్రార్ శ్రార్ శ్రార్ శ్రార్ శ్రార్ శ్రార్ స్టార్స్ సిర్యు స్టార్ స్ట్రార్ స్ట్రాల్ స్ట్రార్ స్ట్రాల్ స్ట్రార్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ట్రార్ స్ట్రార్ స్ట్రార్ స్ట్రార్ స్ట్రార్ స్ట్రార్ స్ట్రార్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ట్రార్ స్ట్రార్ స్ట్రార్ స్ట్రార్ స్ట్రార్ స్ట్రార్ స్ట్రార్ స్ట్రార్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ట్రార్ స్ట్రాల్ స్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ట్రార్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ట్రాల్ స్ స్ట్రాల్ స్ స్ట్రాల్ స్ల్ స్ట్ స్ట్రార్ స్ స్ట్రాల్
შესწავლილი კორონული ჯეტებიდან 3 შემთხვევაში ჯეტის ამოფრქვევამდე არ შეინიშნებოდა კაშკაშა წერტილის ინტენსივობის მნიშვნელოვანი მატება. ნახ. 4.5-ზე წარმოდგენილია ერთ-ერთი მაგალითი - CJ16 (ცხრ. 2 – CJ16), სადაც ორივე ტიპის საშუალო ინტენსივობის მრუდში არ არის შესაძლებელი პრეკურსორის ამოცნობა. ამ შემთხვევაში პრეკურსორის არარსებობა შესაძლებელია გამოწვეული იყოს დაკვირვებითი მონაცემების არასრულყოფილებით. მიზეზი შესაძლოა იყოს ჯეტის და პრეკურსორის დროში თითქმის დამთხვევაც. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, როდესაც პრეკურსორის და ჯეტის ხანგრძლივობა მნიშვნელოვნად აღემატება მათ შორის დროის ინტერვალს, ისინი გადაფარავენ ერთმანეთს და შეუძლებელია პრეკურსორის ცალკე გამოყოფა.



ნახაზი 4.5. კორონული ჯეტი CJ16-ის ინტენსივობის მრუდები - მთავარი ამოფრქვევის წინ მნიშვნელოვნად გამოხატული შეშფოთებების გარეშე. ჯეტის ამოფრქვევა დაიწყო 2016 წლის 22 მარტს 02:55 UT.

gbhormon 2. კორონული ჯეტებისა და дათი პრეკურსორების პარამეტრები. 'дდებარეობა' შეესაბამება კაშკაშა წერტილის (x, y) კოორდინატებს არკსეკუნდში; სვეტში 'ტიპი' წარმოდგენილია ორი შესაძლო მნიშვნელობა S - ერთჯერადი ჯეტი (single) R რეკურენტული ჯეტი (recurrent); $\tau_{\rm H}$ შეესაბამება პრეკუსორის აღძვრის ხანგრძლივობას; τ_{pT} არის პრეკურსორის ევოლუციის მთლიანი ხანგრძლივობა; τ_{CJ} - კორონული ჯეტის ხანგრძლივობა; $\Delta \tau_{Peaks}$ - დროის ინტერვალი პრეკურსორისა და ჯეტის პიკებს შორის; 'ოსც. პერიოდები' უჩვენებს პრეკურსორის რხევის პერიოდების მინიმალურ და მაქსიმალურ მნიშვნელობებს. პარამეტრები, რომელთაც გააჩნიათ დროის განზომილება შეფასებულია წუთებში.

		Location						
		(x,y)						Osc.
No.	Obs. Time	arcsecs	Туре	$ au_{PI}$	$ au_{PT}$	$ au_{CJ}$	$\Delta au_{\it Peaks}$	Period
	12/9/2015				<u> </u>			
CJ1	17:18	355, -260	S	1.75/1.28	9.4/9.8	7.16/8.13	13.55/14.49	1.8 - 3.1
	12/30/2015							
CJ2	22:56	-780, 270	R	4.58/4.78	19.6/19.6	9.20/10.15	13.83/13.31	4.0 - 5.0
	12/30/2015							
CJ3	23:40	-780, -270	R	2.78/2.27	7.8/7.8	4.85/5.54	8.03/8.02	1.6 - 2.7
	12/30/2015							
CJ4	23:58	-780, -270	R	2.59/1.51	5.6/5.6	16.38/16.96	13.11/12.59	0.7 - 2.9
	12/31/2015							
CJ5	2:12	-770, -280	R	4.40/3.86	13.6/13	11.77/11.33	20.78/20.95	1.4 - 4.6
	12/31/2015							
CJ6	2:52	-770, -280	R	2.97/3.05	8/8	6.23/5.96	14.27/14.14	0.9 - 3.4
	12/7/2015							
CJ7	15:56	385, 510	R	13.82/12.72	21.2/20	13.49/15.60	20.64/23.80	1.9 - 5.1
	12/7/2015							
CJ8	17:08	385, 510	R	3.17/3.85	4.9/5.4	8.05/8.24	9.49/8.96	1.2 - 2.1
	12/8/2015							
CJ9	11:38	15, -225	S	4.73/5.03	20/20.2	6.38/4.42	19.92/19.43	2.3 - 4.1

	12/5/2015							
CJ10	9:11	430, 230	S	1.72/1.62	2.2/2.2	9.21/8.43	5.71/6.50	0.5- 1.2
	12/10/2015							
CJ11	19:25	765, -230	R	5.79/6.09	14.6/13.8	5.64/6.50	15.39/15.57	1.2 - 3.7
	12/10/2015							
CJ12	21:04	765, -235	R	5.90/5.91	7.8/7.8	10.77/10.52	11.05/11.58	1.0 - 4.0
	3/21/2016							
CJ13	21:30	515, 585	S	12.02/12.59	12.59/12.59	12.02/12.59	0/0	-
	3/21/2016							
CJ14	21:21	630, 435	S	6.73/6.49	11.6/10.4	11.80/11.51	11.45/12.46	0.8 - 1.9
	3/22/2016							
CJ15	2:40	-705, -130	R	3.57/4.05	4.05/4.05	3.57/4.05	0/0	-
	3/22/2016							
CJ16	2:55	-660, -80	R	9.44/9.06	9.06/9.06	9.44/9.06	0/0	-
	4/18/2016							
CJ17	10:44	-460, 275	S	1.86/1.89	3.2/3.2	3.36/3.32	3.24/3.15	0.4 - 1.7
	4/18/2016							
CJ18	13:39	-550, 445	S	2.70/2.22	4.4/3.4	10.40/9.96	8.99/10.37	0.9 - 1.5
	4/18/2016							
CJ19	14:08	-520, 385	S	0.93/0.88	2/2.2	6.28/5.42	9.12/8.81	0.8 - 1.2
	4/18/2016							
CJ20	16:58	605, 460	R	3.77/3.34	4/6.0	9.87/10.35	17.59/17.05	0.5 - 2.1
	4/18/2016							
CJ21	21:25	640, 450	R	1.81/2.36	3.2/3.2	6.35/5.99	6.40/6.15	0.5-1.1
	4/18/2016							
CJ22	21:57	640, 450	R	1.90/1.90	2.4/2.4	6.39/5.81	5.28/5.34	0.5 - 0.6
	4/18/2016							
CJ23	18:25	-485, 385	S	3.03/3.08	6.2/6.6	6.12/4.91	8.54/8.27	1.8 - 3.6

4.2. კვაზი-პერიოდული რხევები კორონული ჯეტების პრეკურსორებში

კორონული ჯეტების წინ დაფიქსირებულ პრეკურსორებში შეინიშნება რხევისმაგვარი პროცესები. პრეკურსორებში არსებული რხევების შესასწავლად კორონული ჯეტების ინტენსივობის მრუდებიდან გამოვყავით პრეკურსორის ნაწილი და მოვახდინეთ მათი დეტრენდირება. მრუდები ავაგეთ დიდ მასშტაბში როგორც ერთჯერადი (ნახ. 4.1-ის ქვედა პანელი (CJ1)) ისე რეკურენტული ჯეტისათვის (ნახ. 4.4-ს ქვედა პანელები (CJ2), (CJ3), და (CJ4)). რის შემდეგაც პრეკურსორებში არსებული სავარაუდო რხევითი პროცესის დასადგენად ჩავატარეთ მათი ფურიე ანალიზი (Fast Fourier Transform - FFT). FFT ანალიზი ჩავატარეთ მხოლოდ მონაცემთა წყება 2-სთვის, რადგან აღნიშნული წესით გამოთვლილ მონაცემებში კაშკაშა წერტილის ინტენსივობის ვარიაციები უკეთესად დაიკვირვება. შესაბამისი FFT პერიოდოგრამები მოცემულია ნახ. 4.6-ზე.



ნახაზი 4.6. კორონული ჯეტების პრეკურსორების FFT პერიოდოგრამები. პერიოდოგრამები შეესაბამება ნახაზი 4.1.-ის და 4.4.-ის ქვედა პანელებზე მოცემული შემთხვევებს. ფერები გამოყენებულია წინა ნახაზების მსგავსად. ჰოროზონტალური ლურჯი და წითელი წყვეტილი ხაზები მიუთითბს 95% სანდოობის დონეს მონაცემთა წყება 2 და მონაცემთა წყება 1-სთვის. სპექტრალური სიმძლავრე ნორმირებულია თითოეული პანელზე მოცემულ მაქსიმალურ სიმძლავრეზე.

კაშკაშა წერტილის საშუალო ინტენსივობის კვაზი-პერიოდული ცვლილებები სისტემატურად დაიკვირვება ყველა განხილულ შემთხვევაში. ცალკეული შემთხვევისათვის პრეკურსორების რხევის პერიოდი იცვლება 0.4-დან 5.1-მდე წუთის დიაპაზონში (ცხრილი 2). მინიმალური და მაქსიმალური რხევის საშუალო პერიოდები შესაბამისად შეადგენს 1.24 (±0.18) და 2.77 (±0.30) წუთს.

ყველა შესწავლილი ჯეტის ინტენსივობის მრუდები, პრეკურსორების პერიოდოგრამები და კორონული ჯეტის ვიდეოების სახით წარმოდგენილი

4.3. კორონული ჯეტებისა და მათი პრეკურსორების პარამეტრები

ბოლო ეტაპზე შევისწავლეთ კორონული ჯეტების და მათი პრეკურსორების პარამეტრები და ამ პარამეტრების ხდომილებათა განაწილების ძირითადი ტენდენცია. ყველა შესწავლილი პარამეტრისათვის გამოყენებული იყო გაუსის ფუნქცია.

შესწავლილი 8 პარამეტრიდან პირველი 4 გამოთვლილია წუთებში და წარმოდგენილია შემდეგი სახით (ნახ. 4.7): (i) პრეკურსორის აღძვრის ხანგრძლივობა $(au_{_{PI}})$, ის შეესაბამება პრეკურსორის პირველ შეშფოთებაზე მორგებული გაუსის ფუნქციის ნახევარსიგანეს. $au_{_{PI}}$ შეიცავს ინფორმაციას პრეკურსორის წყაროს დროითი მახასიათებლების შესახებ, რაც საშუალებას გვაძლევს შევაფასოთ საწყისი შეშფოთებების პერიოდები. (ii) პრეკურსორის ევოლუციის მთლიანი ხანგრძლივობა ($au_{_{PT}}$) უჩვენებს ჯეტის დაწყებამდე რა დროის განმავლობაში გრძელდება პრეკურსორი. ზოგიერთ შემთხვევაში პრეკურსორი შედგება ერთი ცალკეული პიკისგან. ასეთ შემთხვევაში პრეკურსორის აღძვრის ხანგრძლივობა და პრეკურსორის ევოლუციის მთლიანი ხანგრძლივობა ერთმანეთის შესაბამისია. სხვა შემთხვევებში ისინი შესაძლოა ამჟღავნებდნენ რხევის მსგავს ქცევას, რა შემთხვევაშიც პროცესის მთლიანი ხანგრძლივობა მნიშვნელოვნად აღემატება აღძვრის ხანგრძლივობას (იხ. ცხრილი 2). (iii) დროის ინტერვალი პრეკურსორისა და ჯეტის პიკებს შორის (Δau_{Peaks}) კიდევ ერთი პარამეტრია, რომელიც საშუალებას გვამლევს შევაფასოთ ინტერვალი პრეკურსორსა და ჯეტის ამოფრქვევას შორის. (iv) კორონული ჯეტის ხანგრძლივობა (au_{CI}), გამოთვლილია ზემოთ აღწერილი პრეკურსორის აღძვრის ხანგრძლივობის მსგავსად.



ნახაზი 4.7. პრეკურსორებისა და მათი პარამეტრების მოხდენის სიხშირის ჰისტოგრამები შესაბამისი ალბათობის განაწილების რეგრესიის ിട്ടാറ მრუდეზი. (OS 439005 რეგრესიისათვის გამოყენებულია გაუსის ფუნქცია. პანელი (a) - პრეკურსორის აღძვრის ხანგრძლივობა ($\Delta au_{_{Pl}}$); პანელი (b) - პრეკურსორის ევოლუციის მთლიანი ხანგრძლივობა $(\Delta \tau_{PT})$; 3sδელი (c) - დროის ინტერვალი პრეკურსორისა და ჯეტის პიკებს შორის ($\Delta \tau_{Peaks}$); პანელი (d) - კორონული ჯეტის ხანგრძლივობა (T CI). მოცემული პარამეტრები გამოთვლილია წუთებში. უგანზომილებო პარამეტრებია: პანელი (e) - ჯეტისა და პრეკურსორის პიკური ინტენსივობების ფარდობა (I_{CJ} / I_{P}); პანელი (f) - χ ეტისა და პრეკურსორის აღძვრის ხანგრძლივობების ფარდობა $(\Delta \tau_{cl} / \tau_{pl});$ პანელი (g) პრეკურსორის აღძვრისა და ჯეტის პიკებს შორის დროის ინტერვალის ფარდობა პრეკურსორის აღძვრის ხანგრძლივობასთან ($\Delta au_{\it Peaks}$ / $au_{\it PI}$) და პანელი (h) - პრეკურსორის პიკებს შორის დროის ინტერვალის ფარდობა งต่างต่อย่อ (OS ようらつり ようめつり ხანგრძლივობასთან (Δau_{Peaks} / au_{CJ}).

Parameters x	Maximum Probability f_0	<i>Expected values X</i>	σ (Variance)	<i>Error</i> = σ / \sqrt{N}
$ au_{PI}$	0.21/0.22	2.77/2.85	1.35/1.29	±0.28/±0.27
$ au_{PT}$	0.13/0.15	5.95/5.92	4.26/4.09	±0.89/±0.85
$\Delta au_{\it Peaks}$	0.12/0.11	10.25/10.13	6.83/7.59	±1.43/±1.58
$ au_{CJ}$	0.18/0.18	8.52/5.62	4.03/4.28	±0.84/±0.89
I_{CJ} / I_P	0.31/0.28	2.18/2.59	0.80/1.12	±0.17/±0.23
$ au_{CJ}$ / $ au_{PI}$	0.17/0.19	2.02/1.69	1.16/0.95	±0.24/±0.20
$\Delta au_{Peaks} / au_{PI}$	0.23/0.20	2.72/2.56	1.38/1.69	±0.29/±0.35
Δau_{Peaks} / $ au_{CJ}$	0.16/0.16	1.36/1.34	0.67/0.67	±0.14/±0.14

აგრეთვე შევაფასეთ ურთიერთკავშირები ჯეტსა და პრეკურსორს შორის, რაც წარმოდგენილია შემდეგი უგანზომილებო პარამეტრების სახით (ნახ. 4.7): ჯეტისა და პრეკურსორის (1) პიკური ინტენსივობების (I_{CJ} / I_{P} ; აღნიშნული პარამეტრი გამოხატავს პრეკურსორიდან და შესამლოა სხვა წყაროდანაც ჯეტისათვის ენერგიის გადაცემის ინტენსივობას), და (2) მათი ხანგრმლივობების ($\Delta \tau_{CJ}$ / τ_{PI}) ფარდობა; (3) პრეკურსორის აღძვრისა და ჯეტის პიკებს შორის დროის ინტერვალის ფარდობა პრეკურსორის აღძვრის ხანგრძლივობასთან ($\Delta au_{Peaks} / au_{PI}$); და საბოლოოდ, (4) პრეკურსორის აღძვრისა და ჯეტის პიკებს შორის დროის ინტერვალის ფარდობა ჯეტის ხანგრძლივობასთან ($\Delta au_{Peaks} / au_{CI}$).

შესწავლილი პარამეტრების მაქსიმალური ალბათობები და საშუალო მნიშვნელობები შესაბამისი დისპერსიებითა და ცდომილებით მოცემულია ცხრილში 3.

5.1. კორონული ხვრელების დინამიკის კვლევის შედეგების განხილვა

კორონული ხვრელების ბრუნვის კუთხური სიჩარების გამოთვლის და მათი ანალიზის შედეგად მივიღეთ, რომ კორონული ხვრელების ბრუნვაში ნაკლებადაა გამოხატული დიფენციულობა და მათი ბრუნვის განედური გრადიენტი მნიშვნელოვნად ჩამოუვარდება ფოტოსფეროში დაკვირვებულს. შედეგები თანხვედრაშია კვლევებთან (Shelke & Pande, 1985; Obridko & Shel'Ting, 1988; Insley et al., 1995 და სხვ.), რომლის მიხედვითაც კორონული ხვრელები არ ბრუნავენ მყარტანოვნად, თუმცა ბრუნვის დიფერენციული ხასიათი ფოტოსფეროსთან შედარებით ნაკლებადაა გამოხატული.

კორონული ხვრელების ბრუნვის სიჩქარეების განედური განაწილება არ შეესაბამება ფოტოსფეროში დაკვირვებულ არც ერთ ბრუნვის პროფილს. კორონული ხვრელებისა და მზის სხვადასხვა ფენების ბრუნვის პროფილები შედარებულია ნახ. 5.1ზე. ნახაზზე წარმოდგენილია: ორი განსხვავებული მეთოდით მიღებული ფოტოსფეროს ბრუნვის პროფილი (წერტილოვან-წყვეტილი მრუდი და წყვეტილი მრუდი); 0.71 R_{\odot} სიღრმის შესაბამისი მზის ბრუნვის პროფილი (წერტილოვანი მრუდი); კორონული ხვრელების საშუალო კუთხური სიჩქარის მნიშვნელობები (უწყვეტი მრუდი); ცალ-ცალკე ჩრდილოეთ და სამხრეთ ნახევარსფეროსათვის მიღებული საშუალო კუთხური სიჩქარის მნიშვნელობები (პლიუსები და ჯვრის ფორმის ნიშნები). ეკვატორის არეში კორონული ხვრელების და ჰელიოსეიმოლოგიური კვლევებით მიღებული ფოტოსფეროს ბრუნვის მნიშვნელობები რიცხობრივად ახლოსაა ერთმანეთთან, ±30°-ს ზემოთ ფოტოსფეროს ბრუნვის კუთხური სიჩქარე მნიშვნელოვნად მცირდება, მაშინ როცა მზის შიდა ნაწილის და კორონული ხვრელების სიჩქარეების მრუდი მნიშვნელოვანწილად ემთხვევა ერთმანეთს. როგორც ვხედავთ, ±30° განედს ზემოთ მზის შიდა ნაწილი და კორონული ხვრელები ბრუნავენ უფრო სწრაფად ვიდრე ფოტოსფერო.

მიღებული შედეგების მიხედვით კორონული ხვრელების ბრუნვის პროფილი შეესაბამება ტახოკლინში და კონვექციური ზონის ქვემოთ ბრუნვის მახასიათებლებს რომელიც მდებარეობს დაახლოებით 0.71 R_{\odot} -ზე (ნახ. 5.1). კორონული ხვრელების და მზის კონვექციური ზონის ქვედა ფენების ბრუნვის რიცხობრივ და თვისობრივ ხასიათს შორის არსებული თანხვედრა, საშუალებას გვაძლევს წამოვაყენოთ ჰიპოთეზა: კორონული ხვრელები შესაძლოა გლობალური მაგნიტური ველის საშუალებით ტახოკლინის რეგიონთან იყვნენ დაკავშირებული.



ნახაზი 5.1. მზის სხვადასხვა ფენების სიდერული ბრუნვის პროფილების შედარება. წყვეტილ-წერტილოვანი მრუდი შეესაბამება დოპლერის წანაცვლებით მიღებულ ფოტოსფეროს ბრუნვის პროფილს (Snodgrass & Ulrich, 1990); წყვეტილი მრუდი შეესაბამება ჰელიოსიემოლოგიური გაზომვებით მიღებულ ფოტოსფეროს ბრუნვის პროფილს (Schou et al., 1998); წერტილოვანი მრუდი ასახავს მზის შიდა ნაწილის ბრუნვის პროფილს 0.71 R_{o} - ზე; უწყვეტი ხაზი კორონული ხვრელების ბრუნვის კუთხური სიჩქარეა; პლიუს ნიშნით წარმოდგენილია კორონული ხვრელების ბრუნვის კუთხური სიჩქარეები ჩრდილოეთ ნახევარსფეროში, ჯვრებით აღნიშნულია ბრუნვის კუთხური

მსგავსი დასკვნები გვხვდება Hiremath & Hegde (2013)-ის კვლევებშიც. მკვლევარებმა SOHO/EIT მონაცემებზე დაყრდნობით შეისწავლეს კორონული ხვრელების ბრუნვის სიჩქარეები 2001-2008 წლებისათვის, და მიიღეს საშუალო სიჩქარე (438 nHz), რაც შეესაბამება მზის შიდა ფენების ბრუნვას დაახლოებით 0.62 (±0.10) R_{\odot} -ზე. ეს მნიშვნელობა ჩვენს მიერ მიღებულ სიღრმეზე მეტია და ტახოკლინის ქვემოთ არსებულ რეგიონებს შეესაბამება, თუმცა მათი დასკვნაც, რომ კორონული ხვრელების მაგნიტური ველის მალწირები დაკავშირებულია მზის შიდა ფენებთან თანხვედრაშია ჩვენს შედეგებთან.

Ruždjak et al. (2004)-ს წარმოდგენილი აქვს მსგავსი ანალიზი მზის ლაქების სხვადასხვა სიცოცხლის ხანგრძლივობის (რეკურსიული) ჯგუფებისათვის. აღნიშნული ნაშრომის დასკვნების მიხედვით, მზის ლაქები თავიანთი სიცოცხლის დასაწყისში სავარაუდოდ ჩამაგრებულია უფრო ნაკლებ სიღრმეზე (დაახლოებით 0.93 R_{\odot}), მაშინ როცა იმ მზის ლაქათა ჯგუფისათვის, რომელებმაც ერთ და მეტი სრული შემობრუნება შეასრულეს მზის გარშემო, ჩამაგრების სიღრმემ შეიძლება მიაღწიოს კონვექციური ზონის ქვედა ფენებსაც კი. ეს შესაძლოა დაკავშირებული იყოს ტახოკლინიდან მაგნიტური ნაკადის თანდათან ამოსვლასთან და მის კავშირთან მზის ზედაპირზე ფორმირებულ მაგნიტურ წარმონაქმნებთან. მეორე მხრივ, არსებობს დაკვირვებები, რომელთა თანახმადაც კორონული ხვრელები წარმოიქმნებიან კორონული ორმოებისგან (Tu et al., 2005), რაც ნიშნავს რომ კორონული ხვრელები და მზის სწრაფი ქარი მჭიდროდაა დაკავშირებული მზის ქვედა ატმოსფეროსთან და იქ არსებულ მაგნიტური ველის ტოპოლოგიასთან. ამ ნაშრომებზე დაყრდნობით, ვვარაუდობთ, რომ კორონული ხვრელები შესაძლოა ყალიბდებოდნენ და დაკავშირებულები იყვნენ გლობალურ ნარჩენ მაგნიტურ ველთან, რომელიც ამოდის ხანგრმლივი სიცოცხლის მქონე რეკურსიული მზის ლაქათა ჯგუფიდან, ეს კი უზრუნველყოფს კავშირს კორონულ ხვრელებსა და მზის ღრმა ფენებს შორის. ამავე დროს შესაძლოა არსებობდნენ საკმაოდ მცირე ზომის კორონული ხვრელები, რომლებიც უმეტესწილად ეკუთნიან 10 000 მეგა მ²-ზე ნაკლები ფართობის მქონე კორონული ხვრელების ჯგუფს, მცირე სიცოცხლის ხანგრძლივობით (რამდენიმე დღის რიგის). შეგვიძლია ვივარაუდოთ, რომ პატარა სიცოხლის

ხანგრძლივობის და ფართობის მქონე კორონული ხვრელები დაკავშირებულია არარეკურსიულ სუსტ მზის ლაქექბთან, რომლებიც ჩამაგრებული არიან შედარებით პატარა სიღრმეზე. ინტიუციურად წარმოდგენილი სცენარი ასევე თანხვედრაშია Nash et al. (1988)-ის დასკვნებთან. შესაძლოა აღნიშნული დასკვნა წარმოადგენდეს ჰელიოსეიმურ რადიალურ პროფილსა და კორონული ხვრელების საშუალო მოძრაობის სიჩქარის ბრუნვის პროფილს შორის 2 გადაკვეთის წერტილის არსებობის არაპირდაპირ ახსნასაც (ნახ. 3.6)

5.2. კორონული ჯეტების დინამიკის კვლევის შედეგების განხილვა

კორონულ ხვრელებში და კორონული ხვრელების საზღვრებთან წარმოქმნილი ჯეტების შესწავლის შედეგები საშუალებას გვაძლევს ვივარაუდოთ, რომ პრეკურსორები კორონული ჯეტების დამახასიათებელი თვისებაა. მისი იდენტიფიკაცია შესაძლებელი იყო 23-დან 20 შემთხვევაში. სამ შემთხვევაში მათი არარსებობა შესაძლებელია გამოწვეული იყოს დაკვირვებითი მონაცემების არასრულყოფილების ან ჯეტის და პრეკურსორის დროში თითქმის დამთხვევის გამო.

ჩვენს მიერ შესწავლილი ჯეტების კაშკაშა წერტილების სტრუქტურა და დინამიკა აღნიშნული თემის ირგვლივ არსებულ ლიტერატურაში წარმოდგენილი აღწერების მსგავსია (Raouafi et al. 2016), რაც გულისხმობს რომ კორონული ჯეტი წარმოიქმნება კაშკაშა წერტილის ინტენსივობის მაქიმუმის დროს მაგნიტური გადაერთების შედეგად. ჩვენს მიერ მიღებულ შედეგებში ყველა ჯეტის წინ (მრუდის უწყვეტი შავი ფერის ნაწილი ნახ. 4.1-ის და 4.4-ის ზედა პანელებზე) ადგილი აქვს შედარებით დაბალი ამპლიტუდის მქონე (ჯეტთან შედარებით) კვაზი-პერიოდული დინამიური პროცესების სისტემატურ არსებობას. ეს პროცესი სავარაუდოდ წარმოადგენს კორონული ჯეტის პრეკურსორს.

ჩატარებული ანალიზის შედეგად მივიღეთ, რომ ჯეტის ამოფრქვევამდე არსებულ კაშკაშა წერტილში დაფიქსირებული კვაზი-პერიოდული რხევების მახასიათებელი პერიოდები მერყეობს რამდენიმე ათეული წამიდან 4-5 წუთამდე. მრავალი კვლევა მიუთითებს, რომ კაშაკა წერტილებს ახასიათებთ სიკაშკაშის ფლუქტუაციები და სხვადასხვა რხევის პერიოდები (Sheeley & Golub 1979; Nolte et al. 1979; Strong et al. 1992; Tian et al. 2008; Kumar et al. 2011). స్థినగ్రం కార్రంతోర్ ల్రాలంగు, Pucci et al. (2012) గురియ్రర్ ర్రంత్సి స్టాగార్ స్టాగార్ స్టార్లంగు స్టారంగు స్రారంగు స్టారంగు స్టారంలు స్టారంగు స్టారంలు స్టారంగు స్టారంగు స్టారంలు స్టారంలు స్టారంలు స్టారంలు స్టారంలు స్టారంలు స్టారంలు స్టారంలు స్టారంలు స్టారం స్టారంలు స్ స్టారంలు స్టారంలు స్టారంగు స్టారంలు స్టారంలు స్టారంలు స్టారంలు స్టారంలు స్టారంలు స్టారంలు స్టారంలు స్టారంలు స్టా

მიუხედავად იმისა, რომ ჩვენ მიზანს წარმოადგენს მხოლოდ ჯეტებისა და მათი პრეკურსორების დაკვირვებითი შესწავლა და ანალიზი, შესაძლებელია ჩამოვაყალიბოთ მინიშნებები დაკვირვებული რხევითი ბუნების თეორიული საფუძვლების შესახებ. ინტენსივობის კვაზი-პერიოდული ცვალებადობები შესაძლოა მიუთითებდეს სისტემის ენტროპიის ცვალებადობის (Shergelashvili et al. 2007) ან სიმკვრივის ცვალებადობის (Shergelashvili et al. 2005; Zaqarashvili & Roberts 2002) გამო MHD ტალღების აღძვრის პროცესის არსებობაზე. მაგნიტური ველის ორივე სახის ღია და ჩაკეტილი ძალწირების არსებობა მიუთითებს, რომ სავარაუდოა მკვეთრად გამოხატული სიჩქარის გრადიენტის არსებობა ღია და ჩაკეტილ ძალწირებს შორის რეგიონში. ლოკალური მაგნიტური ველის გადაერთებების თანმიმდევრობა შესაძლოა წარმოადგენდეს MHD ტალღების წყაროს ტემპერატურის სწრაფი ცვალებადობის იმპულსური წარმოქმნის გამო (Shergelashvili et al. 2007) ერთი მხრივ, ან მეორე მხრივ წანაცვლებითი დინება შესაძლოა იწვევდეს MHD ტალღების აღძვრის, ბმის და დისიპაციის (თვითგაცხელებადი მექანიზმი) პროცესებს (Shergelashvili et al. 2006) და ფეთქებადი ტიპის ძლიერ არაადიაბატურ ზეარეკვლის მოვლენებს წანაცვლებით დინებებში (Gogoberidze et al. 2004).

ნახ. 5.2-ის პანელებზე წარმოდგენილია კორონული ჯეტის წარმოქმნის ცნობილი სცენარი - კორონულ ხვრელში არსებული მცირე ჩაკეტილი მალწირების სტრუქტურის გარემომცველ მაგნიტური ველის სტრუქტურებთან გადაერთების პროცესი, რომელიც ამოქმედებულია მინიბოჭკოს ამოფრქვევით (ნახაზი წარმოადგენს მცირედ მოდიფიცირებულ Sterling et al. (2015)-ის მიერ წარმოდგენილ ილუსტრაციას). განსხვავება მდგომარეობს MHD რხევითი და ტალღისმაგვარი პროცესების არსებობის მითითებაში, რაც სავარაუდოდ უნდა წარმოადგენდეს ფონური მაგნიტური ველის

რეკონფიგურაციის და გადაერთების შედეგს. როგორც ნახ. 5.2-ზე ჩანს, კაშკაშა წერტილების ევოლუციის მსგავს განვითარებასთან ერთად შესაძლოა აღიძრას გარკვეული MHD რხევითი და ტალღისმაგვარი მოძრაობები, რამაც შესაძლებელია შეასრულოს მნიშვნელოვანი როლი კორონული ჯეტების დაკვირვებულ დინამიკაში. ჩვენს მიერ ზემოთ მოყვანილი სავარაუდო ფიზიკური მექანიზმები სრულად თავსებადია მზის კაშკაშა წერტილების Sterling et al. (2015)-ის მიერ წარმოდგენილ მოდელთან.



ర్వ్ కార్ 5.2. ప్రాదాదర్రాల్లాని స్ప్రార్రింగ్ గ్రోందిర్పారిరింగ్ కిర్రార్ర్ సిర్రార్ కార్య్ కి కి కి కి కి కి స్పోర్ స్పోరి స్పోరి స్పోర్ స్పోర్ స్పోల్ స్పోర్ స్పోల్ స్పోల్ స్పోల్ స్పోల్ స్పోల్ స్పోల్ స్పోల్ స్పాల్ స్పాల్ స్పాల్ స్పాల స్పాల స్పాల స్పోల్ స్ స్పోల్ స్పోల్ స్పాల స్

თავი 6. დასკვნა და სამომავლო განვითარება

მზის დინამიკის ობსერვატორიის დაკვირვებით მონაცემებეზე დაყრდნობით შევისწავლეთ კორონული ხვრელების მზის გარშემო ბრუნვა 01/01/2013-20/04/2015 და მათში არსებული ჯეტების თვისებები 01/12/2015-01/05/2016 პერიოდებში, შესაბამისად. ჩატარებული კვლევების საფუძველზე მივიღეთ:

 მზის დისკოზე ±60° განედსა და გრძედს შორის შესწავლილი 540 ობიექტის ბრუნვის საშუალო კუთხური სიჩქარე შეადგენდა 13.86 (±0.05) °/დღეს. ეკვატორულ არეში ბრუნვის სიჩქარე არის 14.15 (±0.07) °/დღე, ხოლო ±55-60° განედურ ზოლში ის მცირდება და შეადგენს დაახლოებით 12.9 (±0.07) °/დღეს.

2. პატარა და საშუალო ზომის კორონული ხვრელების ბრუნვის სიჩქარე ერთმანეთის მსგავსია. ეკვატორულ არეში მათი ბრუნვის კუთხური სიჩქარე შეადგენს 14.04-14.25 (±0.07) °/დღეს პატარა კორონული ხვრელების და 14.27-14.08 (±0.1) °/დღეს საშუალო კორონული ხვრელების შემთხვევაში. ±50-60° განედურ ზონაში მათი საშუალო კუთხური სიჩქარე მერყეობს 11.85-13.55 (±0.07) °/დღე შუალედში. დიდი ზომის კორონული ხვრელების მცირე რაოდენობის გამო მათი ბრუნვის პროფილი არასრულია. მათი საშუალო კუთხური სიჩქარე მაქსიმუმ 13.60 °/დღეა და ჩამოუვარდება დანარჩენი ობიექტების ბრუნვის სიჩქარეს.

3. კორონული ხვრელების ბრუნვის პროფილების ანალიზის შედეგად მივიღეთ, რომ კორონული ხვრელების ბრუნვის კუთხური სიჩქარე განსხვავდება ფოტოსფეროში გაზომილი იმავე სიდიდისგან. მათი ბრუნვის სიჩქარის განედური გრადიენტი შესამჩნევად ჩამორჩება ფოტოსფეროში დაკვირვებულ დიფერენციულ ბრუნვას. ეკვატორის არეში კორონული ხვრელების და ჰელიოსეიმოლოგიური კვლევებით მიღებული ფოტოსფეროს ბრუნვის მნიშვნელობები რიცხობრივად ახლოსაა ერთმანეთთან. ±30-40°-ს ზემოთ კორონული ხვრელები ბრუნავენ უფრო სწრაფად ვიდრე ფოტოსფერო.

4. კორონული ხვრელების ბრუნვის განედური ხასიათი არ ჰგავს ფოტოსფერული ბრუნვის არც ერთ დაკვირვებულ პროფილს. კორონული ხვრელების ბრუნვის სიჩქარე თითქმის სრულყოფილად ემთხვევა ტახოკლინსა და კონვექციური ზონის ქვედა ფენების ბრუნვის პროფილს დაახლოებით 0.71 (±0.014) R_o სიღრმეზე. ეს ფაქტი მიუთითებს კორონული ხვრელებისა და მზის გლობალურ მაგნიტურ ველს შორის შესაძლო კავშირზე, რომელიც მზის წიაღში აღნიშნულ სიღრმეზე წარმოიქმნება.

5. საკვლევ პერიოდში იდენტიფიცირებული 3056 კორონული ხვრელის ანალიზი მიუთითებს, რომ მზის დისკოზე მათ განაწილებაში შეინიშნება ჩრდილო-სამხრეთ ასიმეტრია. დაკვირვებული ობიექტების დაახლოებით 60% ჩრდილოეთ ნახევარსფეროშია განთავსებული. მოცემულ ეპოქაში, კორონული ხვრელები წარმოდგენილია ყველა განედზე.

6. კორონულ ხვრლებში არსებული ჯეტების და კაშკაშა წერტილების შესასწავლად ჩატარებულ იქნა 23 მცირე ზომის ჯეტის სტატისტიკური ანალიზი. შემთხვევათა აბსოლუტურ უმრავლესობაში მთავარი ჯეტის გამოფრქვევამდე რამდენიმე წუთით ადრე დაკვირვებული იქნა კაშკაშა წერტილის გაკაშკაშება. შესწავლილი კორონული ჯეტების სიკაშკაშის ევოლუცია ერთმანეთის მსგავსია: კაშკაშა წერტილის ინტენსივობაში მუდმივად დაიკვირვება რხევები და შეშფოთებები, ჯეტის გამოფქვევის წინ ინტენსივობა იზრდება, შემდეგ კლებულობს, რასაც მოსდევს მთავარი ამოფრქვევა, რა დროსაც ინტენსივობა მკვეთრად იზრდება. მთავარი გამოფრქვევის წინ კაშკაშა წერტილის საშუალო ინტენსოვობის შეშფოთებებს განვიხილავთ როგორც კორონული ჯეტის წინმსწრებ მოვლენას - ე. წ. პრეკურსორს.

7. პრეკურსორი დაფიქსირებული იყო 23-დან 20 შემთხვევაში. პრეკურსორი დაიკვირვება როგორც ერთჯერადი ისე რეკურენტული ჯეტების შემთხვევაში და როგორც ჩანს წარმოადგენს კორონული ჯეტის დამახასიათებელ თვისებას.

გ. კორონული ჯეტებისა და მათი პრეკურსორებისთვის დამახასიათებელი
პარამეტრების შეფასების შედეგად მიღებული მნიშვნელობებია: პრეკურსორის აღძვრის
ხანგრძლივობა - 0.88-13.82 წთ (საშუალოდ 2.85 წთ); პრეკურსორის ევოლუციის მთლიანი
ხანგრძლივობა - 2.0–21.2 წთ (საშუალოდ 5.92 წთ); პრეკურსორისა და ჯეტის პიკებს

შორის არსებული მაქსიმალური დრო იყო 23.80 წთ (საშუალოდ 10.13 წთ); ხოლო ჯეტის ხანგრძლივობა იცლებოდა 3.32-15.60 წუთის ინტერვალში კორონული (საშუალოდ 8.62 ასევე შევაფასეთ მისი პრეკურსორის ရှိတ). ჯეტისა და ურთიერთდამოკიდებულება უგანზომილებო პარამეტრების შემოტანით: ჯეტისა და პრეკურსორის პიკური ინტენსივობების ფარდობა (1.00-24.18; საშუალოდ 2.59); მათი ხანგრძლივობების ფარდობა (0.68–6.72; საშუალოდ 1.69); პიკებს შორის დროის ინტერვალის ფარდობა პრეკურსორის (მაქსიმუმ 11.36; საშუალოდ 2.56) და ჯეტის ხანგრძლოვობასთან (მაქსისმუმ 3.04; საშუალოდ 1.34).

9. პრეკურსორების შიდა სტრუქტურის ანალიზმა გამოავლინა მათი დროში ევოლუციის კვაზი-პერიოდული ხასიათი, დაახლოებით 3 წუთიანი პერიოდულობით. დაიკვირვება უფრო მცირე რხევის პერიოდების მოდულაციაც. მიუხედავად ჯეტის ტიპისა საშუალო ინტენსივობის კვაზი-პერიოდული ცვლილებები დაიკვირვება ჯეტების აბსოლიტურ უმრავლესობაში. რხევის პერიოდი იცვლება 0.4-დან 5.1-მდე წთ. დიაპაზონში.

10. კორონული ჯეტის წარმოქმნის ცნობილი სცენარი (კორონულ ხვრელში არსებული მცირე ჩაკეტილი ველი ძალწირების სტრუქტურის გარემომცველ მაგნიტური ველის სტრუქტურებთან გადაერთების შედეგად ჯეტის წარმოქმნა) და ჩვენი ვარაუდი MHD ტალღების არაწონასწორული პროცესების გამო აღძვრის შესახებ არის ერთმანეთთან სრულიად თავსებადი.

წარმოდგენილი შედეგები ემყარება კორონული ხვრელებისა და კორონული ჯეტების დაკვირვებითი მონაცემების შესწავლისა და ანალიზის შედეგად მიღებულ ინფორმაციას. კორონული ხვრელებისა და მზის შიდა ფენების კავშირის შესახებ ჩვენს მიერ წამოყენებული ჰიპოთეზის დადასტურება ან უარყოფა საჭიროებს კორონულ ხვრელებთან დაკავშირებული მაგნიტური ველის კონფიგურაციების და მასთან დაკავშირებული მოვლენების დეტალური მოდელირებას, რაც საჭიროა კორონული ხვრელების "ფეხებსა" და მზის ღრმა ფენებსა და გლობალურ ველს შორის არსებული კავშირების უკეთ გასაგებად.

დაკვირვებითი მონაცემების ანალიზის საფუძველზე დაფიქსირდა კვაზიპერიოდული პრეკურსორის არსებობა კორონულ ჯეტების ამოფრქვევამდე. კვაზიპერიოდულმა მოვლენებმა შესაძლოა ერთმანეთს დააკავშიროს ჯეტის აღძვრა და ევოლუციის სხვადასხვა საფეხურები და შეასრულოს მნიშვნელოვანი როლი მოვლენის დაკვირვებულ დინამიკაში. აღნიშნული მოვლენის სრული გაგებისათვის საჭიროა დაკვირვებული პროცესების დამატებითი ანალიზური და შესაძლოა რიცხვითი მოდელირებაც, რაც სამომავლო კვლევის საგანს წარმოადგენს.

ბიბლიოგრაფია

Altschuler, M. D.; Trotter, D. E.; Orrall, F. Q., Coronal Holes, 1972, Solar Physics, Volume 26, Issue 2, pp. 354-365.

Archontis, V.; Hood, A. W., A Numerical Model of Standard to Blowout Jets, 2013, The Astrophysical Journal Letters, Volume 769, Issue 2, article id. L21, 5 pp.

Aschwanden, M. J., Image Processing Techniques and Feature Recognition in Solar Physics, 2010, Solar Physics, Volume 262, Issue 2, pp.235-275.

Aulanier, G.; Golub, L.; DeLuca, E. E.; Cirtain, J. W.; Kano, R; Lundquist, L. L. et al., Slipping Magnetic Reconnection in Coronal Loops, 2007, Science, Volume 318, Issue 5856, p. 1588.

Badalyan, O. G.; Sýkora, J., Bimodal differential rotation of the solar corona, 2005, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, vol. 35, no. 3, p. 180-198.

Bagashvili, S. R.; Shergelashvili, B. M.; Japaridze, D. R.; Chargeishvili, B. B.; Kosovichev, A. G.; Kukhianidze, V.; Ramishvili, G.; Zaqarashvili, T. V.; Poedts, S.; Khodachenko, M. L.; De Causmaecker, P., Statistical properties of coronal hole rotation rates: Are they linked to the solar interior?, 2017, Astronomy & Astrophysics, Volume 603, id.A134, 8 pp.

Bagashvili, S. R.; Shergelashvili, B. M.; Japaridze, D. R.; Kukhianidze, V.; Poedts, S.; Zaqarashvili, T. V.; Khodachenko, M. L.; De Causmaecker, P., Evidence for Precursors of the Coronal Hole Jets in Solar Bright Points, 2018, The Astrophysical Journal Letters, Volume 855, Issue 2, article id. L21, 6 pp.

Bain, H. M.; Fletcher, L., Hard X-ray emission from a flare-related jet, 2009, Astronomy and Astrophysics, Volume 508, Issue 3, 2009, pp. 1443-1452.

Bilenko, I. A.; Tavastsherna, K. S., Coronal Hole and Solar Global Magnetic Field Evolution in 1976 – 2012, 2016, Solar Physics, Volume 291, Issue 8, pp. 2329-2352.

Boerner, P.; Edwards, C.; Lemen, J.; Rausch, A.; Schrijver, C.; Shine, R. et al., Initial Calibration of the Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO), 2012, Solar Physics, Volume 275, Issue 1-2, pp. 41-66.

Bohlin, J. D., Extreme-ultraviolet observations of coronal holes. I - Locations, sizes and evolution of coronal holes, June 1973-January 1974, 1977, Solar Physics, vol. 51, Mar. 1977, p. 377-398.

Brajša, R.; Sudar, D.; Skokic, I.; Saar, S. H., Preliminary results on the solar rotation determined tracing SDO/AIA coronal bright points, 2014, Central European Astrophysical Bulletin, Vol. 38, p. 105-110.

Bumba, V.; Klvana, M.; Sykora, J., Coronal holes and their relation to the background and local magnetic fields, 1995, Astronomy and Astrophysics, v.298, p.923.

Carrington, R. C., On the Distribution of the Solar Spots in Latitudes since the Beginning of the Year 1854, with a Map, 1858, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 19, p.1-3.

Chandra, S.; Vats, H. O.; Iyer, K. N., Differential rotation measurement of soft X-ray corona, 2010, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 407, Issue 2, pp. 1108-1115.

Chandra, S.; Vats, Hari O.; Iyer, K. N., Differential coronal rotation using radio images at 17GHz, 2009, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 400, Issue 1, pp. L34-L37.

Chandrashekhar, K.; Krishna P. S.; Banerjee, D.; Ravindra, B.; Seaton, D. B., Dynamics of Coronal Bright Points as Seen by Sun Watcher Using Active Pixel System Detector and Image Processing (SWAP), Atmospheric Imaging Assembly (AIA), and Helioseismic and Magnetic Imager (HMI), 2013, Solar Physics, Volume 286, Issue 1, pp.125-142.

Chandrashekhar, K.; Morton, R. J.; Banerjee, D.; Gupta, G. R., The dynamical behaviour of a jet in an on-disk coronal hole observed with AIA/SDO, 2014, Astronomy & Astrophysics, Volume 562, id.A98, 10 pp.

Clark, D. H.; Yallop, B. D.; Richard, S.; Emerson, B.; Rudd, P. J., Differential solar rotation depends on solar activity, 1979, Nature, Volume 280, Issue 5720, pp. 299-300.

Cranmer, S. R., Coronal Holes, 2009, Living Reviews in Solar Physics, Volume 6, Issue 1, article id. 3, 66 pp.

de Toma, G., Evolution of Coronal Holes and Implications for High-Speed Solar Wind During the Minimum Between Cycles 23 and 24, 2011, Solar Physics, Volume 274, Issue 1-2, pp. 195-217.

Delouille, V.; Barra, V.; Hochedez, J., Segmentation of SoHO/EIT Images using fuzzy clustering algorithms, 2007, American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, abstract id.SH13A-1107.

Demastus, H. L.; Wagner, W. J.; Robinson, R. D., Coronal Disturbances. I: Fast Transient Events Observed in the Green Coronal Emission Line During the Last Solar Cycle, 1973, Solar Physics, Volume 31, Issue 2, pp. 449-459.

Feng, L.; Inhester, B.; de Patoul, J.; Wiegelmann, T.; Gan, W. Q., Particle kinetic analysis of a polar jet from SECCHI COR data, 2012, Astronomy & Astrophysics, Volume 538, id.A34, 9 pp.

Fox, N. J.; Velli, M. C.; Bale, S. D.; Decker, R.; Driesman, A.; Howard, R. A. et al., The Solar Probe Plus Mission: Humanity's First Visit to Our Star, 2016, Space Science Reviews, Volume 204, Issue 1-4, pp. 7-48.

Gilman, P. A., Coronal holes and the sun's interior, 1977, Coronal holes and high speed wind streams, p. 331-369.

Gogoberidze, G.; Chagelishvili, G. D.; Sagdeev, R. Z.; Lominadze, D. G., Linear coupling and overreflection phenomena of magnetohydrodynamic waves in smooth shear flows, 2004, Physics of Plasmas, Volume 11, Issue 10, pp. 4672-4685.

Golub, L.; Krieger, A. S.; Silk, J. K.; Timothy, A. F.; Vaiana, G. S., Solar X-Ray Bright Points, 1974, Astrophysical Journal, vol. 189, p. L93.

Golub, L.; Krieger, A. S.; Vaiana, G. S., Observation of spatial and temporal variations in X-ray bright point emergence patterns, 1976, Solar Physics, Volume 50, Issue 2, pp.311-327.

Habbal, S. R.; Withbroe, G. L., Spatial and Temporal Variations of EUV Coronal Bright Points, 1981, Solar Physics, Volume 69, Issue 1, pp.77-97.

Haigh, J. D., The Sun and the Earth's Climate, 2007, Living Reviews in Solar Physics, Volume 4, Issue 1, article id. 2, 64 pp.

Hara, H., Differential Rotation Rate of X-ray Bright Points and Source Region of their Magnetic Fields, 2009, The Astrophysical Journal, Volume 697, Issue 2, pp. 980-984.

Harvey, J. W.; Sheeley, N. R., Jr., Coronal holes and solar magnetic fields, 1987, COSPAR, IAU, IUGG, IUPAP, and URSI, International Symposium on Solar Terrestrial Physics, Innsbruck, Austria, May 29-June 3, 1978. Space Science Reviews, vol. 23, Apr. 1979, p. 139-158.

Hathaway, D. H., The Solar Cycle, 2015, Living Reviews in Solar Physics, Volume 12, Issue 1, article id. 4, 87 pp.

Heinemann, S. G.; Hofmeister, S. J.; Veronig, A. M.; Temmer, M., Three-phase Evolution of a Coronal Hole. II. The Magnetic Field, 2018, The Astrophysical Journal, Volume 863, Issue 1, article id. 29, 10 pp.

Heinemann, S. G.; Temmer, M.; Hofmeister, S. J.; Veronig, A. M.; Vennerstrøm, S., Three-phase Evolution of a Coronal Hole. I. 360° Remote Sensing and In Situ Observations, 2018, The Astrophysical Journal, Volume 861, Issue 2, article id. 151, 12 pp.

Hick, P.; Jackson, B. V.; Rappoport, S.; Woan, G.; Slater, G.; Strong, K.; Uchida, Y., Synoptic IPS and YOHKOH soft X-ray observations, 1995, Geophysical Research Letters (ISSN 0094-8276), vol. 22, no. 5, p. 643-646.

Hiremath, K. M.; Hegde, M., Rotation Rates of Coronal Holes and their Probable Anchoring Depths, 2013, The Astrophysical Journal, Volume 763, Issue 2, article id. 137, 12 pp.

Hong, J.; Jiang, Y.; Zheng, R.; Yang, J.; Bi, Y.; Yang, B., A Micro Coronal Mass Ejection Associated Blowout Extreme-ultraviolet Jet, 2011, The Astrophysical Journal Letters, Volume 738, Issue 2, article id. L20, 6 pp.

Hong, J.; Jiang, Y.; Yang, J.; Bi, Y.; Li, H.; Yang, B.; Yang, D., Coronal Bright Points Associated with Minifilament Eruptions, 2014, The Astrophysical Journal, Volume 796, Issue 2, article id. 73, 11 pp. Hong, J.; Jiang, Y.; Yang, J.; Yang, B.; Xu, Z.; Xiang, Y., Mini-filament Eruption as the Initiation of a Jet along Coronal Loops, 2016, The Astrophysical Journal, Volume 830, Issue 2, article id. 60, 9 pp.

Howe, R., Solar Interior Rotation and its Variation, 2009, Living Reviews in Solar Physics, Volume 6, Issue 1, article id. 1, 75 pp.

Hudson, H. S., Coronal holes as seen in soft X-rays by Yohkoh, 2002, In: Proceedings of the SOHO 11 Symposium on From Solar Min to Max: Half a Solar Cycle with SOHO, 11-15 March 2002, Davos, Switzerland. A symposium dedicated to Roger M. Bonnet. Edited by A. Wilson, ESA SP-508, Noordwijk: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-818-2, 2002, p. 341-349.

Hurlburt, N.; Cheung, M.; Schrijver, C.; Chang, L.; Freeland, S.; Green, S. et al., Heliophysics Event Knowledgebase for the Solar Dynamics Observatory (SDO) and Beyond, 2012, Solar Physics, Volume 275, Issue 1-2, pp. 67-78.

Insley, J. E.; Moore, V.; Harrison, R. A., The differential rotation of the corona as indicated by coronal holes, 1995, Solar Physics, Volume 160, Issue 1, pp.1-18.

Japaridze, D. R.; Bagashvili, S. R.; Shergelasvili, B. M.; Chargeishvili, B. B., Investigation of Solar Rotation Using Coronal Holes, 2015, Astrophysics, Volume 58, Issue 4, pp.575-579.

Karachik, Nina; Pevtsov, Alexei A.; Sattarov, Isroil, Rotation of Solar Corona from Tracking of Coronal Bright Points, 2006, The Astrophysical Journal, Volume 642, Issue 1, pp. 562-567.

Kariyappa, R., Solar coronal rotation determined by X-ray bright points in Hinode/XRT and Yohkoh/SXT full-disc images, 2008, Astronomy and Astrophysics, Volume 488, Issue 1, 2008, pp.297-301.

Kirk, M. S.; Pesnell, W. D.; Young, C. A.; Hess Webber, S. A., Automated detection of EUV Polar Coronal Holes during Solar Cycle 23, 2009, Solar Physics, Volume 257, Issue 1, pp. 99-112.

Krieger, A. S.; Timothy, A. F.; Roelof, E. C., A Coronal Hole and Its Identification as the Source of a High Velocity Solar Wind Stream, 1973, Solar Physics, Volume 29, Issue 2, pp.505-525.

Krista, L. D.; Gallagher, P. T., Automated Coronal Hole Detection Using Local Intensity Thresholding Techniques, 2009, Solar Physics, Volume 256, Issue 1-2, pp. 87-100.

Kumar, M.; Srivastava, A. K.; Dwivedi, B. N., Observation of intensity oscillations above X-ray bright points from the Hinode/XRT: signature of magnetohydrodynamic oscillations in the solar corona, 2011, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 415, Issue 2, pp. 1419-1425.

Kumar, P.; Karpen, J. T.; Antiochos, S. K.; Wyper, P. F.; DeVore, C. R.; DeForest, C. E., Evidence for the Magnetic Breakout Model in an Equatorial Coronal-hole Jet, 2018, The Astrophysical Journal, Volume 854, Issue 2, article id. 155, 14 pp.

Lau, Yun-Tung; Finn, John M., Three-dimensional kinematic reconnection in the presence of field nulls and closed field lines, 1990, Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 350, Feb. 20, 1990, p. 672-691.

Lee, E. J.; Archontis, V.; Hood, A. W., Helical Blowout Jets in the Sun: Untwisting and Propagation of Waves, 2015, The Astrophysical Journal Letters, Volume 798, Issue 1, article id. L10, 6 pp.

Lemen, J. R.; Title, A. M.; Akin, D. J.; Boerner, P. F.; Chou, C.; Drake, J. F. et al., The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO), 2012, Solar Physics, Volume 275, Issue 1-2, pp. 17-40.

Mackay, D. H.; Karpen, J. T.; Ballester, J. L.; Schmieder, B.; Aulanier, G., Physics of Solar Prominences: II—Magnetic Structure and Dynamics, 2010, Space Science Reviews, Volume 151, Issue 4, pp. 333-399.

Madjarska, M. S.; Huang, Z.; Doyle, J. G.; Subramanian, S., Coronal hole boundaries evolution at small scales. III. EIS and SUMER views, 2011, Astronomy & Astrophysics, Volume 545, id.A67, 16 pp.

Mancuso, S.; Giordano, S., Differential Rotation of the Ultraviolet Corona at Solar Maximum, 2011, The Astrophysical Journal, Volume 729, Issue 2, article id. 79, 8 pp.

Miralles, M. P.; Cranmer, S. R.; Kohl, J. L., Coronal Hole Properties During the First Decade of UVCS/SOHO, 2006, SOHO-17. 10 Years of SOHO and Beyond, Proceedings of the conference held 7-12 May, 2006 at Giardini Naxos, Sicily, Italy. Edited by H. Lacoste and L. Ouwehand. ESA SP-617. European Space Agency, 2006. Published on CDROM, id.15.

Miralles, M. P.; Cranmer, S. R.; Kohl, J. L., Cyclical variations in the plasma properties of coronal holes, 2002, In: Proceedings of the SOHO 11 Symposium on From Solar Min to Max: Half a Solar Cycle with SOHO, 11-15 March 2002, Davos, Switzerland. A symposium dedicated to Roger M. Bonnet. Edited by A. Wilson, ESA SP-508, Noordwijk: ESA Publications Division, ISBN 92-9092-818-2, 2002, p. 351-359.

Miralles, M. P.; Cranmer, S. R.; Kohl, J. L., Ultraviolet Coronagraph Spectrometer Observations of a High-Latitude Coronal Hole with High Oxygen Temperatures and the Next Solar Cycle Polarity, 2001, The Astrophysical Journal, Volume 560, Issue 2, pp. L193-L196.

Moore, R. L.; Cirtain, J. W.; Sterling, A. C.; Falconer, D. A., Dichotomy of Solar Coronal Jets: Standard Jets and Blowout Jets, 2010, The Astrophysical Journal, Volume 720, Issue 1, pp. 757-770.

Moore, R. L.; Sterling, A. C.; Falconer, D. A.; Robe, D., The Cool Component and the Dichotomy, Lateral Expansion, and Axial Rotation of Solar X-Ray Jets, 2013, The Astrophysical Journal, Volume 769, Issue 2, article id. 134, 19 pp.

Moreno-Insertis, F.; Galsgaard, K., Plasma Jets and Eruptions in Solar Coronal Holes: A Threedimensional Flux Emergence Experiment, 2013, The Astrophysical Journal, Volume 771, Issue 1, article id. 20, 18 pp.

Mou, C.; Madjarska, M. S.; Galsgaard, K.s; Xia, L., Eruptions from quiet Sun coronal bright points. I. Observations, 2018, Astronomy & Astrophysics, Volume 619, id.A55, 24 pp.

Müller, D.; Marsden, R. G.; St. Cyr, O. C.; Gilbert, H. R., Solar Orbiter. Exploring the Sun-Heliosphere Connection, 2013, Solar Physics, Volume 285, Issue 1-2, pp. 25-70.

Müller, D.; Nicula, B.; Felix, S.; Verstringe, F.; Bourgoignie, B.; Csillaghy, A. et al., JHelioviewer. Time-dependent 3D visualisation of solar and heliospheric data, 2017, Astronomy & Astrophysics, Volume 606, id.A10, 13 pp.

Munro, R. H.; Withbroe, G.L., Properties of a Coronal "hole" Derived from Extreme-Ultraviolet Observations, 1972, Astrophysical Journal, vol. 176, p.511.

Nash, A. G.; Sheeley, N. R., Jr.; Wang, Y.-M. Mechanisms for the rigid rotation of coronal holes. STI. 1988. Solar Cycle Workshop, Meeting, 2nd, Lake Tahoe, CA, May 1987 Solar Physics (ISSN 0038-0938), vol. 117, no. 2, 1988, p. 359-389.

Navarro-Peralta, P.; Sanchez-Ibarra, A., An observational study of coronal hole rotation over the sunspot cycle, 1994, Solar Physics (ISSN 0038-0938), vol. 153, no. 1-2, p. 169-178.

Nisticò, G.; Bothmer, V.; Patsourakos, S.; Zimbardo, G., Characteristics of EUV Coronal Jets Observed with STEREO/SECCHI, 2009, Solar Physics, Volume 259, Issue 1-2, pp. 87-108.

Nisticò, G.; Patsourakos, S.; Bothmer, V.; Zimbardo, G., Determination of temperature maps of EUV coronal hole jets, 2011, Advances in Space Research, Volume 48, Issue 9, p. 1490-1498.

Nitta, N.V.; Mason, G. M.; Wiedenbeck, M. E.; Cohen, C. M. S.; Krucker, S.; Hannah, I. G. et al., Coronal Jet Observed by Hinode as the Source of a3He-rich Solar Energetic Particle Event, 2008, The Astrophysical Journal Letters, Volume 675, Issue 2, pp. L125.

Noci, G., Energy Budget in Coronal Holes, 1973, Solar Physics, Volume 28, Issue 2, pp.403-407.

Nolte, J. T.; Krieger, A. S.; Timothy, A. F.; Gold, R. E.; Roelof, E. C.; Vaiana, G.; Lazarus, A. J.; Sullivan, J. D.; McIntosh, P. S., Coronal holes as sources of solar wind, 1976, Solar Physics, vol. 46, Feb. 1976, p. 303-322.

Nolte, J. T.; Solodyna, C. V.; Gerassimenko, M., Short-term temporal variations of X-ray bright points, 1979, Solar Physics, vol. 63, Aug. 1979, p. 113-118.

Obridko, V. N.; Shelting, B. D., Coronal holes as indicators of large-scale magnetic fields in the corona, STI, 1989, Solar Physics (ISSN 0038-0938), vol. 124, no. 1, 1989, p. 73-80.

Obridko, V. N.; Shel'Ting, B. D., On the differential rotation of coronal holes, 1988, Byulletin Solnechnye Dannye Akademie Nauk USSR, No. 1988/1, p. 89-93.

Panesar, N. K.; Sterling, A. C.; Moore, R. L.; Chakrapani, P., Magnetic Flux Cancelation as the Trigger of Solar Quiet-region Coronal Jets, 2016, The Astrophysical Journal Letters, Volume 832, Issue 1, article id. L7, 7 pp.

Paraschiv, A. R.; Lacatus, D. A.; Badescu, T.; Lupu, M. G.; Simon, S.; Sandu, S. G. et al., Study of Coronal Jets During Solar Minimum Based on STEREO/SECCHI Observations, 2010, Solar Physics, Volume 264, Issue 2, pp.365-375.

Pariat, E.; Antiochos, S. K.; DeVore, C. R., A Model for Solar Polar Jets, 2009, The Astrophysical Journal, Volume 691, Issue 1, pp. 61-74.

Patsourakos, S.; Pariat, E.; Vourlidas, A.; Antiochos, S. K.; Wuelser, J. P., STEREO SECCHI Stereoscopic Observations Constraining the Initiation of Polar Coronal Jets, 2008, The Astrophysical Journal Letters, Volume 680, Issue 1, pp. L73.

Pesnell, W. D.; Thompson, B. J.; Chamberlin, P. C., The Solar Dynamics Observatory (SDO), 2012, Solar Physics, Volume 275, Issue 1-2, pp. 3-15.

Pneuman, G. W., The Solar Wind and the Temperature-Density Structure of the Solar Corona, 1973, Solar Physics, Volume 28, Issue 1, pp.247-262.

Priest E.; Magnetohydrodynamics of the Sun; Cambridge University Press, 2014.

Pucci, S.; Poletto, G.; Sterling, A. C.; Romoli, M., Physical Parameters of Standard and Blowout Jets, 2013, The Astrophysical Journal, Volume 776, Issue 1, article id. 16, 12 pp.

Pucci, S.; Poletto, G.; Sterling, A. C.; Romoli, M., Solar Polar X-Ray Jets and Multiple Bright Points: Evidence for Sympathetic Activity, 2012, The Astrophysical Journal Letters, Volume 745, Issue 2, article id. L31, 5 pp.

Raouafi, N. E.; Patsourakos, S.; Pariat, E.; Young, P. R.; Sterling, A. C.; Savcheva, A. et al., Solar Coronal Jets: Observations, Theory, and Modeling, 2016, Space Science Reviews, Volume 201, Issue 1-4, pp. 1-53.

Raouafi, N. E.; Petrie, G. J. D.; Norton, A. A.; Henney, C. J.; Solanki, S. K., Evidence for Polar Jets as Precursors of Polar Plume Formation, 2008, The Astrophysical Journal Letters, Volume 682, Issue 2, pp. L137.

Reiss, M.; Temmer, M.; Rotter, T.; Hofmeister, S. J.; Veronig, A. M., Identification of coronal holes and filament channels in SDO/AIA 193Å images via geometrical classification methods, 2014, Central European Astrophysical Bulletin, Vol. 38, p. 95-104. Reiss, M.A.; Hofmeister, S. J.; De Visscher, R.; Temmer, M.; Veronig, A. M.; Delouille, V. et al., Improvements on coronal hole detection in SDO/AIA images using supervised classification, 2015, Journal of Space Weather and Space Climate, Volume 5, id.A23, 12 pp.

Roša, D.; Brajša, R.; Vršnak, B.; Wöhl, H., The Relation between the Synodic and Sidereal Rotation Period of the Sun, 1995, Solar Physics, Volume 159, Issue 2, pp.393-398.

Rotter, T.; Veronig, A. M.; Temmer, M.; Vršnak, B., Relation Between Coronal Hole Areas on the Sun and the Solar Wind Parameters at 1 AU, 2012, Solar Physics, Volume 281, Issue 2, pp.793-813.

Ruždjak, D.; Ruždjak, V.; Brajša, R.; Wöhl, H., Deceleration of the rotational velocities of sunspot groups during their evolution, 2004, Solar Physics, v. 221, Issue 2, p. 225-236.

Sakao, T.; Kano, R.; Narukage, N.; Kotoku, J.; Bando, T.; DeLuca, E. E. et al., Continuous Plasma Outflows from the Edge of a Solar Active Region as a Possible Source of Solar Wind, 2007, Science, Volume 318, Issue 5856, p. 1585.

Savcheva, A.; Cirtain, J.; Deluca, E. E.; Lundquist, L. L.; Golub, L.; Weber, M. et al., A Study of Polar Jet Parameters Based on Hinode XRT Observations, 2007, Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.59, No.SP3, pp. S771-S778.

Scherrer, P. H.; Schou, J.; Bush, R. I.; Kosovichev, A. G.; Bogart, R. S.; Hoeksema, J. T. et al., The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Investigation for the Solar Dynamics Observatory (SDO), 2012, Solar Physics, Volume 275, Issue 1-2, pp. 207-227.

Schmieder, B.; Guo, Y.; Moreno-Insertis, F.; Aulanier, G.; Yelles Chaouche, L.; Nishizuka, N. et al., Twisting solar coronal jet launched at the boundary of an active region, 2013, Astronomy & Astrophysics, Volume 559, id.A1, 11 pp.

Schou, J.; Antia, H. M.; Basu, S.; Bogart, R. S.; Bush, R. I.; Chitre, S. M. et al., Helioseismic Studies of Differential Rotation in the Solar Envelope by the Solar Oscillations Investigation Using the Michelson Doppler Imager, 1998, The Astrophysical Journal, Volume 505, Issue 1, pp. 390-417.

Schwenn, R., Solar Wind Sources and Their Variations Over the Solar Cycle, 2006, Space Science Reviews, Volume 124, Issue 1-4, pp. 51-76.

Sheeley, N. R., Jr.; Golub, L., Rapid changes in the fine structure of a coronal 'bright point' and a small coronal 'active region', 1979, Solar Physics, vol. 63, Aug. 1979, p. 119-126.

Shelke, R. N.; Pande, M. C., Differential rotation of coronal holes, 1985, Solar Physics (ISSN 0038-0938), vol. 95, Jan. 1985, p. 193-197.

Shergelashvili, B. M.; Fichtner, H.., On the Low-frequency Boundary of Sun-generated Magnetohydrodynamic Turbulence in the Slow Solar Wind, 2012, The Astrophysical Journal, Volume 752, Issue 2, article id. 142, 8 pp.

Shergelashvili, B. M.; Maes, C.; Poedts, S.; Zaqarashvili, T. V., Amplification of compressional magnetohydrodynamic waves in systems with forced entropy oscillations, 2007, Physical Review E, vol. 76, Issue 4, id. 046404.

Shergelashvili, B. M.; Poedts, S.; Pataraya, A. D., Nonmodal Cascade in the Compressible Solar Atmosphere: Self-Heating, an Alternative Way to Enhance Wave Heating, 2006, The Astrophysical Journal, Volume 642, Issue 1, pp. L73-L76.

Shergelashvili, B. M.; Zaqarashvili, T. V.; Poedts, S.; Roberts, B., ``Swing Absorption'' of fast magnetosonic waves in inhomogeneous media, 2005, Astronomy and Astrophysics, v.429, p.767-777.

Shibata, K.; Ishido, Y.; Acton, L. W.; Strong, K. T.; Hirayama, T.; Uchida, Y. et al., Observations of X-ray jets with the YOHKOH Soft X-ray Telescope, 1992, PASJ: Publications of the Astronomical Society of Japan (ISSN 0004-6264), vol. 44, no. 5, p. L173-L179.

Shimojo, M.; Hashimoto, S.; Shibata, K.; Hirayama, T.; Hudson, H. S.; Acton, L. W., Statistical Study of Solar X-Ray Jets Observed with the YOHKOH Soft X-Ray Telescope, 1996, Publications of the Astronomical Society of Japan, v.48, p.123-136.

Shimojo, M.; Shibata, K.; Yokoyama, T.; Hori, K., One-dimensional and Pseudo-Two-dimensional Hydrodynamic Simulations of Solar X-Ray Jets, 2001, The Astrophysical Journal, Volume 550, Issue 2, pp. 1051-1063.

Shimojo, M.; Shibata, K., Physical Parameters of Solar X-Ray Jets, 2000, The Astrophysical Journal, Volume 542, Issue 2, pp. 1100-1108.

Snodgrass, H. B.; Ulrich, R. K., Rotation of Doppler features in the solar photosphere, 1990, The NASA Scientific and Technical Information (STI), Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 351, March 1, 1990, p. 309-316.

Sterling, A. C.; Moore, R. L.; Falconer, D. A.; Adams, M., Small-scale filament eruptions as the driver of X-ray jets in solar coronal holes, 2015, Nature, Volume 523, Issue 7561, pp. 437-440.

Strong, K. T.; Harvey, K.; Hirayama, T.; Nitta, N.; Shimizu, T.; Tsuneta, S., Observations of the variability of coronal bright points by the Soft X-ray Telescope on YOHKOH, 1992, PASJ: Publications of the Astronomical Society of Japan (ISSN 0004-6264), vol. 44, no. 5, p. L161-L166.

Subramanian, S.; Madjarska, M. S.; Doyle, J. G., Coronal hole boundaries evolution at small scales. II. XRT view. Can small-scale outflows at CHBs be a source of the slow solar wind, 2010, Astronomy and Astrophysics, Volume 516, id.A50, 7 pp.

Tian, H.; Xia, L.-D.; Li, S., Long-period oscillations in solar coronal bright points, 2008, Astronomy and Astrophysics, Volume 489, Issue 2, 2008, pp.741-745.

Tousey, R.; Sandlin, G. D.; Purcell, J. D., On Some Aspects of XUV Spectroheliograms, 1968, Structure and Development of Solar Active Regions. Symposium no. 35 held in Budapest, Hungary, 4-8 September 1967. Edited by Karl Otto Kiepenheuer. International Astronomical Union. Symposium no. 35, Dordrecht, D. Reidel., p.411.

Tu, C.; Zhou, C.; Marsch, E.; Xia, L.; Zhao, L.; Wang, J.; Wilhelm, K., Solar Wind Origin in Coronal Funnels, 2005, Science, Volume 308, Issue 5721, pp. 519-523.

Vaiana, G. S.; Davis, J. M.; Giacconi, R.; Krieger, A. S.; Silk, J. K.; Timothy, A. F.; Zombeck, M., X-Ray Observations of Characteristic Structures and Time Variations from the Solar Corona: Preliminary Results from SKYLAB, 1973, Astrophysical Journal, vol. 185, p.L47.

Verbeeck, C.; Delouille, V.; Mampaey, B.; De Visscher, R., The SPoCA-suite: Software for extraction, characterization, and tracking of active regions and coronal holes on EUV images, 2014, Astronomy & Astrophysics, Volume 561, id.A29, 16 pp.

Verbeeck, C.; Higgins, P. A.; Colak, T.; Watson, F. T.; Delouille, V.; Mampaey, B.; Qahwaji, R., A Multi-wavelength Analysis of Active Regions and Sunspots by Comparison of Automatic Detection Algorithms, 2013, Solar Physics, Volume 283, Issue 1, pp.67-95.

Wagner, W. J., The Rigid Rotation of Coronal Holes, 1975, Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 7, p.457.

Waldmeier, M., The coronal hole at the 7 March 1970 solar eclipse, 1975, Solar Physics, vol. 40, Feb. 1975, p. 351-358.

Wang, Y. -M.; Pick, M.; Mason, G. M., Coronal Holes, Jets, and the Origin of 3He-rich Particle Events, 2006, The Astrophysical Journal, Volume 639, Issue 1, pp. 495-509.

Wang, Y. M.; Sheeley, N. R., Jr., Coronal White-Light Jets near Sunspot Maximum, 2002, The Astrophysical Journal, Volume 575, Issue 1, pp. 542-552.

Wang, Y.-M.; Biersteker, J. B.; Sheeley, N. R., Jr.; Koutchmy, S.; Mouette, J.; Druckmüller, M., The Solar Eclipse of 2006 and the Origin of Raylike Features in the White-Light Corona, 2007, The Astrophysical Journal, Volume 660, Issue 1, pp. 882-892.

Wang, Y.-M.; Sheeley, N. R., Jr., Sources of the Solar Wind at Ulysses during 1990-2006, 2006, The Astrophysical Journal, Volume 653, Issue 1, pp. 708-718.

Wang, Y.-M.; Sheeley, N. R.; Socker, D. G.; Howard, R. A.; Rich, N. B., The dynamical nature of coronal streamers, 2000, Journal of Geophysical Research, Volume 105, Issue A11, p. 25133-25142.

Wilhelm, K.; Abbo, L.; Auchère, F.; Barbey, N.; Feng, L.; Gabriel, A. H. et al., Morphology, dynamics and plasma parameters of plumes and inter-plume regions in solar coronal holes, 2011, The Astronomy and Astrophysics Review, Volume 19, Issue 1, article id #35, 70pp.

Wittmann, A. D., On the Relation between the Synodic and Sidereal Rotation Period of the Sun, 1996, Solar Physics, Volume 168, Issue 1, pp. 211-213.

Wöhl, H.; Brajša, R.; Hanslmeier, A.; Gissot, S. F., A precise measurement of the solar differential rotation by tracing small bright coronal structures in SOHO-EIT images. Results and comparisons for the period 1998-2006, 2010, Astronomy and Astrophysics, Volume 520, id.A29, 11pp.

Woods, T. N.; Eparvier, F. G.; Hock, R.; Jones, A. R.; Woodraska, D.; Judge, D. et al., Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE) on the Solar Dynamics Observatory (SDO): Overview of Science Objectives, Instrument Design, Data Products, and Model Developments, 2012, Solar Physics, Volume 275, Issue 1-2, pp. 115-143.

Yokoyama, T.; Shibata, K., Magnetic reconnection as the origin of X-ray jets and Hα surges on the Sun, 1995, Nature, Volume 375, Issue 6526, pp. 42-44.

Young, P. R.; Muglach, K., A coronal hole jet observed with Hinode and the Solar Dynamics Observatory, 2014, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume 66, Issue SP1, id.S129 pp. (a)

Young, P. R.; Muglach, K., Solar Dynamics Observatory and Hinode Observations of a Blowout Jet in a Coronal Hole, 2014, Solar Physics, Volume 289, Issue 9, pp.3313-3329. (b)

Young, Peter R., Dark Jets in Solar Coronal Holes, 2015, The Astrophysical Journal, Volume 801, Issue 2, article id. 124, 9 pp.

Zaqarashvili, T. V.; Roberts, B., Swing wave-wave interaction: Coupling between fast magnetosonic and Alfvén waves, 2002, Physical Review E, vol. 66, Issue 2, id. 026401.

Zhang, J.; Woch, J.; Solanki, S. K.; von Steiger, R.; Forsyth, R., Interplanetary and solar surface properties of coronal holes observed during solar maximum, 2003, Journal of Geophysical Research (Space Physics), Volume 108, Issue A4, CiteID 1144.