

მზის კორონალური წვიმის დინამიკის შესწავლა

ზურაბ ვაშალომიძე

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

ფიზიკისა და ასტრონომიის სადოქტორო პროგრამა

სამეცნიერო ხელმძღვანელები: თეიმურაზ ზაქარაშვილი, პროფესორი

ვასილ კუხიანიძე, ასოცირებული პროფესორი

ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტი

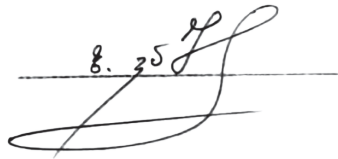
თბილისი 2022

განაცხადი

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

ზურაბ ვაშალომიძე

11 იანვარი 2022 წელი



აბსტრაქტი

მზეზე მიმდინარე მოვლენებისა და კოსმოსური ამინდის პროგნოზირება საშუალებას გვაძლევს უკეთ შევისწავლოთ მზის გავლენა ჰელიოსფეროსა და დედამიწის ატმოსფეროზე. სადოქტორო ნაშრომის მთავარი მიზანია, ერთ-ერთი ასეთი მოვლენის, მზის კორონული წვიმის ფორმირების და ევოლუციის დაკვირვებითი მტკიცებულების შესწავლა, მზის კოსმოსური მისიებიდან მიღებული მონაცემების საშუალებით. კორონული წვიმა წარმოადგენს ცივი, მკვრივი პლაზმის წვეთების ვარდნას მზის მაგნიტური მარყუქების გასწვრივ, მარყუქის წვეროდან მათი საყრდენი წერტილების მიმართულებით. ერთის მხრივ კორონული წვიმა დაკავშირებულია მზის აქტიური რეგიონის მაგნიტურ მარყუქებთან. სითბური არამდგრადობის საფუძველზე, კატასტროფული გაციების შედეგად, როდესაც სითბოს გამოსხივებითი კარგვა ლოკალურად აღემატება მიღებული სითბოს რაოდენობას, მყისიერად ხდება პლაზმის წვეთების წარმოქმნა და შემდეგომ ვარდნა მაგნიტური მარყუქების გასწვრივ მზის გრავიტაციულ აჩქარებაზე ნაკლები აჩქარებით. მეორეს მხრივ, კორონული წვიმა უკავშირდება პროტუბერანცებს. როდესაც კორონული წვიმის სახით, პროტუბერანცის პლაზმა იწყებს ვარდნას, მისი მასა საგრძნობლად მცირდება. საბოლოო ჯამში ზევით მიმართული ლორენცის ძალა აჭარბებს გრავიტაციულ ძალას, რაც პროტუბერანცის არასტაბილურობის წინამორბედი. აქედან გამომდინარე გარკვეული პროცესები იწვევენ წონასწორობის დარღვევას და შესაბამისად პროტუბერანცის არასტაბილურობას თანმდევი კორონული მასის ამოფრქვევის სახით, რაც საბოლოო ჯამში მოქმედებს კოსმოსური ამინდის პირობებზე როგორც ჰელიოსფეროში ასევე დედამიწის მახლობლად.

ძირითადი საძიებო სიტყვები: კორონა, კორონული წვიმა, პროტუბერანცი, კორონული მასის ამოფრქვევა

Abstract

Solar and space weather predictions will allow us to better understanding the impact of the Sun on the heliosphere and the Earth's atmosphere. The main aim of the doctoral work is to study the observational evidence of the formation and evolution of solar coronal rain using data obtained from solar space missions. Coronal rain is the fall of cold, dense plasma blobs falling down towards the surface in the hotter solar corona. The coronal rain is observed to occur in active region coronal loops, where the blobs are formed by thermal instability during catastrophic cooling, when radiative losses locally overcome the heating input, which instantly cause to form the plasma blobs. Another type of coronal rain is related to solar prominences, where cool blobs detach from the prominence main body and fall down toward the photosphere. Massive plasma downflows from prominences in the form of coronal rain will lead to the decrease of the prominence mass, which may affect the equilibrium. Lorentz force may succeed over gravity after some time and the prominence may start to rise up slowly. Therefore, some process (or processes) has to destabilise the equilibrium and lead to the prominence instability and consequently to the CME eruption, which ultimately effect the space weather conditions near the Earth.

Key words: Corona, Coronal Rain, Prominences, Coronal Mass Ejections (CMEs)

მადლობა

პირველ რიგში, უდიდესი პატივისცემა და მადლიერება მსურს გამოვხატო ჩემი ხელმძღვანელების: პროფესორის თეიმურაზ ზაქარაშვილის და ასოცირებული პროფესორის ვასილ კუხიანიძის მიმართ დისერტაციის კვლევის პერიოდში გაწეული დახმარებისა და ზედამხედველობისთვის.

ასევე მინდა მადლობა გადავუხადო ასოცირებულ პროფესორს გიორგი რამიშვილს სადისერტაციო ნაშრომში მონაწილეობისა და გაწეული დახმარებისთვის.

მადლობას ვუხდით თანამშრომლობისთვის ყველა იმ პიროვნებას ვინც მონაწილეობა მიიღო სადისერტაციო ნაშრომის მომზადებაში.

მინდა მადლობა გადავუხადო შოთა რუსთაველის სამეცნიერო ფონდს სადისერტაციო ნაშრომის ფინანსური მხარდაჭერისთვის. მადლობა საქართველოს ევგენი ხარაძის ეროვნულ ასტროფიზიკურ ობსერვატორიას მატერიალურ-ტექნიკური ბაზით უზრუნველყოფისთვის.

დასასრულს მადლობა მინდა გადავუხადო ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტს სადისერტაციო ნაშრომისთვის საჭირო მატერიალური, ტექნიკური და ინტელექტუალური გარემოს უზრუნველყოფისთვის.

სარჩევი

სარჩევი.....	VI
ნახაზების ჩამონათვალი.....	VIII
აბრევიატურის ჩამონათვალი.....	XVI
თავი 1. შესავალი.....	1
1.1 მზე.....	2
1.2 მზის კორონული წვიმა.....	6
1.3 კორონული წვიმის და პროტუბერანცის კავშირი.....	8
1.4 კორონული წვიმის წარმოშობის მექანიზმი.....	9
თავი 2. დაკვირვებითი მონაცემის მიღების და დამუშავების მეთოდოლოგია.....	12
2.1 მზის კოსმოსური თანამგზავრები.....	12
2.2 დაკვირვებითი მონაცემის მიღების და დამუშავების პროგრამული უზრუნველყოფის მეთოდოლოგია.....	14
თავი 3. მზის კორონული წვიმის დინამიკის შესწავლა.....	17
3.1 2012 წლის 22 თებერვალს დაკვირვებული კორონული წვიმის ფორმირება და ევოლუცია.....	17
3.1.1 პირველი ჯგუფის წვიმის წვეთები.....	20
3.1.2 მეორე ჯგუფის წვიმის წვეთები.....	26
3.2 ადიაბატური ინდექსის შეფასება კორონული წვიმის დროს.....	28
თავი 4. კორონული წვიმის კავშირი პროტუბერანცებთან.....	36
4.1 კორონული წვიმის შედეგად გამოწვეული პროტუბერანცის ამოფრქვევა.....	36

4.2 მასიური კორონული წვიმით გამოწვეული პროტუბერანცის არამდგრადობა და CME	46
4.2.1 2011 წლის 16 – 18 მაისის მოვლენა.....	47
4.2.2 2011 წლის 22 – 24 დეკემბრის მოვლენა.....	54
4.2.3 2012 წლის 7 – 8 აგვისტოს მოვლენა.....	58
4.2.4 პროტუბერანცის ზევით ასვლის შესაძლო მექანიზმი.....	62
თავი 5 შედეგები დისკუსიის სახით.....	67
დასკვნა	74
ბიბლიოგრაფია	77
დანართი 1	81
დანართი 2	87

ნახაზების ჩამონათვალი

- ნახაზი 1.1:** მზის აგებულება, მზის ატმოსფერო და მზეზე მიმდინარე სხვადასხვა მოვლენები (<https://www.thesuntoday.org/sun/parts-of-the-suns-atmosphere/>).....2
- ნახაზი 1.2:** მარცხენა სურათზე წარმოდგენილია 2004 წელს SOHO-ს მიერ EIT ინსტრუმენტით გადაღებული წვეთების მოძრაობის ტრაექტორია HII ხაზში, ხოლო მარჯვენა სურათზე ნაჩვენებია იგივე ტრაექტორიის მქონე წვეთები გადაღებული H α ხაზში (De Groof et al. 2004, 2005).....7
- ნახაზი 3.1.** კორონული მარყუჟის გაციების გამოსახულებები AR 11420 აქტიურ რეგიონთან (2012 წლის 22 თებერვალი). სურათის ზედა მხარე წარმოადგენს SDO-ს მიერ: 171 Å (მარცხენა) და 304 Å (მარჯვენა) სპექტრულ ხაზში 20:00 საათზე უნივერსალური დროით (UT) მიღებულ გამოსახულებებს. სურათის ქვედა მხარეს წარმოდგენილია 2 საათის შემდეგ მიღებული გამოსახულებები იმავე ტალღის სიგრძის ხაზებში: 171 Å (მარცხენა) და 304 Å (მარჯვენა). თეთრი წყვეტილი ხაზებით მარჯვენა ქვედა გამოსახულებაზე წარმოდგენილია პირველი ჯგუფის წვიმის წვეთების ვარდნის ტრაექტორია. ხოლო თეთრი წერტილოვანი მრუდით წარმოდგენილია მეორე ჯგუფის წვეთების ვარდნის ტრაექტორია 18
- ნახაზი 3.2.** STEREO_B-ს მიერ 2012 წლის 22 თებერვალს UT 21:56 სთ-ზე აქტიური რეგიონის AR 11420 მახლობლად დაკვირვებული კორონული მარყუჟის გამოსახულება 304 Å-ს ხაზში.....20
- ნახაზი 3.3.** პირველი ჯგუფის პირველი და მეორე წვიმის წვეთების ექვსი თანმიმდევრული გამოსახულება (ნახაზის ზედა მხარე) და მესამე წვეთის ხუთი თანმიმდევრული გამოსახულება (ნახაზის ქვედა მხარე). გამოსახულებებზე წვეთები თეთრი ისრით არის მითითებული. თითოეული გამოსახულება წარმოადგენს 18×145 arcsec-ს ზომის ველს, რომელიც ემთხვევა 3.1 ნახაზის ქვედა მარჯვენა გამოსახულებაზე დატანილი თეთრი წყვეტილი ხაზების შესაბამის არეს.....22

ნახაზი 3.4. პირველი ჯგუფის წვეთების სივრცე-დროითი ჭრილი X ღერძის გასწვრივ 304 Å-ის ხაზში. მარცხენა გამოსახულება წარმოადგენს ჭრილს პირველი და მეორე წვეთის ვარდნის ტრაექტორიის გასწვრივ, ხოლო მარჯვენა - გამოსახულება ჭრილს მესამე წვეთის ვარდნის ტრაექტორიის გასწვრივ.....23

ნახაზი 3.5. პირველი (წითელი) და მესამე (ლურჯი) წვეთების სიმაღლის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი. მარცხენა მხარეს წარმოდგენილია აპროქსიმაცია საწყისი სიჩქარის გარეშე, ხოლო მარჯვენა მხარეს წარმოდგენილია აპროქსიმაცია საწყისი სიჩქარით. წყვეტილი სასაზღვრო მრუდით წარმოდგენილია 95%-იანი სანდოობის არე, ხოლო ვერტიკალური ცდომილების ხაზები წარმოადგენენ სტანდარტულ გადახრას.....24

ნახაზი 3.6. პირველი ჯგუფის პირველი (კვადრატები) და მეორე (სამკუთხედები) წვეთების დაკვირვებული სიმაღლის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი. უწყვეტი და წყვეტილი მრუდით მოცემულია რიცხვითი მოდელირების შედეგი.....25

ნახაზი 3.7. მეორე ჯგუფის პირველი (წითელი წერტილები) და მეორე (ლურჯი წერტილები) წვეთების მანძილის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი. პირველი (ლურჯი უწყვეტი მრუდი) და მეორე (წითელი უწყვეტი მრუდი) წვეთების არანულოვანი საწყისი სიჩქარით აპროქსიმირებული მრუდები.....27

ნახაზი 3.8. აქტიური რეგიონის ტემპერატურული და გამოსხივების რუკები კორონული წვიმის დაწყების და დამთავრების დროს. გამოსხივების რუკა წარმოდგენილია ზედა და ქვედა მარცხენა მხარეს, ხოლო ტემპერატურული რუკა ზედა და ქვედა მარჯვენა მხარეს. თეთრი ისრით მითითებულია მაგნიტური მარყუჟების სისტემა. მუქი ლური ფერი შეესაბამება დაბალ ტემპერატურას, ხოლო ღია მოწითალო ფერი მაღალ ტემპერატურას (ტემპერატურის ლოგარიტმული შკალა ფერების მიხედვით მოცემულია ნახაზის მარჯვენა მხარეს).....29

ნახაზი 3.9. ექვს სხვადასხვა ტალღის სიგრძეში ავტომატურად დაფიქსირებული კორონული მარყუჟები. სხვადასხვა ფერით გამოსახულია სხვადასხვა ტალღის სიგრძე (ტალღის სიგრძეები მითითებულია სურათის ზედა მხარეს).....31

ნახაზი 3.10. სურათზე წარმოდგენილია სხვადასხვა ავტომატურად დაფიქსირებული მარყუქები სხვადასხვა ტალღის სიგრძეში (მარყუქის გამოსახულება და ტალღის სიგრძე წარმოდგენილია სვეტის ზედა სურათზე). თითოეულ სვეტში მოცემულია შესაბამისი მარყუქის: ტემპერატურა, ელექტრონული სიმკვრივე, მარყუქის სიგანე და საშუალო კვადრატული გადახრა თითოეული მიახლოებისთვის.....32

ნახაზი 3.11. 240 ერთეული DEM პროგრამული კოდით ავტომატურად მოძებნილი მარყუქების სტატისტიკა. მარჯვენა ზედა მხარეს წარმოდგენილია გაზომილი გამოსხივება როგორც ტემპერატურის ფუნქციის განაწილება Rosner, Tucker, Vaiana (RTV) მოდელის მიხედვით. მარცხენა შუა ნაწილში წარმოდგენილია კორონული მარყუქების ტემპერატურული განაწილება. ქვედა მარცხენა მხარეს - ტემპერატურის ნორმალური განაწილების ნახევარსიგანე. მარცხენა შუა ნაწილი გვიჩვენებს ელექტრონის სიმკვრივის განაწილებას. ქვედა მარცხენა გრაფიკი წარმოადგენს კორონული მარყუქების სიგანის განაწილებას.....33

ნახაზი 3.12. კორონული წვიმის დაწყების (ნახაზის მარცხენა მხარე) და დამთავრების (ნახაზის მარჯვენა მხარე) დროს ელექტრონული სიმკვრივის და ტემპერატურის დამოკიდებულების კვადრატული პოლინომიალით აპროქსიმირებული (უწყვეტი მრუდი) გრაფიკი.....35

ნახაზი 4.1. SDO, STEREO-A და STEREO-B-ს კოსმოსური თანამგზავრების მდებარეობა კოსმოსში დაკვირვებული მოვლენის დროს.....36

ნახაზი 4.2. პროტუბერანცის ევოლუცია 2011 წლის 10 ნოემბრიდან 14 ნოემბრამდე. სურათის მარცხენა მხარე წარმოადგენს STEREO_B/EUVI-ს 171 Å, 195 Å და 304 Å სპექტრული ხაზებისგან შემდგარ ჯამურ გამოსახულებას. სურათის მარჯვენა სვეტი წარმოადგენს SDO/AIA-ს 171 Å, 193 Å და 211 Å ტალღის სიგრძეებში მიღებული გამონასახის ერთობლიობას. სურათის ზედა გამოსახულებები წარმოადგენს 2011 წლის 10 ნოემბრის დაკვირვებას (ისრით მითითებულია პროტუბერანცის საწყისი საზღვარი), ხოლო ქვედა გამოსახულებები - 2011 წლის 14 ნოემბრის დაკვირვებებს (ისრით მითითებულია დასასრული საზღვარი).....37

ნახაზი 4.3. პროტუბერანცის ევოლუცია 2011 წლის 18-20 ნოემბერის განმავლობაში. სურათის მარცხენა სვეტი წარმოადგენს SDO/AIA-ს გამოსახულებების ერთობლიობას, 2011 წლის 18 ნოემბერი 18:16 UT ზედა გამოსახულება და 2011 წლის 20 ნოემბერი 16:00 UT ქვედა გამოსახულება. ხოლო სურათის მარჯვენა მხარე წარმოადგენს STEREO_A/EUVI-ის გამოსახულებებს, 2011 წლის 18 ნოემბერი 18:15 UT ზედა გამოსახულება და 2011 წლის 20 ნოემბერი 15:31 UT ქვედა გამოსახულება. ისრები მიუთითებენ ტორნადოს მდებარეობას პროტუბერანცის საყრდენთან.....39

ნახაზი 4.4. 2011 წლის 20–21 ნოემბრს დაკვირვებული პროტუბერანცის საყრდენთან მზის მაგნიტური ტორნადოს ევოლუცია. მარცხენა სვეტში წარმოდგენილია SDO/AIA-ს ჯამური გამოსახულებები: 20 ნოემბრის UT 16:16 სთ-ზე (ზედა ჩარჩო), 21 ნოემბრის UT 08:16 სთ-ზე (შუა ჩარჩო) და 21 ნოემბრის UT 12:16 სთ-ზე (ქვედა ჩარჩო). მარჯვენა სვეტში - STEREO-A/EUVI-იდან მიღებული გამოსახულებების ჯამი: 20 ნოემბრის UT 16:15 სთ-ზე (ზედა ჩარჩო), 21 ნოემბრის UT 08:10 სთ-ზე (შუა ჩარჩო) და 21 ნოემბრის UT 12:10 სთ-ზე (ქვედა ჩარჩო). ნახაზზე ისრით მითითებულია ტორნადოს ევოლუცია.....40

ნახაზი 4.5. მზის კორონული წვიმა, 2011 წლის 21 ნოემბრის SDO და STEREO-A-ის კოსმოსური თანამგზავრებიდან მიღებული დაკვირვებითი მონაცემი. მარცხენა სვეტში მოცემულია SDO/AIA-ს მიერ მიღებული დაკვირვებების ჯამური გამოსახულებები 21 ნოემბრის: UT 16:00 სთ, UT 18:00 სთ და UT 20:00 სთ-ზე. შავი მართკუთხედით მითითებულია წვიმის წვეთების ვარდნის არე, რაც ნაჩვენებია 4.6 ნახაზზე. დაშტრიხული მრუდი წარმოადგენს წვეთების ვარდნის ტრაექტორიას, ხოლო ისრით მითითებულია წვეთების დაცემის არე. ნახაზის მარჯვენა სვეტში წარმოდგენილია STEREO-A/EUVI-იდან მიღებული გამოსახულებები 304 Å ტალღის სიგრძის ხაზში. მარჯვენა სვეტის ზედა, შუა და ქვედა ჩარჩოები შეესაბამება 21 ნოემბრის: UT 15:56 სთ, UT 17:56 სთ და UT 19:56 სთ დროებს.....41

ნახაზი 4.6. კონკრეტული ერთი წვეთის ვარდნის ტრაექტორია, ჩარჩოები წარმოადგენილია 4.5 ნახაზზე მარცხენა ზედა გამოსახულებაზე დატანილი მართკუთხედის საზღვრების შესაბამისად. კორონული წვიმის წვეთის დინამიკა 30

წუთიანი დროის ინტერვალში (თითოეული ჩარჩოს შორის განსხვავება 6 წთ-ია). მარჯვენა და მარცხენა სვეტები წარმოადგენს SDO/AIA-ს მიერ 304 Å და 171 Å ტალღის სიგრძის ხაზში მიღებული გამოსახულებების ერთობლიობას. ისრით მითითებულია წვეთის მდებარეობა დროის მოცემულ მონაკვეთში.....42

ნახაზი 4.7. კორონული წვიმის შედეგად გამოწვეული პროტუბერანცის არამდგრადობა (წონასწორობის დარღვევა) და ამოფრქვევა. მარცხენა სვეტი გვიჩვენებს SDO/AIA-ს მიერ 304 Å-ის ხაზში მიღებულ სამ სხვადასხვა გამოსახულებას: ზედა, შუა და ქვედა გამოსახულებები შეესაბამება 22 ნოემბრის: UT 20:24 სთ, UT 21:24 სთ და UT 22:24 სთ დროებს. მარჯვენა სვეტი გვიჩვენებს STEREO-A-ს მიერ 195 Å-ში მიღებულ გამოსახულებებს.....43

ნახაზი 4.8. STEREO-A-ს თანამგზავრიდან მიღებული CME-ის ამოფრქვევის გამოსახულება. ზედა ჩარჩოები წარმოადგენს STEREO-A-ს კორონოგრაფის COR1-ის დაკვირვებით მიღებულ CME-ის სამ თანმიმდევრულ გამოსახულებას. გამოსახულებების ცენტრში წარმოდგენილია მზის გამოსახულება EUVI-A-ს 304 Å ტალღის სიგრძის ხაზში. ისარი მიუთითებს კორონული მასის ამოფრქვევის მდებარეობას კოსმოსურ სივრცეში. თავდაპირველად CME გამოჩნდა COR1-ის გამოსახულებებში 22 ნოემბერს UT 22:30 სთ-ზე (ზედა მარცხენა ჩარჩო) და გაქრა UT 23:15 სთ-ზე (ზედა მარცხენა ჩარჩო). ქვედა ჩარჩოები წარმოადგენს CME-ის დროით ევოლუციას STEREO-A-ს COR2-ის კორონოგრაფის გამოსახულებებში. სურათის ცენტრებში ქვედა ჩარჩოებზე წარმოდგენილია მზის გამოსახულება EUVI-A-ს 195 Å სპექტრულ ხაზში.....45

ნახაზი 4.9. კოსმოსში თანამგზავრების მდებარეობა დაკვირვებული მოვლენების დროს.....46

ნახაზი 4.10. პროტუბერანცის ევოლუცია 2011 წლის 16 მაისის UT 14:06 სთ-დან და 2011 წლის 18 მაისის UT 00:06 სთ-მდე (SDO და STEREO-A კოსმოსური თანამგზავრების ერთობლივი დაკვირვება). მარცხენა მხარე წარმოადგენს SDO/AIA-დან მიღებული 304 Å, 171 Å და 193 Å გამოსახულებების ჯამურ სურათს. მარჯვენა მხარეს ნაჩვენებია STEREO-

A/EUVI-დან მიღებული გამოსახულება 195 Å-ის ხაზში. თეთრი ისარი მიუთითებს ერთიდაიმავე წერტილის მდებარეობას სხვადასხვა თანამგზავრიდან გადაღებულ სურათებზე. F_1 -ით აღნიშნულია ტორნადოს მსგავსი სტრუქტურის საწყისი, ხოლო B_1 და B_2 -ით მითითებულია აქტიური არის ერთიდაიგივე წერტილები. თეთრი წყვეტილი მრუდით მოცემულია პროტუბერანცის მიახლოებითი საზღვრები.....48

ნახაზი 4.11. 2011 წლის 16 მაისის UT 14:06 სთ-დან - 2011 წლის 18 მაისის UT 06:36 სთ-მდე SDO/AIA-ს მიერ 304 Å ხაზში დაკვირვებული პროტუბერანცის ევოლუცია.....49

ნახაზი 4.12. პროტუბერანცის ევოლუციის სივრცე-დროითი დიაგრამა 304 Å სპექტრულ ხაზში 2011 წლის 16 მაისის 14:00 UT-დან 2011 წლის 18 მაისის 11:30 UT-მდე (ზედა მარჯვენა მხარე). ჭრილის მდებარეობა მოცემულია თეთრი წყვეტილი ხაზით ზედა მარცხენა მხარეს. შუა და ქვედა ნაწილებში წარმოდგენილია 19:00 UT (16 მაისი) – 02:00 UT (17 მაისი) დროითი ინტერვალი 304 Å და 171 Å სპექტრულ ხაზებში.....50

ნახაზი 4.13. ნახაზის ზედა მარცხენა მხარეს წარმოდგენილია ვარდნილი პლაზმის 12 ხილული ტრაექტორია თეთრი წერტილოვანი მრუდით. ნახაზის ზედა მარჯვენა კუთხეში წარმოდგენილია STEREO_A/EUVI თანამგზავრიდან 195 Å სპექტრულ ხაზში მიღებულ პროტუბერანცის მილის გამოსახულებას (წითელი წყვეტილი მრუდი).....51

ნახაზი 4.14. პროტუბერანცის არასტაბილურობის შედეგად ამოფრქვეული CME. თეთრი ისრით მოცემულია CME-ის მდებარეობა 2011 წლის 18 მაისის UT 07:24-09:39 სთ. დროით შუალედში. LASCO/C2-ი აკვირდება 2.1-6 მზის რადიუსის ტოლ არეს თეთრ სინათლეში.....53

ნახაზი 4.15. SDO და STEREO-B-ს თანამგზავრებიდან დაკვირვებული პროტუბერანცის ევოლუცია 2011 წლის 22 დეკემბრის UT 20:06 სთ-დან 2011 წლის 23 დეკემბრის UT 21:06 სთ-მდე. მარჯვენა სვეტში წარმოდგენილია SDO-დან 304 Å, 171 Å და 193 Å სპექტრულ ხაზში მიღებული დაკვირვებების ჯამური გამოსახულება, ხოლო მარჯვენა სვეტში - STEREO-B-ს თანამგზავრებიდან 195 Å სპექტრულ ხაზში მიღებული გამოსახულება. F'_1, F'_2 და F'_3 წერტილები წარმოადგენს პროტუბერანცის საყრდენებს ორივე გამოსახულებებზე. წითელი დამტრიხული მრუდით წარმოდგენილია პროტუბერანცის სავარაუდო

საზღვრები, ხოლო თეთრი წერტილოვანი მრუდით კორონული წვიმის წვეთების ვარდნის ტრაექტორიები.....55

ნახაზი 4.16. SDO/AIA-ს მიერ 2011 წლის 22 დეკემბრის UT 20:06 სთ-დან - 2011 წლის 24 დეკემბრის UT 00:46 სთ-მდე დაკვირვებული პროტუბერანცის ევოლუციის გამოსახულება.....56

ნახაზი 4.17. SOHO/LASCO-C2-დან დაბნახული CME-ის ამოფრქვევა პროტუბერანცის არასტაბილურობის შემდეგ. მარცხენა მხარეს წარმოდგენილია დროითი სხვაობის გამოსახულებები (36 წთ-იანი დროითი სხვაობა). ლურჯი ზოლი მიუთითებს წინა კიდის პოზიციას, ხოლო წითელი ზოლი წინა კიდის მიახლოებით კონტურს. მარჯვენა მხარეს წარმოდგენილია LASCO-C2 კორონოგრაფიდან მიღებული გამოსახულებები. თეთრი ისარი მიუთითებს CME-ის მდებარეობას. გამოსახულებები აჩვენებენ 2011 წლის 24 დეკემბრის UT 01:26-02:48 სთ დროით შუალედს.....57

ნახაზი 4.18. პროტუბერანცის ევოლუცია 2012 წლის 7 აგვისტოს UT 09:06 სთ-დან 8 აგვისტოს UT 02:06 სთ-მდე. მარცხენა მხარე გვიჩვენებს SDO/AIA-ს თანამგზავრის მიერ 304 Å, 171 Å და 193 Å ტალღის სიგრძეში დაკვირვებული გამოსახულებების ჯამურ სურათს. მარჯვენა მხარე გვიჩვენებს STEREO-A/EUVI-ის დაკვირვებებს 304 Å სპექტრულ ხაზში. თეთრი ისრებით ნაჩვენებია პროტუბერანცის საყრდენი წერტილები F_1'' და F_2'' ორივე კოსმოსური თანამგზავრის გამოსახულებებზე. თეთრი დაშტრიხული მრუდით აღნიშნულია პროტუბერანცის მილის სავარაუდო საზღვრები, ხოლო თეთრი წერტილოვანი მრუდები პლაზმის ვარდნის ხილულ ტრაექტორიებს წარმოადგენს. B_1'' -ით ავლნიშნეთ წვეთივ ვარდნის შედეგად მზის ზედაპირზე მიღებული განათებული წერტილი.....59

ნახაზი. 4.19. STEREO-A/EUVI-ის 304 Å ხაზში 2012 წლის 7 (UT 09:06 სთ) – 8 (UT 04:06 სთ) აგვისტოს დაკვირვებული პროტუბერანცის ევოლუცია თანმდევი ამოფრქვევით60

ნახაზი 4.20. SOHO/LASCO/C2-ის მიერ დაკვირვებული CME-ის ამოფრქვევა. მარცხენა მხარეს წარმოდგენილია 35 წთ-იანი დროითი სხვაობის გამოსახულებები. ლურჯი ზოლი

მიუთითებს CME-ის კიდის საწყისი მდებარეობა გარე კორონაში, ხოლო წითელი ხაზი - რიცხვითად მიღებულ კიდის მიახლოებით კონტურს. გამოსახულებები გვიჩვენებს CME-ის ევოლუციას 2012 წლის 8 აგვისტოს UT 06:48 სთ-სა და UT 07:36 სთ-ზე. თეთრი ისრებით მითითებულია კორონული მასის ამოფრქვევის მდებარეობა.....61

ნახაზი 4.21. პროტუბერანცის არეში მაგნიტური ველის ექსტრაპოლაცია ნელი ასვლის პროცესის დაწყებამდე (2011 წლის 16 მაისი UT 18:04 სთ. ზედა გამოსახულება) და დაწყების შემდეგ (2011 წლის 17 მაისი UT 18:04 სთ. ქვედა გამოსახულება). თეთრი მრუდით წარმოდგენილია დახურული მაგნიტური ძაღწირები, ხოლო მწვანე და იასამნისფერი წარმოადგენს ღია ძაღწირებს დადებითი და უარყოფითი პოლარობით...64

ნახაზი 4.22. პროტუბერანცის ევოლუციის სქემატური დინამიკა. შავი ელიფსი წარმოადგენს პროტუბერანცს, დაშტრიხული მრუდით ნაჩვენებია კორონული წვიმის ვარდნის ტრაექტორია. საწყისი კონფიგურაცია მოცემულია ზედა მარცხენა მხარეს, წვიმის შედეგად პროტუბერანცის ნელი ასვლა წარმოდგენილია ნახაზის ზედა მარჯვენა მხარეს, ხოლო საბოლოო ამოფრქვევა CME-ის სახით - ქვედა სქემაზე.....65

ნახაზი 4.23. 2011 წლის 16-18 მაისს დაკვირვებული პროტუბერანცის აღმავალი სვლა (ლურჯი ზოლი) და კორონული წვიმის შედეგად მთელი პროცესის მანძილზე შემცირებული სიმკვრივე (წითელი ზოლი).....66

ნახაზი 5.1. კორონული მარყუჟების გადაერთება, რის შედეგადაც მოხდა აქტიური რეგიონის რეკონსტრუქცია. შესაძლო მარყუჟები ნაჩვენებია თეთრი დაშტრიხული მრუდით, AR 11420 აქტიური რეგიონის მახლობლად 171 Å ხაზში 2012 წლის 22 თებერვალის UT 21:00 სთ-ზე. შავი დაშტრიხული ხაზით ნაჩვენებია წვეთის ვარდნის ტრაექტორია.....70

აბრევიატურის ჩამონათვალი

CME – Coronal Mass Ejection (კორონული მასის ამოფრქვევა)

SOHO – Solar & Heliospheric Observatory (მზის და ჰელიოსფერული ობსერვატორია)

EIT – Extreme Ultraviolet Imaging Telescope (უკიდურესი ულტრაიისფერი გამონასახის ტელესკოპი)

BBO – Big Bang Observer (დიდი აფეთქების დამკვირვებელი)

K – Kelvin (კელვინი)

NASA – National Aeronautics and Space Administration (აერონავტიკის და კოსმოსური კვლევის ეროვნული სააგენტო)

LWS – Living with a Star (ვარსკვლავთან ერთად ცხოვრება)

SDO – Solar Dynamics Observatory (მზის დინამიკური ობსერვატორია)

AIA – Atmospheric Imaging Assembly (ატმოსფერული გამოსახულებების ნაკრები)

HMI – Helioseismic and Magnetic Imager (ჰელიოსეისმური და მაგნიტური გამოსახულებების მიმღები)

UV – Ultra-Violet (ულტრაიისფერი)

EUV – Extreme Ultra-Violet (უკიდურესი ულტრაიისფერი)

STEREO – Solar Terrestrial Relations Observatory (მზე-დედამიწის კავშირების ობსერვატორია)

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

EUVI – Extreme Ultra-Violet Imager (უკიდურესი ულტრაიისფერი გამონასახის მიმღები)

ESA – European Space Agency (ევროპის კოსმოსური სააგენტო)

LASCO – Large Angle and Spectrometric Coronagraph (ფართო ველიანი და სპექტრომეტრული კორონოგრაფი)

SEEDS – Solar Eruptive Event Detection System (მზის ამოფრქვევადი მოვლენების დეტექტირების სისტემა)

HEK – Heliophysics Event Knowledgebase (ჰელიოფიზიკური მოვლენათა ბაზა)

SSW – Solar SoftWare (მზის პროგრამული უზრუნველყოფა)

IDL – Interactive Data Language (მონაცემთა ინტერაქტიულ ენა)

FITS – Flexible Image Transport System (გამოსახულების ტრანსპორტირების მოქნილი სისტემა)

CRISPEX – CRisp SPectral EXplorer (კორონის სპექტრული შემსწავლელი)

TANAT – Timeslice ANALysis Tools (დროითი შუალედის ანალიზის ინსტრუმენტი)

DEM – Differential Emission Measure (დიფერენციალური გამოსხივების გაზომვა)

OCCULT – Oriented Coronal Curved Loop Tracing (კორონის მრუდი მარყუჟის ორიენტირებული მიმყოფი)

PFSS – Potential-Field Source-Surface (პოტენციური ველი, წყარო-ზედაპირი) პოტენციური ველი წყაროს ზედაპირზე.

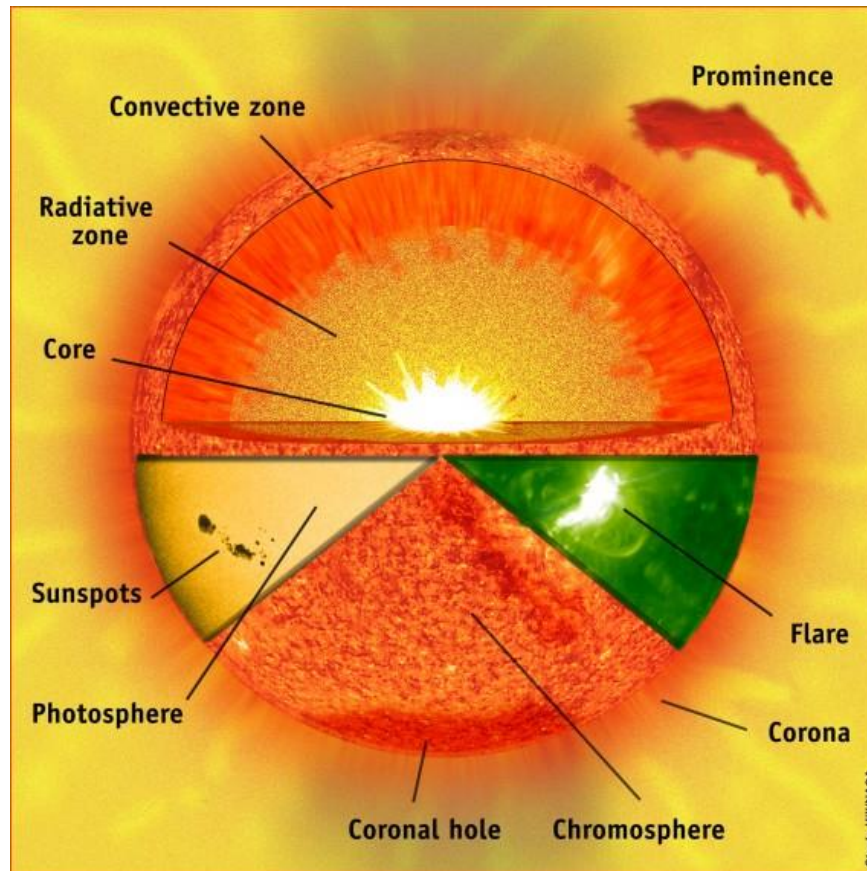
თავი 1. შესავალი

მზის ჰელიოსფეროსა და დედამიწის ატმოსფეროზე გავლენის დასადგენად, საჭიროა მზეზე მიმდინარე პროცესების და კოსმოსური ამინდის შესწავლა. სადოქტორო ნაშრომის მთავარი მიზანია მზის კორონული წვიმის ფორმირების და ევოლუციის შესწავლა მზის კოსმოსური მისიებიდან მიღებული მონაცემების საშუალებით, მისი კავშირის დადგენა მზის სხვადასხვა მოვლენებთან როგორიცაა: მზის კორონული მასის ამოფრქვევები (CME) და პროტუბერანცები, რაც მომავალში მოგვცემს საშუალებას გავაუმჯობესოთ კოსმოსური ამინდის პროგნოზი.

კოსმოსური ამინდი აღწერს კოსმოსური გარემოს ცვალებადობას მზესა და დედამიწას შორის. კერძოდ, კოსმოსური ამინდი ისეთი მოვლენების აღწერაა, რომლებიც გავლენას ახდენენ დედამიწაზე და მის ორბიტაზე არსებულ სისტემებსა და ტექნოლოგიებზე. კოსმოსური ამინდის აქტიურ კომპონენტებს წარმოადგენს: ნაწილაკები, ელექტრომაგნიტური ენერგია და მაგნიტური ველი. მზის გამოსხივებას, ნაწილაკებს, მაგნიტურ ველებს და მატერიას შეუძლიათ დედამიწის მაგნიტურ ველთან და ატმოსფეროს ზედა ფენებთან ურთიერთქმედება და სხვადასხვა ეფექტების წარმოქმნა. კოსმოსური ქარიშხალის დედამიწასთან მოახლოებისას ელექტრონები და პროტონები მოძრაობენ დედამიწის მაგნიტური ველის ძაღწირების გასწვრივ, სადაც ხდება მათი შეჯახება ატმოსფეროსა და იონოსფეროს მოლეკულებთან მაღალ განედებზე (პოლარული ციალი). კოსმოსური ამინდის თითოეული კომპონენტი სხვადასხვაგვარ გავლენას ახდენს დედამიწაზე არსებულ სხვადასხვა ტექნოლოგიაზე. მაგალითად მზის დამუხტულ ნაწილაკებს შეუძლია მწყობრიდან გამოიყვანოს კოსმოსური თანამგზავრები და შეაფერხოს რადიოკავშირები. მზის კორონული მასის ამოფრქვევებს (CME) შეუძლია გამოიწვიოს გეომაგნიტური ქარიშხალი მაგნიტოსფეროში, რამაც შეიძლება გააუარესოს ელექტრო ქსელის მუშაობა. კოსმოსური ამინდის შესწავლა მნიშვნელოვან ცნობებს მოგვცემს თუ რა ზემოქმედებას ახდენს მზე და მზეზე მიმდინარე მოვლენები დედამიწის ატმოსფეროზე, ტელესაკომუნიკაციო სისტემებსა და ადამიანის ჯანმრთელობაზე.

1.1. მზე

მზე წარმოადგენს პლაზმის აიროვან სხეულს, რომელიც რამდენიმე კონცენტრულ ფენად არის დაყოფილი. მისი მასა 300 000-ჯერ მეტია დედამიწის მასაზე და მზის სისტემის მასის 99.86%-ია, რაც 2×10^{30} კგ-ს შეადგენს.



ნახაზი 1.1: მზის აგებულება, მზის ატმოსფერო და მზეზე მიმდინარე სხვადასხვა მოვლენები (<https://www.thesuntoday.org/sun/parts-of-the-suns-atmosphere/>).

მზის ცენტრალურ არეში, ბირთვში მიმდინარე პროცესი, წყალბადის გარდაქმნა ჰელიუმად ანუ თერმობირთვული სინთეზი, უზრუნველყოფს ენერგიის გამოყოფას მზის სიკაშკაშისთვის და გარე ფენების აქტივობისთვის. ბირთვის ზომა ხილული რადიუსის მეოთხედ ნაწილს შეადგენს, საიდანაც ენერგია სხვადასხვა მექანიზმებით ტრანსპორტირდება გარე ფენებში.

სხივური ზონა 0.71 მზის რადიუსის ტოლ მანძილამდე ვრცელდება, რაც დადგენილია ზედაპირის რხევების სეისმოლოგიით. ამ ზონაში მზის ბირთვის ტემპერატურა 15.5 მილიონი კელვინიდან მცირდება 2 მილიონ კელვინამდე. სხივურ (რადიაციულ) ზონაში ენერგიის გადატანა ხდება გამოსხივებით (რადიაციით). რადიაციული ზონის საწყისიდან მისი ზედა დონემდე ხდება პლაზმის სტატისტიკური წონასწორობის დარღვევა და ენერგიის ტრანსპორტირების დომინანტური საშუალებად კონვექცია ვლინდება.

კონვექციური ზონა მზის ზედაპირიდან 200 000 კმ-ით ქვემოთ მდებარეობს. ეს არე საკმაოდ გაუმჭირვალეა, რის შედეგადაც ენერგიის გადატანა ხდება სითბური კონვექციით. კონვექციურ გარსში სითბური ნაკადების საშუალებით ცხელი ნივთიერება გადადის მზის ზედაპირისკენ, ფოტოსფეროსკენ. ამ ზონის ქვედა საზღვართან არსებულ თხელ ფენას ტახოკლინი (Spiegel and Zahn 1992) ეწოდება, სადაც მზის ბრუნვის და კონვექციის კომბინაციით ხდება მაგნიტური ველის წარმოქმნა.

მზის ატმოსფერო იყოფა სამ ნაწილად: ფოტოსფერო, ქრომოსფერო და კორონა. ატმოსფეროს ყველაზე დაბალი ფენაა ფოტოსფერო, სადაც ბირთვში გამოყოფილი ენერგიის ყველაზე მეტი ნაწილი გამოსხივდება. ის კონვექციური ზონის ზემოთ მდებარეობს და მისი სისქე რამდენიმე ასეული კილომეტრია. ფოტოსფეროში დაიკვირვება გრანულაცია, რომელიც საშუალოდ 1300 კმ ზომის კონვექციურ უჯრედს წარმოადგენს. მაღალი რიგის კონვექციურ სტრუქტურებს წარმოადგენენ სუპერგრანულები. ფოტოსფერო, მიუხედავად მისი მცირე სისქისა, მზეზე ინფორმაციის მთავარი წყაროა. ფოტოსფეროს ხაზებში გლობალური რხევების ანალიზმა, მზის შინაგანი სტრუქტურის გამოვლენის საშუალება მოგვცა. ფოტოსფეროში ზეემანის ეფექტის საშუალებით მაგნიტური ველის დიდი სიზუსტით გაზომვა შესაძლებელია. მზის ლაქები რომლებიც ფოტოსფეროში დაიკვირვება, მაგნიტური ველის კონცენტრაციის ადგილებს წარმოადგენს.

ტემპერატურის 4300 კელ მინიმალური მნიშვნელობის მიღწევის შემდეგ, სიმაღლის ზრდასთან ერთად კვლავ ხდება ტემპერატურის მატება. ფოტოსფეროს ზევით 2 000 კმ-ის სისქის ფენას, ბერძნული სიტყვის „chroma“-დან გამომდინარე ქრომოსფერო ეწოდება. ამ ფენაში 3500-ზე მეტი ხაზია ცნობილი, ძირითადად ოპტიკურ და ულტრაიისფერ (UV)

დიაპაზონში. განსაკუთრებით აქტუალურია წყალბადის ბალმერ-ალფა ხაზი 6563 Å, რომელიც მგრძნობიარეა: ტემპერატურის და პლაზმის მოძრაობის მიმართ, ზოგჯერ ქრომოსფერული პლაზმა თაღვანი პროტუბერანცების, ანთებების, სპიკულების და ანთებული მარყუჟების სახით აღწევს ზედა ატმოსფეროს.

მხოლოდ რამდენიმე ასეული (დაახლოებით 200 კმ) კილომეტრის ვიწრო გარდამავალ რეგიონში, ქრომოსფეროს ზედა ნაწილის 20 000 კელ ტემპერატურის მკვეთრი ზრდება ხდება რამდენიმე მილიონ გრადუსამდე კორონაში. სწორედ ამ რეგიონში ყალიბდება მრავალი გამოსხივების ხაზი უკიდურეს ულტრაიისფერ დიაპაზონში. როგორცაა წყალბადის ლაიმან-ალფა ხაზი 1215.7 Å და ნაწილობრივ იონიზირებული მძიმე ელემენტის ხაზები (მაგ.: O IV). გარდამავალი რეგიონი - სტატიკური ფენისგან განსხვავებით უფრო თხელი გარსია, რომელიც წარმოიქმნება ცივი ქრომოსფერული სტრუქტურებისგან, როგორცაა პროტუბერანცები ან სპიკულები.

კორონა მზის გარე ატმოსფეროა, რომელიც დაიკვირვება სხვადასხვა: რენტგენულ, რადიო, ატომურ თუ ოპტიკურ გამოსხივების ხაზში. კორონის დაკვირვება ინტეგრირებულ ოპტიკურ დიაპაზონში ანუ ხილულ სინათლეში, მზის დაბნელების დროს არის შესაძლებელი. ხილული სინათლე წარმოიქმნება კორონულ პლაზმაში თავისუფალ ელექტრონებზე ქრომოსფერული ფოტონების ტომსონის გაბნევით. აქედან გამომდინარე მაღალი სიმკვრივის სტრუქტურები უფრო კაშკაშაა ვიდრე დაბალი სიმკვრივის სტრუქტურები. რაც თავის მხრივ კორონის შიდა ფენაში, მზის ცენტრიდან 1.5 მზის რადიუსის ტოლ მანძილზე გამოკვეთს მაგნიტური მარყუჟების სისტემებს. ზოგადად კორონა შეგვიძლია დავყოთ სამ ძირითად ზონად: აქტიური რეგიონები, წყნარი მზე და კორონული ხვრელები. აქტიური რეგიონები მზის ზედაპირზე სხვა არეებთან შედარებით აქტიურია, თუმცა მთლიანი ზედაპირის ფართობის მცირე ნაწილს მოიცავს. აქტიური არეები ძლიერი მაგნიტური ველის კონცენტრაციის ადილებშია განლაგებული და წარმოდგენილია როგორც მზის ლაქების ჯგუფი. ისინი როგორც წესი წარმოდგენილი არიან წამყვანი, ძლიერ კონცენტრირებული მაგნიტური პოლარობით, რასაც თან სდევს საპირისპირო პოლარობის უფრო ფრაგმენტული ჯგუფი. ამ ბიპოლარული ბუნების გამო აქტიური რეგიონები მეტწილად ჩაკეტილი მაგნიტური

ველის ძალწირებისგან შედგება. მუდმივი მაგნიტური აქტივობის გამო აქტიურ არეებში მთელი რიგი დინამიური პროცესები მიმდინარეობს, მაგალითად: პლაზმის გაცხელება, ანთება და კორონული მასის ამოფრქვევა. პლაზმის გაცხელების შედეგია ნივთიერების გადატანა კორონულ მარყუჟებში, რაც აქტიურ არეებს ამღევს შესაბამის იერსახეს, შედარებით ცხელ და მკვრივ გარემოს ვიდრე კორონაა. ისტორიულად აქტიური რეგიონის მიღმა დარჩენილ არეს წყნარი მზე ეწოდა. დღეს-დღეობით მთლიან მზის ზედაპირზე ბევრი დინამიური პროცესია დაკვირვებული, ამიტომ წყნარი მზე არასწორ ტერმინად ითვლება. წყნარი მზის დინამიური პროცესები მცირე მასშტაბის ფენომენებიდან, ისეთი როგორიცაა: ნანოანთებები, ნათელი წერტილები, მცირე ჯეტები და სხვა, ვრცელდება მასშტაბურ სტრუქტურებამდე: კორონული თაღები ან ტრანსეკვატორული მარყუჟები. განსხვავება აქტიურ რეგიონებსა და წყნარ მზეს შორის უფრო და უფრო ბუნდოვანი ხდება, რადგან ფართომასშტაბოვანი სტრუქტურების უმეტესი ნაწილი, რომლებიც მოიცავს წყნარ მზეს დაკავშირებულია აქტიურ არეებთან. მზის დაბნელების დროს ჩრდილოეთ და სამხრეთ პოლარული ნაწილები როგორც წესი უფრო ბნელია ვიდრე ეკვატორული ზონები. მაქს ვალდმეიერმა მათ კორონული ხვრელები უწოდა (გერმანულად „Koronale Löcher“). დღეს სავსებით ნათელია რომ ამ ზონებში დომინირებს მაგნიტური ველის ღია ძალწირები, რომლებიც წარმოადგენენ ეფექტურ გზას კორონიდან გაცხელებული პლაზმის მზის ქარში გადასასვლელად. ამ ეფექტური ტრანსპორტირების მექანიზმის გამო კორონული ხვრელები პლაზმისგან მეტწილად ცარიელია და უფრო ბნელია ვიდრე წყნარი მზე. მზის ფოტოსფეროს 6000 კელ. ტემპერატურასთან შედარებით კორონაში ტემპერატურა რამდენიმე მილიონ კელვინამდე იზრდება, რაც მზის ფიზიკაში ერთ-ერთი მთავარი გადასაჭრელი პრობლემაა. ამიტომ აუცილებელია მზის კორონის და მასთან დაკავშირებული მოვლენების საფუძვლიანი შესწავლა.

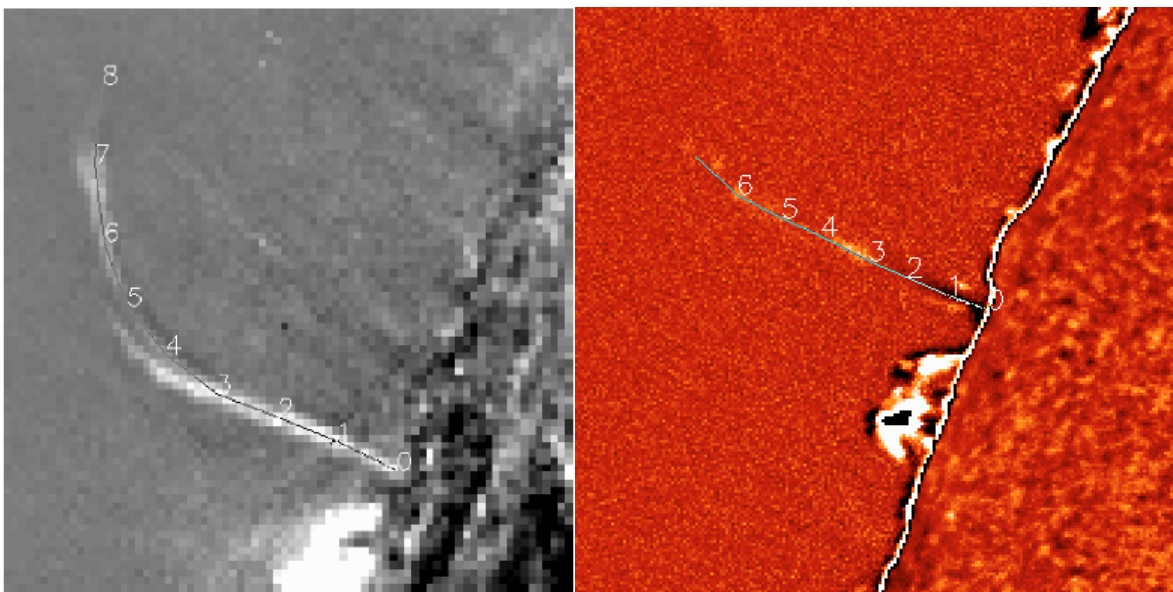
1.2. მზის კორონული წვიმა

მზის კორონული წვიმა წარმოადგენს მკვრივი და ცივი პლაზმის წვეთების ვარდნას კორონიდან ზედაპირისკენ თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაზე ნაკლები აჩქარებით (Schrijver, 2001, De Groof et al. 2004, 2005, Antolin et al. 2010). მზის კორონული წვიმა უკავშირდება მზის კორონის აქტიური რეგიონის კორონულ მარყუქებს, სადაც სითბური არამდგრადობის საფუძველზე წარმოიქმნება წვიმის წვეთები და შემდეგ ვარდება მაგნიტური მარყუქების გასწვრივ. კორონული წვიმა აგრეთვე უკავშირდება პროტუბერანცებს, განსაკუთრებით მაშინ, როცა ცივი წვეთები პროტუბერანციდან ფოტოსფეროს გასწვრივ ვარდებიან. კორონული წვიმა სითბური მოვლენაა, რომელიც კავშირშია მულტი-სპექტრული გამოსხივებასთან, დაიკვირვება კორონული წვიმის სწრაფი გაციება, რაც მეტწილად დამოკიდებულია ენერგიის გამოსხივებით კარგვაზე.

პროტუბერანცები წარმოადგენენ, შესაბამისად ცივ და მკვრივ სტრუქტურებს ცხელ და გაუხშოებულ მზის გარე ატმოსფეროში, კორონაში (Labrosse et al. 2010; Arregui et al. 2012). აქტიური რეგიონის პროტუბერანცები მეტწილად არამდგრადია და ხშირ შემთხვევაში იწვევებს კორონული მასის ამოფრქვევას (CME), რომელიც ზეგავლენას ახდენს დედამიწის მახლობლად კოსმოსური ამინდის პირობებზე (Panesar et al. 2014; Schmieder et al. 2002, Gopalswamy et al. 2003). პროტუბერანცის არამდგრადობა, CME-ების გამომწვევი მიზეზი (Priest et al. 2002) და მათი კავშირი პროტუბერანცის ამოფრქვევასთან სრულად შესწავლილი არ არის (Chae et al. 2000, Zhang et al. 2017a, Zirker et al. 1998). დაკვირვებები აჩვენებენ რომ პროტუბერანცებში გრავიტაციული მიზიდულობის ძალა კომპენსირდება მაგნიტური ველის საშუალებით (Ning et al. 2009b, Shen et al. 2015, Zhang et al. 2017b). მაშასადამე, რაიმე პროცესის ან პროცესების დახმარებით უნდა მოხდეს წონასწორობის დარღვევა და შემდგომში პროტუბერანცის არამდგრადობა, რაც გამოიწვევს CME-ის ამოფრქვევას კოსმოსში.

პროტუბერანცის არამდგრადობის გამომწვევი ყველაზე მიღებული მექანიზმი დაკავშირებულია დაგრეხილი მაგნიტური ველის ძალწირების კონფიგურაციებთან. დაკვირვების შედეგად დადგინდა, რომ CME-ის გამომწვევი მიზეზი შეიძლება იყოს: მაგნიტური მარყუჟების რხევითი (კინკ) არამდგრადობა (Williams et al. 2005), გრეხვითი (ტორუს) არამდგრადობა (Filippov 2013, Zuccarello et al. 2014) ან ორივე ერთად (Vasantharaju et al. 2019).

2001 წელს Schrijver-მა განსაზღვრა რომ ცივი პლაზმის ვარდნის სიჩქარე აქტიური რეგიონის მარყუჟის გასწვრივ იყო 100 კმ/წმ. ხოლო აჩქარება არ იყო 85 მ/წმ²-ზე მეტი, რომელიც ბევრად ნაკლებია ვიდრე თავისუფალი ვარდნის აჩქარება (275 მ/წმ²) (Schrijver, 2001). 2004 წელს De Groof-მა და სხვებმა ანალიზი ჩაუტარეს მსგავს მოვლენას SOHO/EIT 304 Å სპექტრულ ხაზში (De Groof et al. 2004). ხოლო 2005 წელს De Groof-მა და სხვებმა გამოიკვლიეს კორონული წვიმა SOHO/EIT-დან მიღებული სურათების საშუალებით 304 Å ხაზში და წვიმის წვეთები BBO-დან მიღებული H α გამონასახებით (De Groof et al. 2005,). აღმოჩენილი წვეთების სიჩქარე იცვლებოდა 30-120 კმ/წმ შუალედში, ხოლო აჩქარება თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაზე ნაკლები იყო.



ნახაზი 1.2: მარცხენა სურათზე წარმოდგენილია 2004 წელს SOHO-ს მიერ EIT ინსტრუმენტით გადაღებული წვეთების დინების ტრაექტორია H II ხაზში, ხოლო მარჯვენა სურათზე ნაჩვენებია იგივე ტრაექტორიის მქონე წვეთები გადაღებული H α ხაზში (De Groof et al. 2004, 2005).

2009 წელს Zhang-მა და Li-იმ ანალიზი ჩატარეს კოსმოსური თანამგზავრიდან Hinode/SOT-დან Ca II ხაზში მიღებულ 26 კორონულ წვიმის წვეთს და აღმოჩინეს ორი ტიპის წვეთი ჩქარი და ნელი, რომელთა საშუალო სიჩქარეები იყო: 72 კმ/წმ და 37 კმ/წმ (Zhang and Li, 2009). ხოლო 2010 წელს Antolin-მა კორონული წვიმა გამოიკვლია აქტიური რეგიონის მახლობლად Ca II H ხაზში (Antolin et al. 2010). კვლევა კონცენტრირებული იყო მარყუჟულ სისტემაზე, რომელშიც ჩანდა კორონული წვიმის წვეთები 70 წუთიანი დაკვირვების განმავლობაში. ცივი, მკვრივი წვეთები გარკვევით გამოირჩეოდა მისი ზომების, ფორმის და რაოდენობის მიხედვით. მთავარი ის იყო, რომ აჩქარება გაცილებით მცირე იყო მიზიდულობის ძალის აჩქარებაზე. დაკვირვებული სიჩქარეები მერყეობდა მარყუჟის ცენტრთან ახლოს 30-40 კმ/წმ შუალედში, ხოლო ფოტოსფეროსთან 80-120 კმ/წმ შუალედში, სიმაღლე დაახლოებით 60 მგმ-დან 100 მგმ-მდე მერყეობდა (1 მგმ = 1000 კმ). ეს სტატისტიკური მონაცემები გაუმჯობესებული იქნა Antolin-ისა და Rouppe van der Voort-ის მიერ მზის შვედური ტელესკოპით H α სპექტროგრაფიული დაკვირვების შედეგად (Antolin and Rouppe van der Voort, 2012). ხუთი სპექტრომეტრული მონაცემის ანალიზის შედეგად მათ მიიღეს, რომ წვეთის საშუალო სიჩქარე 70 კმ/წმ-ია, ხოლო აჩქარება საშუალოდ 83.5 მ/წმ².

1.3. კორონული წვიმის და პროტუბერანცის კავშირი

კორონული წვიმის წვეთის ჩამოდენის კიდევ ერთი მაგალითია მზის კიდეზე მდებარე პროტუბერანცის დაბოლოებებში არსებული წვიმა, რომელიც რადიკალურად განსხვავდება აქტიური რეგიონის კორონულ მარყუჟში წვიმის წვეთის ჩამოდენისგან.

პროტუბერანცები წარმოადგენენ შედარებით ცივ, მკვრივ სტრუქტურებს ცხელ და გაუხშობელ მზის კორონაში (Labrosse et al. 2010; Arregui et al. 2012). მეტწილად აქტიური რეგიონის პროტუბერანცები არასტაბილურია და ხშირად იწვევს კორონული მასის ამოფრქვევას (CME), რაც დედამიწის მახლობლად მოქმედებს კოსმოსური ამინდის

პირობებზე (Panesar et al. 2014; Schmieder et al. 2002, Gopalswamy et al. 2003). CME-ის გამომწვევი მიზეზი, პროტუბერანცის არასტაბილურობა (Priest et al. 2002), აგრეთვე კორონული მასის ამოფრქვევების ურთიერთკავშირი და კავშირი პროტუბერანცის არასტაბილურობასთან არ არის შესწავლილი (Chae et al. 2000, Zhang et al. 2017a, Zirker et al. 1998).

პროტუბერანციდან კორონული წვიმის ვარდნის დეტალური აღწერა პირველად წარმოადგინა Engvold-მა 1976 წელს, რომელმაც გამოიყენა 24 სპეციალურად შერჩეული პროტუბერანცის H α ფილტრებით მიღებული გამონასახები, რომლებიც ლაქებისგან შორს მდებარეობდნენ. მან შეამჩნია, რომ კაშკაშა კვანძები ჩნდებოდა 2-10 წუთის განმავლობაში ხოლო გამოჩენის ადგილებიდან ვარდებოდა მზის ზედაპირისაკენ 15-35 კმ/წმ სიჩქარით. ეს მოვლენა განსხვავდებოდა პროტუბერანცის ვერტიკალური ჩამოდენისაგან, სადაც ნივთიერება ჩამოედინება ძალიან ნელა, დაახლოებით 10 კმ/წმ სიჩქარით (Engvold 1981; Berger et al. 2008, 2010).

Liu-მ და სხვებმა აღწერეს პროტუბერანცის ფორმირება კორონული მასის კონდენსაციისას (Liu et al. 2012). კონდენსაციის ევოლუციის დრო შესწავლილი იქნა 193 Å, 171 Å და 304 Å ტალღის სიგრძეში, რომლებიც შესაბამისად წარმოადგენენ $1.6 \times 10^6 K$, $7.9 \times 10^5 K$ და $7.9 \times 10^4 K$ ტემპერატურას. დაკვირვებიდან გამომდინარე დაასკვნეს, რომ პროტუბერანცი არ არის სტატიკური ობიექტი და ფორმირების დროს მისი მთლიანი მასა მიიღება კონდენსირებული მასის და ვერტიკალური დინებების ბალანსით. დინებების 874 ტრაექტორიის შესწავლის შემდეგ Liu მივიდა დასკვნამდე, რომ ეს დინებები რამდენიმე წუთიდან რამდენიმე საათამდე გრძელდება. წვეთების ჩამოვარდნა დაიწყო დაახლოებით 20 – 40 მეგა მეტრის სიმაღლიდან. წვეთის საშუალო სიჩქარე იყო 30 კმ/წმ-ის ტოლი, ხოლო საშუალო აჩქარება იყო 46 მ/წმ², თუმცა მოიცავდა 10 - 200 მ/წმ² შუალედს.

1.4. კორონული წვიმის წარმოშობის მექანიზმი

პლაზმის კონდენსაცია, რაც წინ უძღვის კორონული წვიმის წარმოშობას, შეიძლება სითბური არამდგრადობის შედეგია, რომელიც „კატასტროფული გაციების“ სახელითაა ცნობილი. „კატასტროფულ გაციება“-ს ადგილი აქვს მაშინ, როდესაც გამოსხივებითი ენერგიის კარგვა აღემატება სითბური წყაროს ენერგიას (Parker 1953, Field 1965, Antiochos et al. 1999, Schrijver 2001). 2004-2005 წლებში Müller-ისა და სხვების მიერ გაკეთებულმა რიცხვითმა მოდელირებამ აჩვენა, რომ წვეთის მუდმივი სითბური კონტური ექსპონენციალურად მცირდებოდა სიმაღლესთან შედარებით, რაც სითბურ არამდგრადობას და მარყუჟის წვეროში ნივთიერების მკვეთრ გაცივებას იწვევდა (Müller et al. 2004, 2005).

Murawski და სხვები ვარაუდობდნენ, რომ ნანოანთებების დროს ნულოვან (სადაც მაგნიტური ველის 0-ის ტოლი ხდება) წერტილებში ენტროპიული მოდის საშუალებით ხდება კორონული წვიმის წარმოქმნა (Murawski et al. 2012). ენტროპიული მოდა ხასიათდება ლოკალურად სიმკვრივის გაზრდით და ტემპერატურის შემცირებით. ნულოვანი წერტილებიდან განმეორებით გადაერთებებს გადააქვთ ცივი მკვრივი წვეთები, რაც ქმნის კორონულ წვიმას. მზის კორონის ანალიზურ კვლევაში, მნიშვნელოვანი პარამეტრია პოლიტროპული ინდექსი. კვაზი-ადიაბატური პროცესებისთვის დამახასიათებელი პოლიტროპული ინდექსის მაჩვენებელი $\gamma \in [1; 5/3]$ შუალედშია მოთავსებული. თერმული არამდგრადობის ან მსგავსი პრეცესების დროს, პოლიტროპულმა ინდექსმა შეიძლება გადააჭარბოს $\gamma = 5 / 3$ ნიშნელობას. Hinod/EIS-ის მონაცემებზე დაყრდნობით, პირველად ადიაბატური ინდექსის მნიშვნელობის შეფასება, მზის კორონაში გააკეთეს van Doorselaere-მა და სხვებმა (van Doorselaere et al. 2011). დროზე დამოკიდებული სპექტროსკოპული მეთოდის გამოყენებით, მათ აღმოაჩინეს ნელი მაგნიტოაკუსტიკური რხევები ელექტრონულ სიმკვრივეში. ხოლო ტემპერატურისა და სიმკვრივის ცვლილების სტანდარტულმა კავშირმა, მათ ადიაბატური ინდექსის შეფასების საშუალება მისცა.

კორონული წვიმის წვეთები აქტიური რეგიონის მარყუჟებში ვარდება უფრო ნაკლები აჩქარებით, ვიდრე თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაა. რიცხვითმა მოდელირებამ აჩვენა რომ წვეთის დინამიკის მიზეზი შეიძლება აიხსნას გაზის და მაგნიტური წნევის ეფექტით

(Mackay and Galsgaard 2001, Muller et al. 2003; Antolin et al. 2010). Antolin-მა და Verwichte-მ (2011) წარმოადგინეს მოსაზრება, რომ კორონულ მარყუჟზე მოქმედი განივი ტალღები შესაძლებელია პასუხისმგებელი იყოს კორონული წვიმის ვარდნის მცირე აჩქარებაზე.

Oliver-მა და სხვებმა (Oliver et al. 2014) დაადგინეს რომ ძლიერი კონდენსაცია ახდენს კორონულ მარყუჟში წნევის დინამიურ რესტრუქტურირებას, რაც თავის მხრივ ხელს უწყობს, გრავიტაციის საპირისპიროდ წნევის გრადიენტის წარმოქმნას. წნევის გრადიენტი აიძულებს კორონული წვიმის წვეთებს ნაკლები აჩქარებით ვარდნას. ჩვენს მიერ 2012 წლის 22 თებერვალს მომხდარ კორონულ წვიმაზე დაკვირვებით წვეთების ვარდნის აჩქარება დამოკიდებულია მხოლოდ წვეთის მასაზე და არა მარყუჟის გეომეტრიულ პარამეტრებზე. აჩქარება დამოკიდებულია წვეთის საწყის სიჩქარეზე, მეტი საწყისი სიჩქარის მქონე წვეთი ვარდება ნაკლები აჩქარებით. ენერგიის შეფასებამ გვიჩვენა რომ კორონული წვიმის ფორმირებას იწვევს „კატასტროფული გაციება“ (Vashalomidze et al. 2015).

პროტუბერანციდან კორონული წვიმის სახით პლაზმის მასიურმა ჩამოდიწებამ შეიძლება იმოქმედოს მის წონასწორულ მდგომარეობაზე. გარკვეული დროის მერე ლორენცის ძალა გადააჭარბებს გრავიტაციულ ძალას, რაც პროტუბერანცს მისცემს საშუალებას ნელ-ნელა დაიწყოს ზევით ასვლა. ამ პროცესმა შესაძლებელია გამოიწვიოს პროტუბერანცის ზემოთ მდებარე მაგნიტურ მარყუჟებთან ურთიერთქმედება რის შედეგადაც ხდება მაგნიტური გადაერთება, რაც წინ უძღვის CME-ის ამოფრქვევას.

სადისერტაციო ნაშრომის მიზანია: თანამგზავრული დაკვირვებითი მონაცემების საფუძველზე შევისწავლოთ მზის კორონული წვიმის ფორმირება, დინამიკა და ევოლუცია; მზისა და მზის ამინდის უკეთესად შესასწავლად, დავადგინოთ კორონული წვიმის კავშირი ან ზეგავლენა მზეზე მიმდინარე სხვადასხვა პროცესებთან; შევისწავლოთ მისი შესაძლო ზეგავლენა მზის ზედა ატმოსფეროსა და კორონის გაცხელებაზე, რაც სამომავლოდ მოგვცემს კოსმოსური ამინდის პროგნოზირების საშუალებას.

თავი 2. დაკვირვებითი მონაცემის მიღების და დამუშავების მეთოდოლოგია

2.1. მზის კოსმოსური თანამგზავრები

დასახული ამოცანების გადასაჭრელად ჩვენ გამოვიყენეთ სხვადასხვა კოსმოსური თანამგზავრიდან მიღებული დაკვირვებითი მონაცემები.

აშშ-ს აერონავტიკის და კოსმოსური კვლევის ეროვნული სააგენტოს (National Aeronautics and Space Administration - NASA) მიერ „ვარსკვლავთან ერთად ცხოვრების“ (Living with a star - LWS) პროგრამის ფარგლებში განხორციელებული პირველი სადამკვირვებლო მისიაა მზის დინამიკური ობსერვატორია (Solar Dynamics Observatory - SDO), რომელიც გაშვებულ იქნა 2010 წლის 11 თებერვალს კანავერალის კონცხზე მდებარე კოსმოსური ცენტრიდან. კოსმოსური თანამგზავრის სამი ხელსაწყოდან ჩვენ გამოვიყენეთ ორი: ატმოსფერული გამოსახულებების ნაკრები (Atmospheric Imaging Assembly - AIA) და ჰელიოსეისმური და მაგნიტური გამოსახულების მიმღები (Helioseismic and Magnetic Imager - HMI).

AIA ოთხი ტელესკოპის ერთობლიობაა, რომელიც უზრუნველყოფს მზის სრული დისკოს დაკვირვებებს 1.0" სივრცული გარჩევის და 12 წამი შუალედის მქონე 3 ულტრაიისფერ (Ultra-violet - UV) უწყვეტ და 7 უკიდურეს ულტრაიისფერ (Extreme Ultra-violet - EUV) სპექტრში (Lemen et al. 2012). ჩვენ გამოვიყენეთ 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) სპექტრული ფილტრები, რომლებიც შეესაბამება $10^{4.7} K$ -დან $10^{7.2} K$ -მდე ტემპერატურას.

HMI-ის სამეცნიერო პროდუქტებია: მზის ფოტოსფეროს სრული დისკოს მაღალი გარჩევის დოპლეროგრამები, ფოტოსფეროს ინტენსივობის გამოსახულებები და მაგნიტური ველის როგორც ვექტორული ასევე მხედველობის გასწვრივ გამოსახულებები. ჩვენ გამოვიყენეთ მზის ფოტოსფეროს მაგნიტური ველის გამოსახულებები მხედველობის სხივის გასწვრივ ე.წ. Line of Sight მაგნიტოგრამები.

2006 წლის ოქტომბერში გაშვებულმა მზე-დედამიწის კავშირების ობსერვატორიამ (Solar Terrestrial Relations Observatory – STEREO), მეცნიერებს მზე-დედამიწის სისტემის უნიკალური და რევოლუციური ხედვის საშუალება მისცა. ორი, თითქმის იდენტური, (STEREO_A (Ahead) და STEREO_B (Behind)) ობსერვატორიისგან შემდგარი STEREO, იკვლევდა ენერგიის და ნივთიერების ნაკადის გავრცელებასა და მახასიათებლებს მზიდან დედამიწამდე.

მზე-დედამიწის კავშირის ყველაზე ძლიერი გამოვლინებაა მზის კორონული მასის ამოფრქვევები (CME). STEREO-დან მიღებული CME-ის სტრუქტურის სამგანზომილებიანი გამოსახულება, შესაძლებლობას გვაძლევს გამოვიკვლიოთ და დავადგინოთ მათი ფუნდამენტური ბუნება და წარმოშობა. STEREO კოსმოსური ამინდის კვლევის თანამგზავრული ფლოტის უნიკალური დამატებაა, რომელიც უზრუნველყოფს დედამიწის მიმართულებით CME-ის მოახლოების დროის განსაზღვრას, თავისი უნიკალური სტერეოსკოპული ხედვის შესაძლებლობით.

ჩვენ გამოვიყენეთ STEREO-ს მზე-დედამიწის კავშირის კორონული და ჰელიოსფერული კვლევის (Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation – SECHHI) უკიდურესი ულტრაიისფერი გამონასახის მიმღები (Extreme Ultraviolet Imager - EUVI). SECHHI-EUVI, რომელიც იღებს 1.6" სივრცული გარჩევის მზის მთლიანი დისკოს გამონასახს 171 Å, 195 Å, 284 Å და 304 Å ტალღის სიგრძეებში. მონაცემთა სიმცირის გამო ჩვენ გამოვიყენეთ მხოლოდ 195 Å და 304 Å ტალღის სიგრძის დაკვირვებები. ასევე გამოვიყენეთ SECHHI-ის მეორე ინსტრუმენტი, რომელიც შედგება ხილული სინათლის კორონოგრაფისგან.

მზის და ჰელიოსფერული ობსერვატორია (Solar & Heliospheric Observatory – SOHO) NASA-ს და ევროპის კოსმოსური სააგენტოს (European Space Agency - ESA) საერთაშორისო თანამშრომლობის პროექტია, რომელიც გამოიყენება: მზის საკვლევად მისი ბირთვიდან კორონამდე, აგრეთვე მზის ქარის შესასწავლად. SOHO 1995 წლის 2 დეკემბერს ESA-ს ხელმძღვანელობით გაემშვებულ იქნა კოსმოსურ სივრცეში. SOHO-ს 12 ხელსაწყოდან ჩვენ

გამოვიყენეთ მხოლოდ ერთი ფართო ველის და სპექტრომეტრული კორონოგრაფი (Large Angel and Spectrometric Coronagraph – LASCO).

2.2. დაკვირვებითი მონაცემის მიღების და დამუშავების პროგრამული უზრუნველყოფის მეთოდოლოგია

ჩვენ ასევე გამოვიყენეთ ჯორჯ მეისონის სახელობის უნივერსიტეტის კოსმოსური ამინდის ლაბორატორიის პროექტი მზის ამოფრქვევადი მოვლენების დეტექტირების სისტემა (Solar Eruptive Event Detection System - SEEDS), რომელიც იყენებს გამოსახულების დამუშავების, მანქანურ სწავლების და მონაცემთა მოპოვების ავტომატურ ტექნიკას. SEEDS არის პროგრამული უზრუნველყოფის პაკეტი, რათა ავტომატურად აღმოაჩინოს, დაახასიათოს და კლასიფიკაცია მიანიჭოს მზის ამოფრქვევად მოვლენებს როგორიცაა: CME-ები, კორონული ჩაბნელებები (Coronal Dimmings) და ანთებები.

ჰელიოფიზიკური მოვლენათა ბაზა (Heliophysics Event Knowledgebase - HEK) არის ყველა არსებული დაკვირვებების სია, რომელიც გაერთიანებულია მზეზე მომხდარი მოვლენების კატალოგთან. HEK-ი საშუალებას გვაძლევს ადვილად მოვიძიოთ მზეზე მოვლენის მოხდენის ადგილი და დრო, აგრეთვე შესაძლებელია კონკრეტულ ადგილის ან დროის შემთხვევაში ვნახოთ ინფორმაცია თუ რა მოვლენას ქონდა ადგილი.

შესასწავლი მონაცემების მოძიებისა და შერჩევისათვის შევქმენით კორონული წვიმის კატალოგი, რომელიც მოიცავს 8 წლიან ინტერვალს 2010-დან -- 2018-ის ჩათვლით. HEK-ის დაახლოებით 10000 ჩანაწერიდან, რომელთაგანაც ნაწილი AIA-ს მონაცემთა ბაზის კოორდინატორების მიერ არის დადასტურებული, ხოლო ნაწილი სავარაუდო წვიმას წარმოადგენს და ამოვარჩიეთ 152 ერთეული კორონული წვიმა, მოცემული ინფორმაცია გაუფილტრავი ნედლი მონაცემის სახითაა მოცემული. გაფილტრვისა და სისტემატიზაციის შედეგად შევქმენით გაწმენდილი 129 ერთეული SDO/AIA-ს მიერ დაკვირვებული და 123 ერთეული IRIS-ის მიერ დაკვირვებული კორონული წვიმის

კატალოგი, სადაც წარმოდგენილია წვიმის: დაწყების დრო, დამთავრების დრო, ხანგრძლიობა საათებში, მოვლენის კოორდინატები და ტალღის სიგრძე (სპექტრული ხაზი), რომელშიც დაფიქსირდა მოვლენა. კატალოგი მოცემულია დანართი 1-ის და დანართი 2-ის სახით.

HEK-დან მზის სხვადასხვა მოვლენების დაკვირვებითი მონაცემების მოძებნის, გადმოწერის და დამუშავებისთვის, ჩვენ გამოვიყენეთ „Solarsoft“ სისტემა, რომელიც წარმოადგენს ინტეგრირებული პროგრამული ბიბლიოთეკების, მონაცემთა ბაზებისა და სისტემური საშუალებების ნაკრებს. იგი საერთო გარემოს ქმნის მზის ფიზიკაში პროგრამირების და მონაცემთა ანალიზისთვის. „Solarsoft“ სისტემა (Solarsoft Ware - SSW) დაფუძნებულია მონაცემთა ინტერაქტიულ ენაზე (Interactive Data Language - IDL), რომელიც წარმოადგენს სამეცნიერო პროგრამირებისა და მონაცემთა ანალიზისთვის შექმნილ მაღალი დონის პროგრამირების ენას. SSW გარემო უზრუნველყოფს საერთაშორისო კვლევითი ინსტიტუტებს შორის მონაცემთა მიმოცვლას, რაც აადვილებს მონაცემთა საერთო ხედვასა და კოორდინირებულ ანალიზს. SSW-ს საერთო ბიბლიოთეკები, პროგრამული პაკეტები და ინტერფეისი ხელს უწყობს მკვლევარს მზის ახალ მონაცემთა ანალიზში და საშუალებას აძლევს ერთმანეთთან დააკავშიროს სხვადასხვა თანამგზავრის მონაცემები.

SSW-ს მთავარი მიზანია:

- უზრუნველყოს დიდი და მრავალჯერადად გამოყენებადი ბიბლიოთეკა.
- უზრუნველყოს სისტემა, რომელიც მეტ-წილად დამოუკიდებელია ოპერაციული სისტემისა (Win, Linux, Mac (OS)) და ადგილმდებარეობისგან.
- მონაცემთა კოორდინირებული ანალიზისთვის ხელი შეუწყოს გარკვეული საერთო სტანდარტების გამოყენებას.
- ხელი შეუწყოს ევოლუციურ გარემოს (მომხმარებელთა მიერ დამზადებული ზრდადი ბიბლიოთეკები).

- უზრუნველყოს წვდომა დამხმარე მონაცემთა ბაზებთან (თანამგზავრების ნედლი მონაცემების გაწმენდისა და გაფილტვრის სხვადასხვა მეთოდები).
- მონაცემთა ანალიზისთვის უზრუნველყოფს ფორმატისაგან დამოუკიდებელ გარემოს.

SSW პაკეტის დახმარებით სხვადასხვა კოსმოსური თანამგზავრიდან მოხდა მზის კორონული წვიმის დაკვირვებითი მონაცემის გადმოწერა გამოსახულების ტრანსპორტირების მოქნილი სისტემის ფორმატში (Flexible Image Transport System - FITS). მონაცემი შეირჩა სხვადასხვა თანამგზავრის კოორდინირებული, ერთი და იგივე დაკვირვებითი სამიზნის არსებობის დროს. რამაც საშუალება მოგვცა მზის კორონული მოვლენებისთვის სხვადასხვა სპექტრულ ფილტრებში, მაღალი დროითი და კუთხური გარჩევადობით, ჩაგვეტარებინა ანალიზი.

ერთი და იგივე მოვლენის სხვადასხვა კოსმოსური თანამგზავრიდან მიღებულ გამოსახულებაზე იდენტიფიცირებისათვის, ჩვენ (მცირე მოდიფიკაციით) გამოვიყენეთ SSW პაკეტის პროგრამა (`wcs_convert_diff_rot.pro`), რომელიც ერთი თანამგზავრის გამოსახულებიდან იღებს მოცემული წერტილის ჰელიოგრაფიულ კოორდინატებს და იყენებს დიფერენციალური ბრუნვის მოდელს (`diff_rot.pro`), რათა იპოვოს წერტილის შესაბამისი პოზიცია მეორე კოსმოსური თანამგზავრის გამოსახულებაზე.

მზის კორონული წვიმის ევოლუციის და დინამიკის შესასწავლად, გადმოწერილი FITS-ს გაფართოების გამოსახულებების მეშვეობით გავაკეთეთ მონაცემთა ოთხ განზომილებიანი კუბი, სადაც პირველი და მეორე განზომილება გამოსახულების სიგრძე და სიგანეა, მესამე - ფილტრის რაოდენობრივი განზომილება (ტალღის სიგრძე, რომელშიც მიღებულია გამოსახულება) და მეოთხე - დროითი განზომილება. ჩვენ გამოვიყენეთ IDL პროგრამირების ენაზე დაფუძნებული ინსტრუმენტი CRISPEX (CRisp SPectral EXplorer), რომელიც გამოვიყენეთ მონაცემთა კუბის დასათვალიერებლად, პლაზმის ვარდნის ხილული ტრაექტორიის დასადგენად და ტრაექტორიის გასწვრივ სივრცე-დროითი დიაგრამის ასაგებად. CRISPEX-ის დამხმარე პროგრამის დროითი შუალედის ანალიზის ინსტრუმენტის (Timeslice ANALysis Tools - TANAT) საშუალებით,

სივრცე-დროითი დიაგრამებიდან განსაზღვრეთ ვარდნილი პლაზმის პროექცირებული სიჩქარეები და აჩქარებები.

მზის კორონული მარყუქების ტემპერატურის და გამოსხივების შესაფასებლად ჩვენ გამოვიყენეთ SSW პაკეტის პროგრამა, რომელიც განსაზღვრავს დიფერენციალური გამოსხივების განაწილებას (Differential Emission Measure - DEM). კორონული მარყუქების ავტომატური ანალიზისთვის DEM პროგრამა იყენებს ალგორითმს, რომლის დახმარებითაც ხდება უწყვეტი ან დიდი სიმრუდის რადიუსის მარყუქების ავტომატურად მოძებნა. ასევე ახდენს ავტომატურად განსაზღვრული: ტემპერატურის განაწილების, ტემპერატურული სიგანის, ელექტრონული სიმკვრივის და მარყუქის გეომეტრიული სიგანის დადგენას.

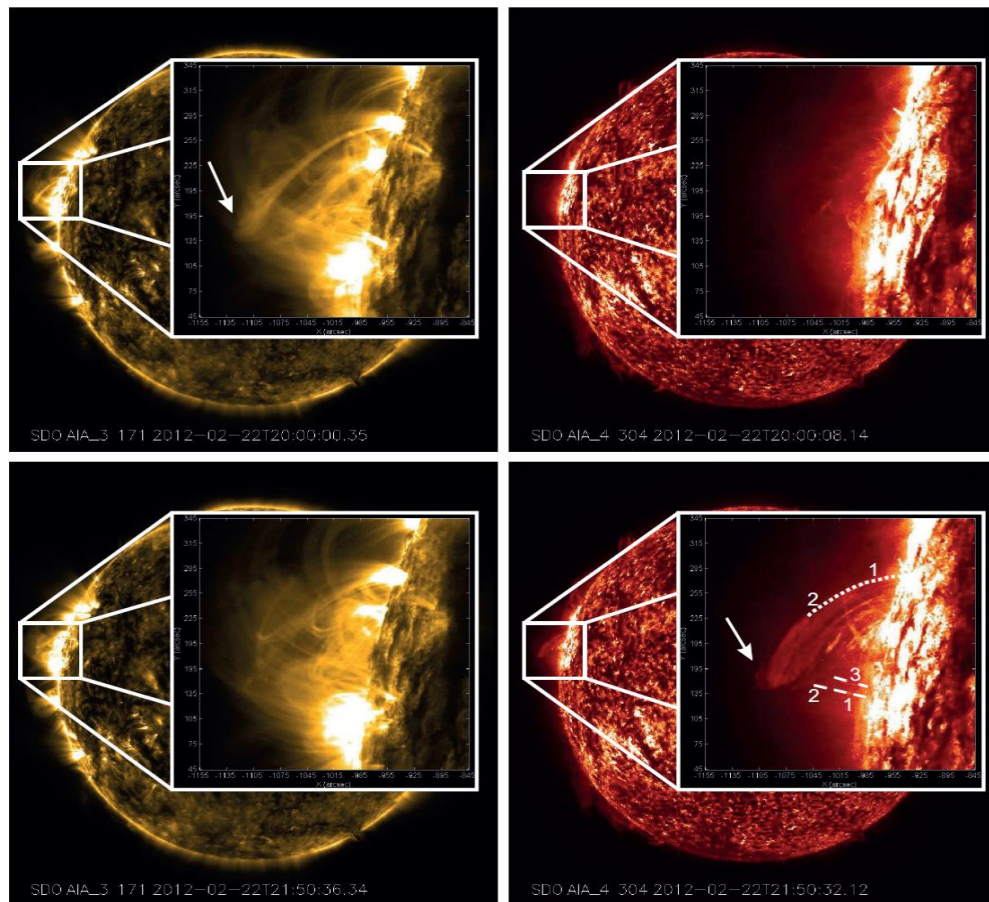
მაგნიტური ველის კონფიგურაციის დინამიკის შესასწავლად ჩვენ გავაკეთეთ მაგნიტური ველის ექსტრაპოლაცია (Potential-Field Source-Surface - PFSS) SSW-ს სტანდარტული PFSS-ს პაკეტის გამოყენებით.

თავი 3. მზის კორონული წვიმის დინამიკის შესწავლა

3.1. 2012 წლის 22 თებერვალს დაკვირვებული კორონული წვიმის ფორმირება და ევოლუცია

2012 წლის 22 თებერვალს AR 11420 აქტიური რეგიონის მახლობლად მზის დისკოს კიდეზე $304 \text{ \AA}$ სპექტრულ ხაზში დაიკვირვებოდა კორონული წვიმა. კორონული წვიმის ფორმირება დაკავშირებული იყო მზის კორონაში არსებულ მაგნიტურ მარყუქებთან. 3.1 ნახაზზე მოცემულია დაახლოებით 2 საათიანი დროითი ინტერვალის მქონე გამოსახულებები $171 \text{ \AA}$ და $304 \text{ \AA}$ ტალღის სიგრძეზე. კორონული მარყუქი დაიკვირვებოდა $171 \text{ \AA}$ ხაზში უნივერსალური დროით (UT) 20:00 სთ-ზე (ნაჩვენებია

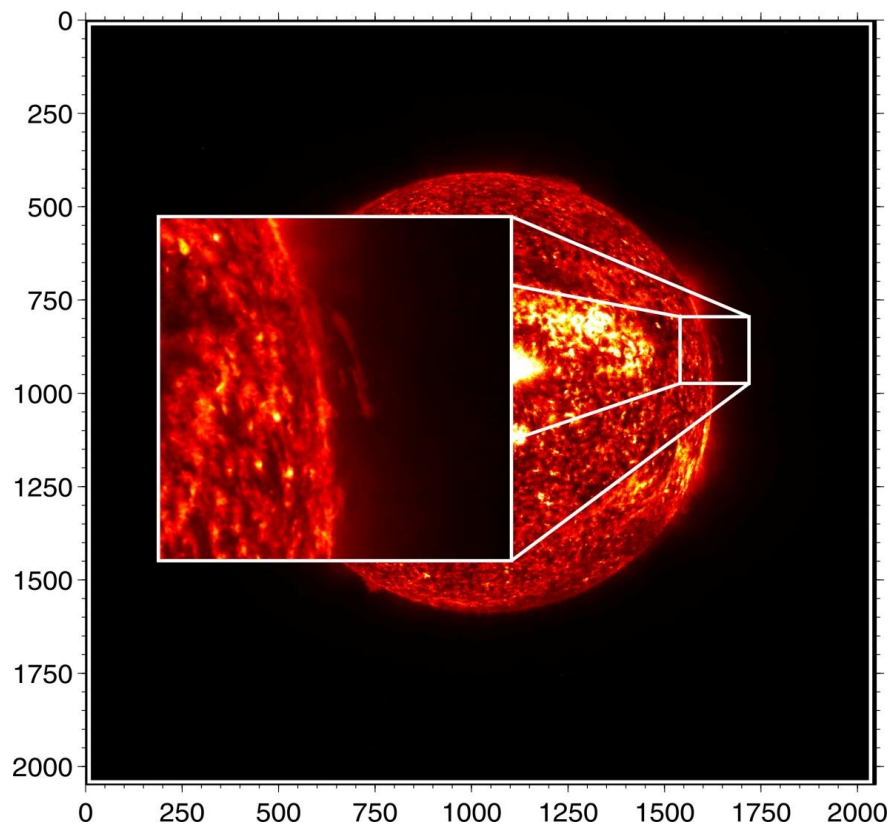
თეთრი ისრით 3.1 ნახაზის ზედა მარცხენა გამოსახულებაზე), თუმცა ამავედროულად არ ჩანს 304 Å-ში მიღებულ გამოსახულებაზე (ნახაზი 3.1-ის ზედა მარჯვენა გამოსახულება). დაახლოებით ორი საათის შემდგომ უნივერსალური დროით 21:50 სთ-ზე, კორონული მარყუჟი 171 Å-ში გახდა მკრთალი და გამოჩნდა 304 Å ხაზში (ნახაზი 3.1 ქვედა მარცხენა და მარჯვენა გამოსახულებები). იქიდან გამომდინარე რომ 171 Å ხაზი შეესაბამება შედარებით ცხელ პლაზმას ვიდრე 304 Å სპექტრული ხაზი, სავსებით თვალსაჩინოა რომ კორონული მარყუჟი გაცივდა $\sim 10^{5.8} K$ ტემპერატურიდან $\sim 10^{4.7} K$ ტემპერატურამდე. კორონულ მარყუჟს ან მარყუჟთა სისტემას ქონდა ოდნავ განსხვავებული სიგანე, რომელიც წარმოადგენდა 30 მგმ-ს ორ სხვადასხვა სპექტრულ ხაზში ზედაპირიდან 70 მგმ სიმაღლეზე.



ნახაზი 3.1. კორონული მარყუჟის გაცივების გამოსახულებები AR 11420 აქტიურ რეგიონთან (2012 წლის 22 თებერვალი). სურათის ზედა მხარე წარმოადგენს SDO-ს მიერ: 171 Å (მარცხენა) და 304 Å

(მარჯვენა) სპექტრულ ხაზში 20:00 საათზე უნივერსალური დროით (UT) მიღებულ გამოსახულებებს. სურათის ქვედა მხარეს წარმოდგენილია 2 საათის შემდეგ მიღებული გამოსახულებები იმავე სპექტრულ ხაზებში: 171 Å (მარცხენა) და 304 Å (მარჯვენა). თეთრი წვეტილი ხაზებით მარჯვენა ქვედა გამოსახულებაზე წარმოდგენილია პირველი ჯგუფის წვიმის წვეთების ვარდნის ტრაექტორია. ხოლო თეთრი წერტილოვანი მრუდით წარმოდგენილია მეორე ჯგუფის წვეთების ვარდნის ტრაექტორია.

კორონული მარყუჭი დიდი ალბათობით მოთავსებულია მაგნიტური მარყუჭების სისტემაში. კორონული მარყუჭის სისტემის სამგანზომილებიანი სტრუქტურის გასაგებად ჩვენ შევეცადეთ გამოგვეყენებინა STEREO-ს დაკვირვებითი მონაცემები. 3.2 ნახაზზე წარმოდგენილია STEREO_B-ს გამოსახულება 304 Å სპექტრულ ხაზში UT 21:56 სთ-ზე. სამწუხაროდ შეზღუდული სივრცული გარჩევის და მონაცემის სიმცირის გამო ჩვენ ვერ შევძელით კორონული წვიმის წვეთების გარჩევა. თუმცა გეომეტრიული თვისება რომელიც დაიკვირვება 3.2 ნახაზზე, კერძოდ სიბრტყის მიმართ დახრილობა, ასევე ასახავს AIA-ს დაკვირვებებს.



ნახაზი 3.2. STEREO_B-ს მიერ 2012 წლის 22 თებერვალს UT 21:56 სთ-ზე აქტიური რეგიონის AR 11420 მახლობლად დაკვირვებული კორონული მარყუჟის გამოსახულება 304 Å ხაზში.

SDO-ს დაკვირვებით მონაცემზე დაყრდნობით, კორონული მარყუჟის გაციების შემდეგ 304 Å ხაზში დაიწყო წვიმის წვეთების ვარდნა. ჩვენ შევისწავლეთ წვიმის წვეთების ორი სხვადასხვა ჯგუფი. წვეთების ერთი ჯგუფი წარმოიქმნა მარყუჟის ქვემოთ და ვარდებოდა თითქმის პერპენდიკულარული მიმართულებით, ხოლო მეორე ჯგუფის წვეთების ვარდნა დაიკვირვებოდა კორონული მარყუჟის გასწვრივ. ჩვენ ცალ-ცალკე განვიხილავთ ორივე ჯგუფის წვეთებს.

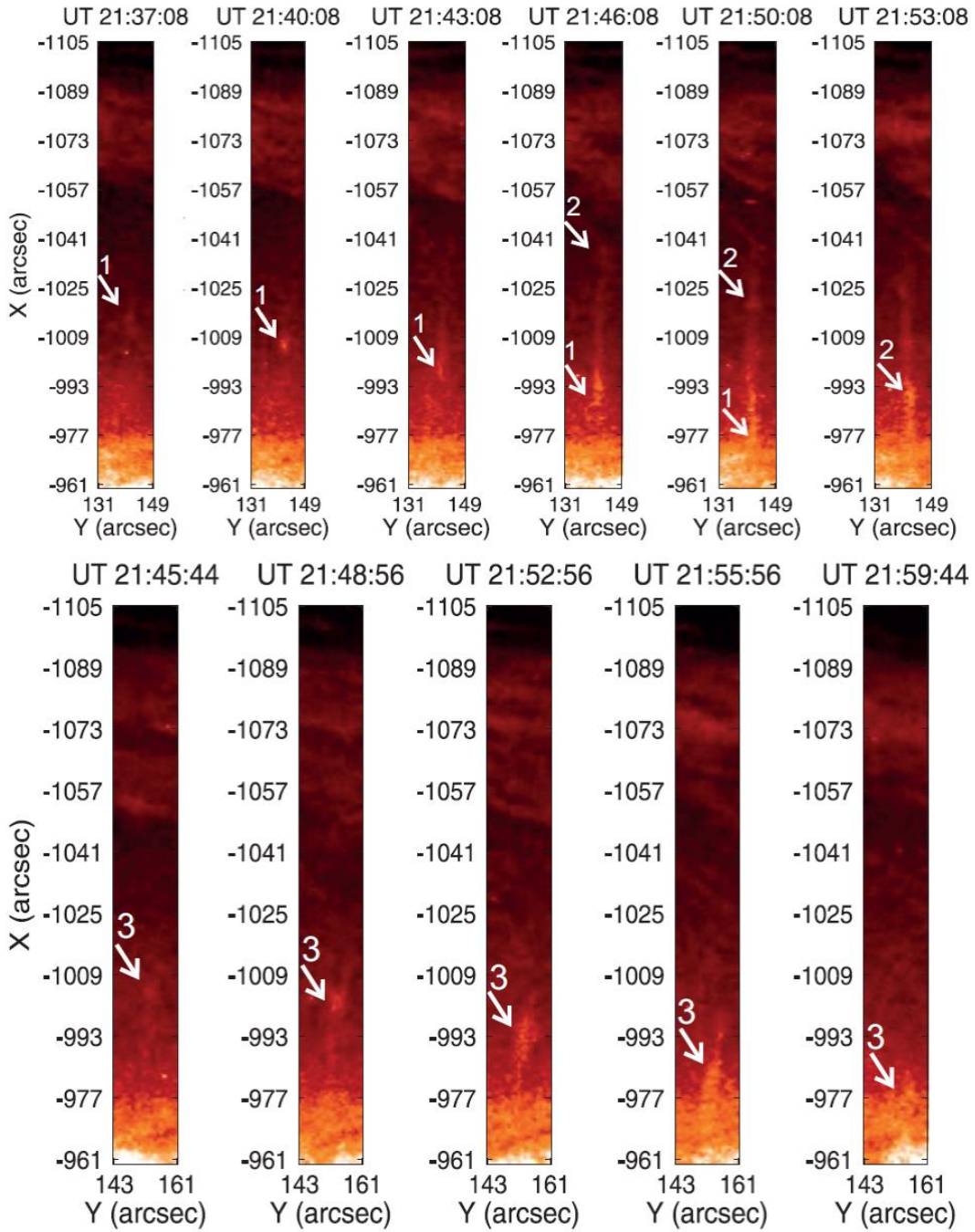
3.1.1. პირველი ჯგუფის წვიმის წვეთები

პირველი ჯგუფის წვიმის წვეთი UT 21:37 სთ-ზე ~40 მგმ სიმაღლეზე გამოჩნდა. ნახაზი 3.3-ის ზედა მხარეს წარმოდგენილია წვეთის ექვსი თანმიმდევრული გამოსახულების ერთობლიობა, რომელთა შორის ინტერვალი 3 წთ-ია. გამოჩენის შემდეგ წვიმის წვეთის

ვარდნა ხდება ოდნავ დახრილ ტრაექტორიაზე, დიდი ალბათობით მაგნიტური მარყუჟის გასწვრივ (იხ. დაშტრიხული ზოლი ნახაზი 3.1-ის ქვედა მარჯვენა გამოსახულებაზე). მისი სიგანე და სიგრძე თავდაპირველი გამოჩენისას, შესაბამისად ~ 1400 კმ და ~ 3600 კმ-ს წარმოადგენდა. თუმცა ვარდნისას წვეთის სიგრძე გაიზარდა, რასაც ვერ ვიტყვით მის სიგანეზე. ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ფაქტი რაც დაკვირვებისას დაფიქსირდა იყო ის რომ, წვეთი ვარდნისას ტოვებდა კვალს (იხ. ნახაზი 3.3-ს ზედა მხარე ბოლო ოთხი გამოსახულება), რაც შესაძლებელია უწყვეტი გაციების შედეგი იყოს (Fang et al. 2013). წვიმის წვეთის ვარდნის დრო შეადგენდა ~ 13 წთ-ს, ხოლო საშუალო სიჩქარე წარმოადგენდა ~ 50 კმ/წმ-ს.

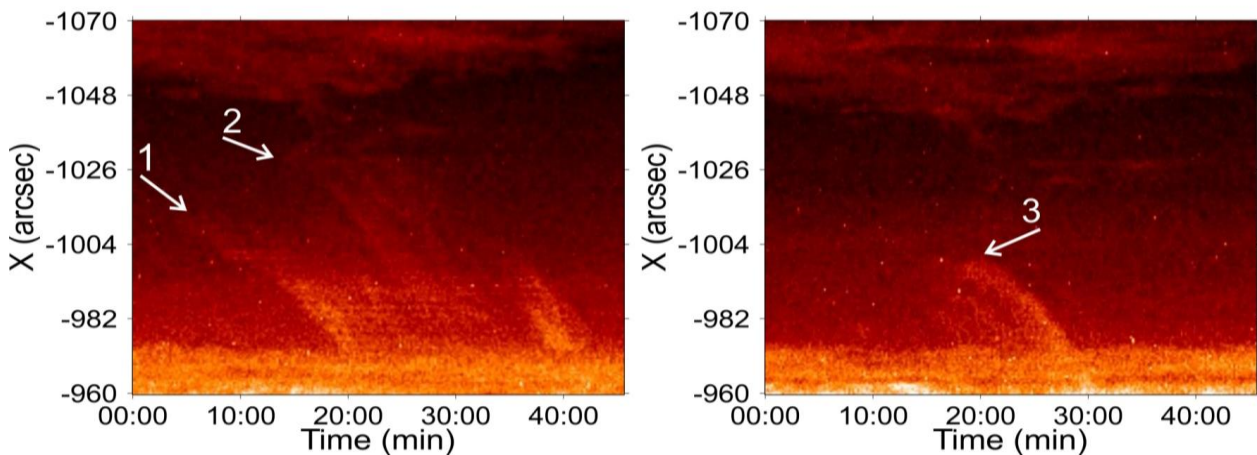
ამავე ჯგუფის მეორე წვეთი ~ 60 მგმ სიმაღლეზე UT 21:46 სთ-ზე გამოჩნდა. როგორც პირველი, იგიც იმავე ტრაექტორიით ვარდებოდა. ვარდნის დრო შეადგენდა ~ 17 წთ-ს, ხოლო საშუალო სიჩქარე წარმოადგენდა ~ 60 კმ/წმ-ს (იხ. ბოლო სამი გამოსახულება 3.3 ნახაზის ზედა მხარეს).

მესამე წვეთი მეორე წვეთის პარალელურად ~ 30 მგმ სიმაღლეზე UT 21:50 სთ-ზე გამოჩნდა, თუმცა მისი ვარდნა ხდებოდა სხვა მარყუჟის გასწვრივ (იხ. რიცხვი 3-ით აღნიშნული დაშტრიხული ხაზი 3.1 ნახაზის ქვედა მარჯვენა გამოსახულება). მესამე წვეთმა ზედაპირს მიაღწია ~ 12 წთ-ში, მისი საშუალო სიჩქარე შეადგენდა ~ 40 კმ/წმ-ს (იხ. ხუთი თანმიმდევრული გამოსახულება 3.3 ნახაზის ქვედა მხარეს).



ნახაზი 3.3. პირველი ჯგუფის პირველი და მეორე წვიმის წვეთების ექვსი თანმიმდევრული გამოსახულება (ნახაზის ზედა მხარე) და მესამე წვეთის ხუთი თანმიმდევრული გამოსახულება (ნახაზის ქვედა მხარე). გამოსახულებებზე წვეთები თეთრი ისრით არის მითითებული. თითოეული გამოსახულება წარმოადგენს 18×145 arcsec ზომის ველს, რომელიც ემთხვევა 3.1 ნახაზის ქვედა მარჯვენა გამოსახულებაზე დატანილი თეთრი წვეტილი ხაზების შესაბამის არეს.

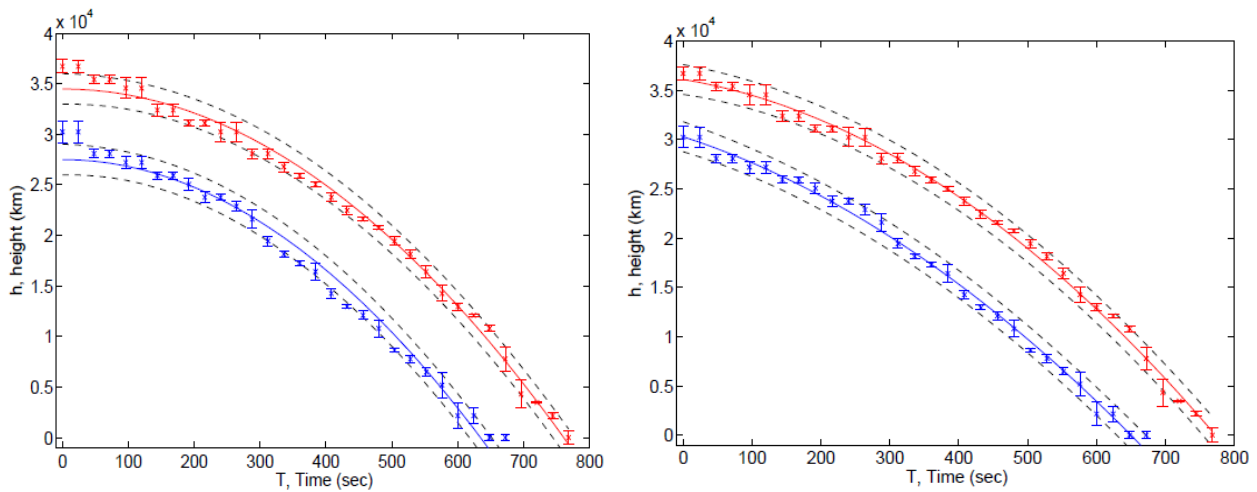
წვეთების ტრაექტორიის დასადგენად UT 21:30-22:15 დროის ინტერვალში, ჩვენ გავაკეთეთ სივრცე-დროითი ჭრილი X (იქს) ღერძის გასწვრივ 304 Å სპექტრულ ხაზში. პირველი ჯგუფის სამივე წვეთის ტრაექტორია წარმოდგენილია 3.4 ნახაზზე თეთრი ისრით. პირველი და მესამე წვეთის ტრაექტორიები შედარებით პარაბოლურია, ვიდრე მეორე წვეთის ტრაექტორია, რომელიც თითქმის წრფივია.



ნახაზი 3.4. პირველი ჯგუფის წვეთების სივრცე-დროითი ჭრილი X ღერძის გასწვრივ 304 Å-ის ხაზში. მარცხენა გამოსახულება წარმოადგენს ჭრილს პირველი და მეორე წვეთის ვარდნის ტრაექტორიის გასწვრივ, ხოლო მარჯვენა - გამოსახულება ჭრილს მესამე წვეთის ვარდნის ტრაექტორიის გასწვრივ.

სივრცე-დროითი ჭრილის საშუალებით წვეთის ვარდნის დროის სხვადასხვა მომენტისთვის მივიღეთ წვეთების მდებარეობა სიმაღლის მიხედვით. 3.5 ნახაზზე ნაჩვენებია სიმაღლის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი, პირველი (წითელი) და მესამე (ლურჯი) წვეთებისთვის. მიღებულ ტრაექტორიებს აპროქსიმაცია ჩავუტარეთ კვადრატული პოლინომიალით $h = h_0 - V_0 t - at^2/2$, სადაც h_0 წარმოადგენდა საწყის სიმაღლეს, V_0 - საწყის სიჩქარეს, ხოლო a - აჩქარებას. აპროქსიმაცია ჩავატარეთ როგორც საწყისი სიჩქარით, ასევე მის გარეშე. პირველი და მესამე წვეთების აჩქარება საწყისი სიჩქარის გარეშე (როდესაც $V_0 = 0$) წარმოადგენდა შესაბამისად 120 მ/წმ² და 136 მ/წმ².

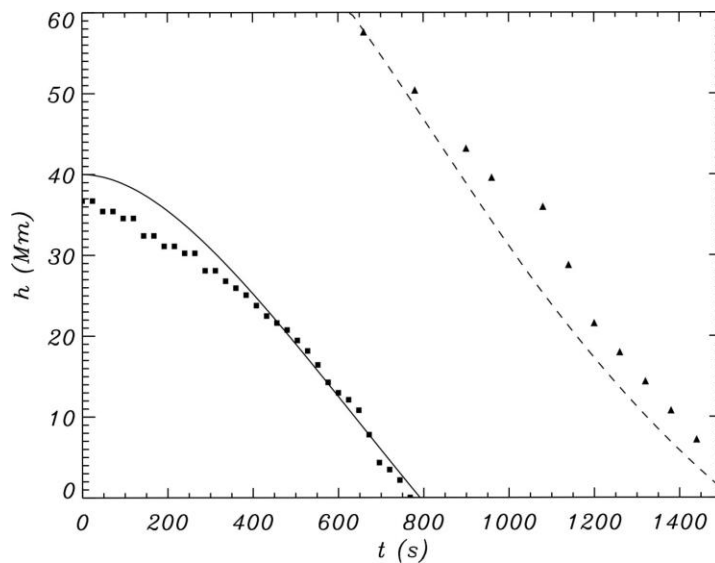
მეორეს მხრივ არანულოვანი საწყისი სიჩქარის შემთხვევაში გვექონდა შემდეგი პარამეტრები პირველი წვეთისთვის $V_0 = 12$ კმ/წმ და $a = 92$ მ/წმ², ხოლო მესამე წვეთისთვის - $V_0 = 22$ კმ/წმ და $a = 74$ მ/წმ². ორივე შემთხვევისთვის აჩქარება გაცილებით ნაკლებია ვიდრე მზეზე გრავიტაციული ვარდნის აჩქარება. რაც შეეხება მეორე წვეთს, ის თითქმის წრფივად ვარდებოდა ~ 60 კმ/წმ საშუალო სიჩქარით.



ნახაზი 3.5. პირველი (წითელი) და მესამე (ლურჯი) წვეთების სიმაღლის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი. მარცხენა მხარეს წარმოდგენილია აპროქსიმაცია საწყისი სიჩქარის გარეშე, ხოლო მარჯვენა მხარეს წარმოდგენილია აპროქსიმაცია საწყისი სიჩქარით. წყვეტილი სასაზღვრო მრუდით წარმოდგენილია 95%-იანი სანდოობის არე, ხოლო ვერტიკალური ცდომილების ხაზები წარმოადგენს სტანდარტულ გადახრას.

კვადრატული პოლინომიალით აპროქსიმაციამ გვაჩვენა რომ საწყისი სიჩქარის არსებობამ შეამცირა პირველი და მესამე წვეთის ვარდნის აჩქარება, რაც შეესაბამება მნიშვნელობებს რომელიც წინა შრომებში იქნა ნახაზი (Schrijver 2001; Antolin & Rouppe van der Voort 2012). თუმცა მეორე წვეთი, რომელიც ვარდება იმავე მარყუჟში (ან მიყვება იმავე გზას) რასაც პირველი წვეთი, მისი აჩქარება თითქმის ნულია. ერთიდაიმავე მაგნიტური მარყუჟის გასწვრივ ვარდნილი ორი წვეთის განსხვავებული ქცევის დასადგენად, ჩვენ Oliver et al. (2014)-ის სამუშაოზე დაყრდნობით ჩავატარეთ მცირე რიცხვითი მოდელირება. ჩვენ

განვიხილეთ ვერტიკალური მაგნიტური მარყუჟი, რომლის საბაზისო სიმკვრივე და სიმაღლის მასშტაბი იგივეა რაც Oliver et al. (2014)-ის შრომაში. საწყის ეტაპზე ავიღეთ მაგნიტურ მარყუჟში 40 მგმ-ის სიმაღლეზე ფორმირებული წვეთი, რომლის საწყისი სიჩქარე ნულის ტოლი იყო, რაც შეესაბამებოდა ჩვენს მიერ დაკვირვებული პირველი წვიმის წვეთის მონაცემებს. ნახაზი 3.4 და ნახაზი 3.5-ის მსგავსი სიმაღლის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკის რეპროდუქციისთვის, საჭირო იყო წვეთისთვის მიგვენიჭებინა საწყისი სიმკვრივე. მნიშვნელობა, რომელიც წარმოადგენდა 6×10^{-13} გ/სმ³-ს გვადლევდა კარგ ურთიერთ შეთანხმებას დაკვირვებულ პირველი წვეთის ვარდნის ტრაექტორიასა და მოდელირებით მიღებულ შედეგს შორის (იხ. კვადრატები და უწყვეტი მრუდი 3.6 ნახაზზე). ჩვენს მიერ გაკეთებულ რიცხვით მოდელირებაში გავითვალისწინეთ $t = 630$ წმ-ის შემდეგ 60 მგმ-ზე წარმოქმნილი მეორე წვეთიც (იხ. სამკუთხედები და წყვეტილი მრუდი 3.6 ნახაზზე). დაკვირვებული დინამიკის მოდელთან მსგავსებისთვის, საჭირო იყო მეორე წვეთისთვისაც მიგვენიჭებინა საწყისი სიმკვრივე. სიმკვრივის 10^{-14} გ/სმ³ მნიშვნელობამ მოგვცა გონივრული ურთიერთ კავშირი დაკვირვებასა და რიცხვით მოდელირებას შორის. რიცხვითმა მოდელირებამ აჩვენა რომ მეორე წვეთი მალევე აღწევს მუდმივ სიჩქარეს. ჩვენი ვარაუდით ამის მიზეზი არის ის, რომ პირველი წვეთს ვარდნისას მაგნიტური მარყუჟის მთლიან პლაზმა მოყავს მოძრაობაში. აქედან გამომდინარე მეორე წვეთის წარმოქმნა ხდება მოძრავ გარემოში, რაც წვეთს უბიძგებს ვარდნისკენ. მოდელირებიდან გამომდინარე დაბალი სიმკვრივის გამო, მეორე წვეთს 304 Å-ში უნდა ქონდეს ნაკლები სიკაშკაშე, რაც არ გამოჩნდა დაკვირვებებში (იხ. ნახაზი 3.3).



ნახაზი 3.6. პირველი ჯგუფის პირველი (კვადრატები) და მეორე (სამკუთხედები) წვეთების დაკვირვებული სიმაღლის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი. უწყვეტი და წვეტილი მრუდით მოცემულია რიცხვითი მოდელირების შედეგი.

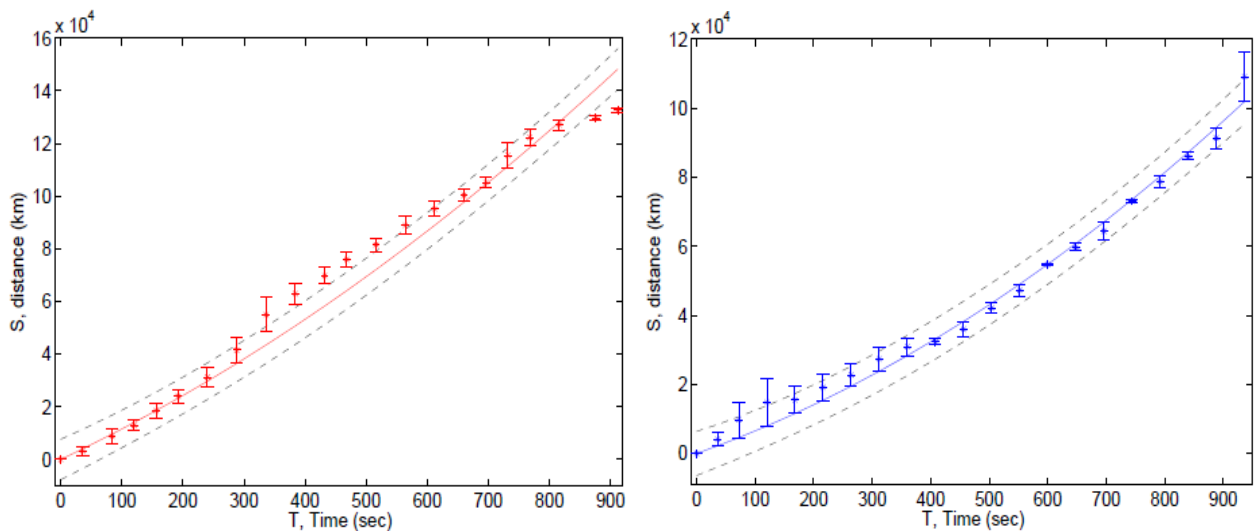
თუმცა ასევე პირველი წვეთის ვარდნის შემდეგ პლაზმა იყოს გაუხშობელი, აქედან გამომდინარე მეორე წვეთს გარემოსთან ნაკლები წინააღმდეგობა ექნება, რაც მეორე წვეთის მაღალი სიჩქარით გამოიხატება (Müller et al. 2003). ასევე Fang et al. (2013)-ის მიერ გაკეთებულ რიცხვით მოდელირებაში, ზოგ შემთხვევაში მეორე წვეთს უფრო ნაკლები აჩქარება აქვს ვიდრე პირველ წვეთს. აქედან გამომდინარე მსგავსი ფენომენი შეიძლება დამოკიდებული იყოს კორონულ მარყუჟში არსებულ კონკრეტულ ფიზიკურ პირობებზე.

3.1.2. მეორე ჯგუფის წვიმის წვეთები

კორონული მარყუჟის გაციების შემდგომ ადგილი აქვს მეტად მძლავრ კორონული წვიმის მოვლენას. ცივი პლაზმის ვარდნა ხდება კორონული მარყუჟების სისტემის გადახრილი მაგნიტური ველის გასწვრივ. მსგავსი ნაკადი, რომელიც შედგება ბევრი სხვადასხვა პატარა წვეთისგან, მეტად შეესაბამება კორონული წვიმის მოვლენას. თუმცა ჩვენ მხოლოდ ორი წვეთის იდენტიფიცირება მოვახდინეთ. პირველი წვეთი გამოჩნდა ~95 მგმ-ის სიმაღლეზე UT 21:41 სთ-ზე და მოძრაობდა დახრილ ტრაექტორიაზე (იხ.

წერტილოვანი მრუდი ნახაზი 3.1-ის ქვედა მარჯვენა გამოსახულებაზე). გამოჩენისას წვეთის სიგანე და სიგრძე შესაბამისად წარმოადგენდა ~ 1400 კმ-ს და ~ 2100 კმ-ს. ვარდნისას წვეთის სიგანე უცვლელი იყო, თუმცა სიგრძე გაიზარდა. წვეთის ~ 100 კმ/წმ საშუალო სიჩქარით ვარდებოდა ~ 13 წთ-ის განმავლობაში. მეორე წვეთი დაიკვირვებოდა ~ 86 მგმ სიმაღლეზე UT 21:57 სთ-ზე. მეორე წვეთი ვარდებოდა იმავე ტრაექტორიით იმავე დროში (~ 13 წთ), რომლითაც პირველი, თუმცა მისი საშუალო სიჩქარე შეადგენდა ~ 90 კმ/წმ-ს.

3.7 ნახაზზე წარმოდგენილია სიმაღლის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი მეორე ჯგუფის პირველი (წითელი წერტილები) და მეორე (ლურჯი წერტილები) წვეთებისთვის. პირველი წვეთის $V_0 = 80$ კმ/წმ საწყისი სიჩქარით ვარდნისას დახრილი ტრაექტორიის გასწვრივ შეფასებული აჩქარება წარმოადგენდა $a = \sim 130$ მ/წმ²-ს. უნდა გავითვალისწინოთ, რომ მსგავსი ეფექტური აჩქარება დიდი ალბათობით წვეთის დახრილ ტრაექტორიაზე მოძრაობის გამოა, თუმცა მისი მნიშვნელობა გრავიტაციული ვარდნის აჩქარებასთან შედარებით დაბალია. მეორეს მხრივ მეორე წვეთის $V_0 = 60$ კმ/წმ საწყისი სიჩქარით ვარდნის აჩქარება $a = 100$ მ/წმ²-ის ტოლია.



ნახაზი 3.7. მეორე ჯგუფის პირველი (წითელი წერტილები) და მეორე (ლურჯი წერტილები) წვეთების მანძილის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი. პირველი (ლურჯი უწყვეტი მრუდი) და მეორე (წითელი უწყვეტი მრუდი) წვეთების არანულოვანი საწყისი სიჩქარით აპროექსიმირებული მრუდები.

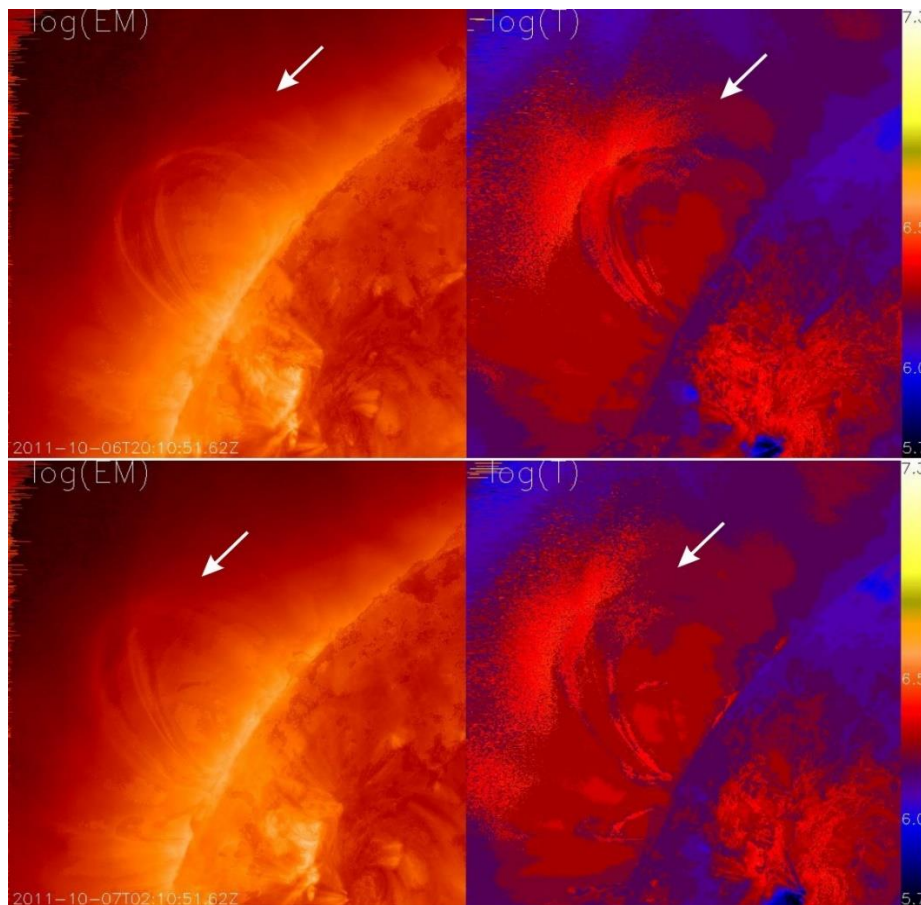
მეორე ჯგუფი წარმოადგენს ორ ერთი და იმავე ტრაექტორიის გასწვრივ ვარდნილ წვეთებს, როგორც პირველი ჯგუფის პირველი და მეორე წვეთი. ამ ორი ჯგუფის წვეთებს შორის განსხვავება ის არის, რომ პირველი ჯგუფის მეორე წვეთი ვარდება თითქმის ნულოვანი აჩქარებით როცა მეორე ჯგუფის მეორე წვეთს აქვს არანულოვანი ~ 100 მ/წმ² აჩქარება. ამ განსხვავებული დინამიკის მიზეზი შესაძლებელია იყოს ის ფაქტი, რომ მეორე ჯგუფის მეორე წვეთი ვარდნას იწყებს მაშინ როცა პირველი წვეთი მიაღწევს ტრაექტორიის ყველაზე დაბალ ნაწილს, ხოლო პირველი ჯგუფის მეორე წვეთის ვარდნა იწყება პირველი წვეთის ვარდნის პროცესში. აქედან გამომდინარე შეგვიძლია ვთქვათ რომ პირველი ჯგუფის ორივე წვეთი დინამიურ კავშირშია ერთმანეთთან, რასაც ვერ ვიტყვით მეორე ჯგუფის წვეთებზე. ეს ფაქტი ადასტურებს რიცხვითი მოდელირების შედეგს: პირველი ჯგუფის პირველი წვეთის მოძრაობა გავლენას ახდენს მეორე წვეთის დინამიკაზე, თუ ისინი ვარდებიან ერთი და იმავე ტრაექტორიით.

3.2. ადიაბატური ინდექსის შეფასება კორონული წვიმის დროს

შემდეგ კორონულ წვიმის მოვლენას, რომელიც შევისწავლეთ DEM პროგრამული კოდის გამოყენებით, ადგილი ჰქონდა AR 11312 აქტიური რეგიონის კორონულ მარყუჟებში. 2011 წლის 6 ოქტომბერს SDO-AIA კოსმოსური თანამგზავრით დაკვირვებულ მზის დისკოს კიდეზე განთავსებულ კორონულ მარყუჟებზე, პროგრამული კოდის დახმარებით მოხდა ინდივიდუალურად ანალიზის ჩატარება. DEM (Differential Emission Measure) პროგრამული კოდის გამოყენებით ავტომატურად, მზის Fe XVIII (94 Å), Fe VIII, XXI (131 Å), Fe IX (171 Å), Fe XII, XXIV (193 Å), Fe XIV (211 Å), Fe XVI (335 Å) სპექტრულ ხაზებში, რომელიც მოიცავს $10^{5.8}$ კელ-დან $10^{7.2}$ კელ-მდე ტემპერატურულ შუალედს, მოხდა მარყუჟების მსგავსი ობიექტების დაფიქსირება.

როგორც ზევით ავღნიშნეთ კორონული წვიმის ფორმირება დაკავშირებულია კორონული მარყუჟების გაციებასთან (Vashalomidze et al. 2015). თავდაპირველად DEM კოდის გამოყენებით შევქმენით გამოსხივების და ტემპერატურული რუკები. 2011 წლის 6

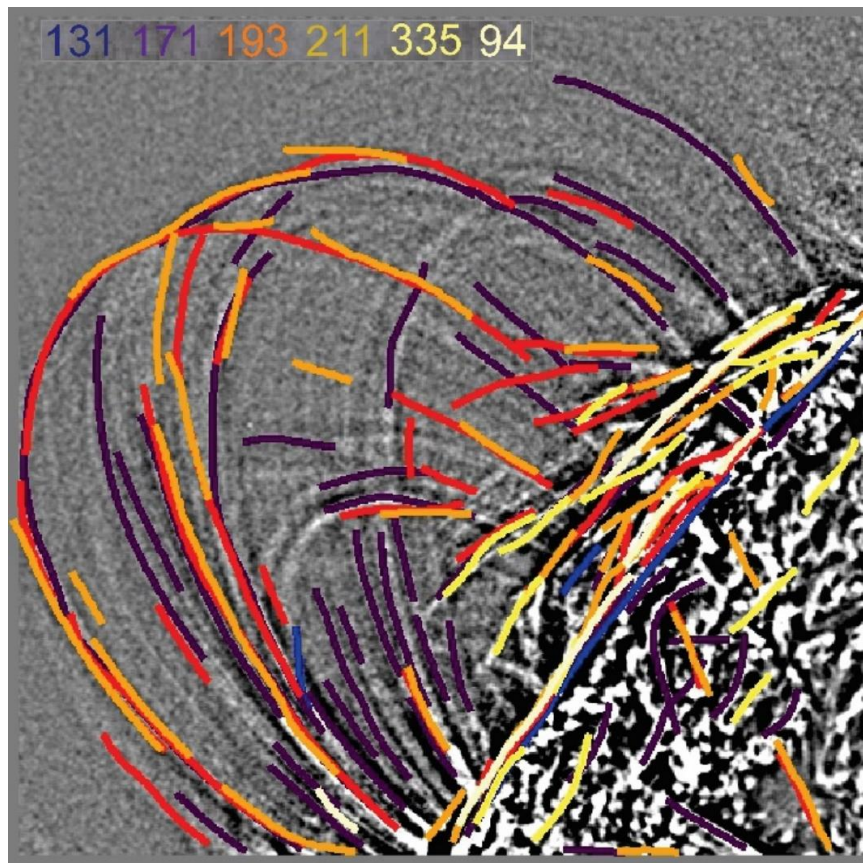
ოქტომბერს UT 20:10 სთ-ზე დაფიქსირებული აქტიური არის გამოსხივების და ტემპერატურული რუკები წარმოდგენილია 3.8 ნახაზზე. კორონული მარყუჟები (იხ. თეთრი ისრით მითითებული არე 3.8 ნახაზის ზედა გამოსახულებებზე) კარგად დაიკვირვება წვიმის დასაწყისში, თუმცა კორონული წვიმის დასასრულს UT 02:11 სთ-ზე ისინი თანდათან ქრება. ტემპერატურული რუკა, რომელის ლოგარითმული შკალა 3.8 ნახაზის მარჯვენა ვერტიკალურ ზოლშია მოცემული, აჩვენებს შედარებით მაღალ ტემპერატურას კორონული მარყუჟის წვეროში (იხ. ზედა მარჯვენა გამოსახულება ნახაზი 3.8). თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ ტემპერატურა კორონული წვიმის დასასრულს კვლავ მაღალია $\log(T) \approx 6.2 - 6.4$ (იხ. ქვედა მარჯვენა გამოსახულება ნახაზი 3.8).



ნახაზი 3.8. აქტიური რეგიონის ტემპერატურული და გამოსხივების რუკები კორონული წვიმის დაწყების და დამთავრების დროს. გამოსხივების რუკა წარმოდგენილია ზედა და ქვედა მარცხენა მხარეს, ხოლო ტემპერატურული რუკა ზედა და ქვედა მარჯვენა მხარეს. თეთრი ისრით

მითითებულია მაგნიტური მარყუქების სისტემა. მუქი ლური ფერი შეესაბამება დაბალ ტემპერატურას, ხოლო ღია მოწითალო ფერი მაღალ ტემპერატურას (ტემპერატურის ლოგარითმული შკალა ფერების მიხედვით მოცემულია ნახაზის მარჯვენა მხარეს).

რადგან კორონული წვიმა დაკავშირებულია კორონული მარყუქის ცალკეულ სტრუქტურებთან, ჩვენ ჩავუტარეთ ანალიზი AR 11312 აქტიური რეგიონის ინდივიდუალურ მარყუქებს. მარყუქების ავტომატური დეტექტირებისთვის და ანალიზისთვის ჩვენ გამოვიყენეთ OCCULT (Oriented Coronal Curved Loop Tracing) კოდი. ეს კოდი მზის EUV-ი გამოსახულებებზე აღბეჭდილი მრუდი ობიექტების ავტომატურ დეტექტირებას, გამოყოფას და მიყოლას ახდენს (Aschwanden 2013). კორონული წვიმის დაწყებისას OCCULT კოდის გამოყენებით ავტომატურ რეჟიმში მოხდა 240 ერთეული მარყუქის ტიპის ობიექტის დაფიქსირება. მეტწილად კორონული მარყუქების დაფიქსირება მოხდა 171 Å, 193 Å და 211 Å სპექტრულ ხაზებში. დეტექტირებული მარყუქების რიცხვი საგრძნობლად შემცირდა შემდგომი ოთხი საათის განმავლობაში, რაც დიდი ალბათობით დაკავშირებულია კორონული მარყუქების გაციებასთან. სამწუხაროდ გაციებული მარყუქების დაფიქსირება შედარებით ცივ 304 Å-ის ხაზში DEM და OCCULT კოდის გამოყენებით შეუძლებელია.

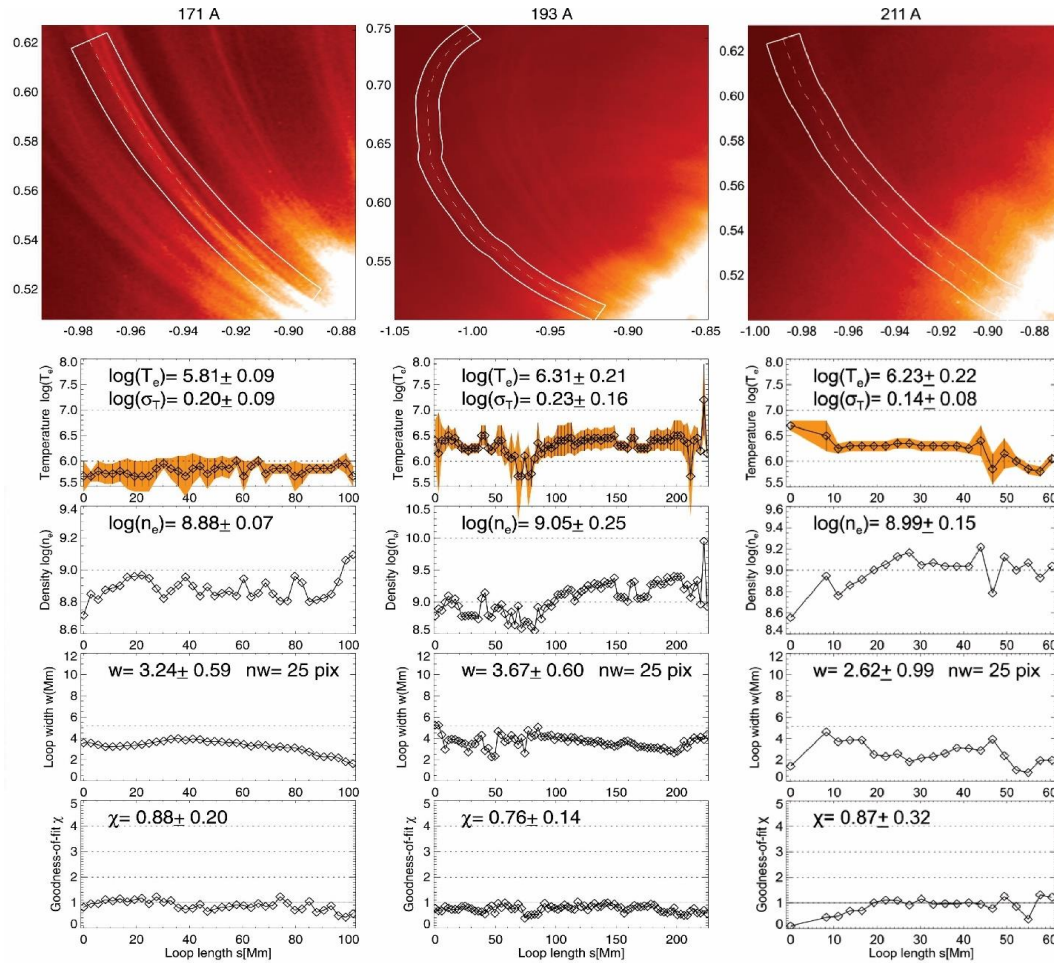


ნახაზი 3.9. ექვს სხვადასხვა ტალღის სიგრძეში ავტომატურად დაფიქსირებული კორონული მარყუქები. სხვადასხვა ფერით გამოსახულია სხვადასხვა ტალღის სიგრძე (ტალღის სიგრძეები მითითებულია სურათის ზედა მხარეს).

ჩვენ გამოვიყენეთ შემდეგი საკონტროლო პარამეტრები: მარყუქის სიმრუდის მინიმალური რადიუსი $r_{min} = 30$ პიქსელი, მარყუქის ნახევარსიგანე $\omega = 4$ პიქსელი, სტანდარტული გადახრის ზღვრული დონე $n_{sig} = 1.0$ და მოძებნილი სტრუქტურის მინიმალური შევსების კოეფიციენტი $q_{fill} = 0.35$. ამ პარამეტრებით მოძებნილი სტრუქტურები ექვს სხვადასხვა ტალღის სიგრძის სპექტრულ ხაზში წარმოდგენილია 3.9 ნახაზზე.

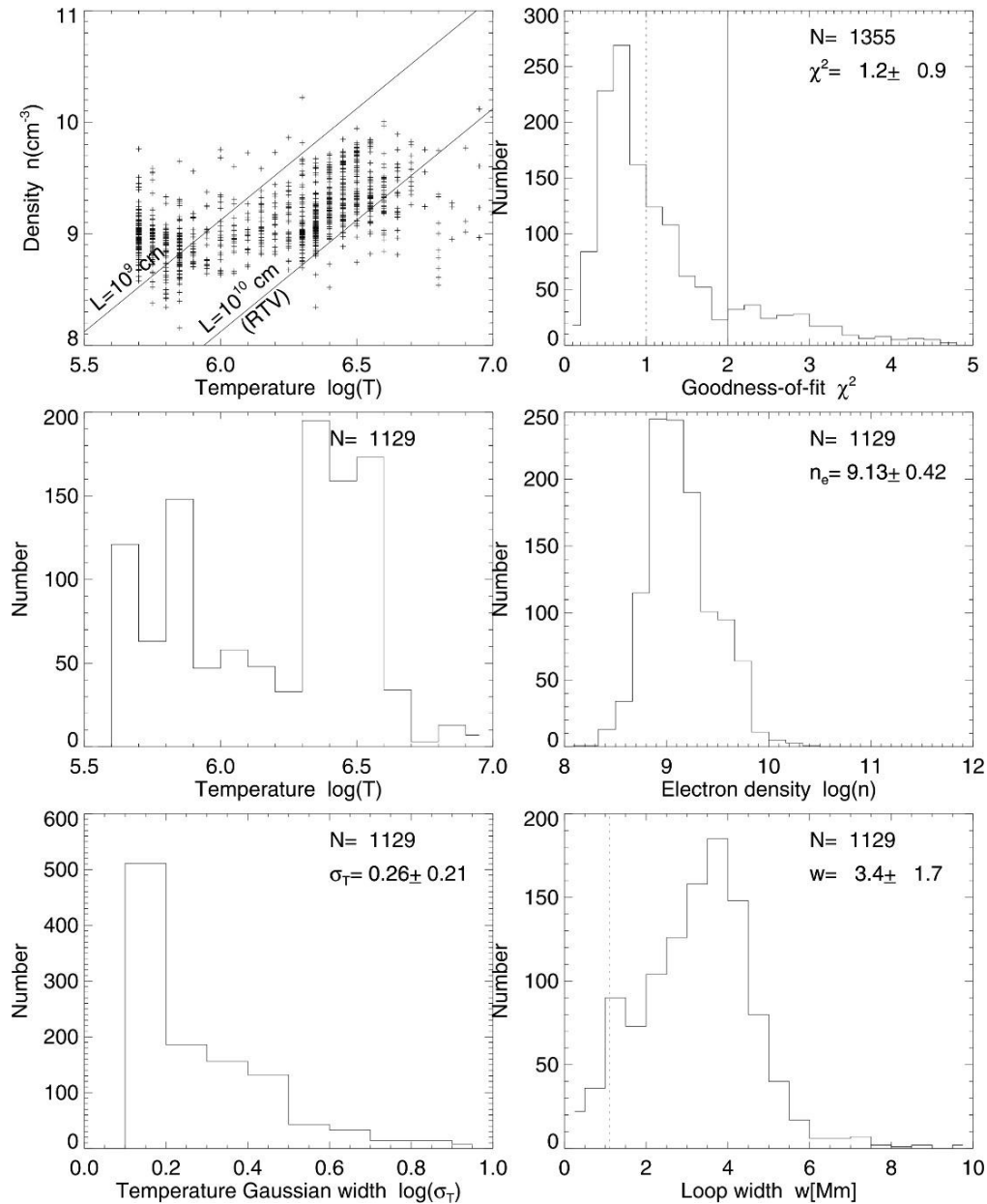
OCCULT კოდი, DEM კოდის ავტომატური პარამეტრების დახმარებით, ავტომატურად ახდენს კორონული მარყუქის მოცემული სეგმენტის გამოსხივების და ტემპერატურის დადგენას (Aschwanden 2010a, 2010b, 2013). კოდის დახმარებით ანალიზი ჩაუტარდა 1355

ერთეულ სეგმენტად დაყოფილ 240 ცალ ავტომატურად მოძებნილ მაგნიტურ მარყუჟს. სხვადასხვა ტალღის სიგრძის თითოეული მარყუჟის სეგმენტისთვის მოხდა ტემპერატურის, მარყუჟის გასწვრივ ელექტრონული სიმკვრივის, მარყუჟის სიგანის შეფასება. ნახაზი 3.10-ზე წარმოდგენილი გვაქვს სამ 171 Å, 193 Å და 211 Å ხაზში სხვადასხვა მარყუჟის გამოსახულება, ტემპერატურით, ელექტრონული სიმკვრივით და მარყუჟის სიგანის შეფასებით.



ნახაზი 3.10. სურათზე წარმოდგენილია სხვადასხვა ავტომატურად დაფიქსირებული მარყუჟი სხვადასხვა ტალღის სიგრძეში მზის რადიუსის ერთეულში (მარყუჟის გამოსახულება და ტალღის სიგრძე წარმოდგენილია სვეტის ზედა სურათზე). თითოეულ სვეტში მოცემულია შესაბამისი მარყუჟის: ტემპერატურა, ელექტრონული სიმკვრივე, მარყუჟის სიგანე და საშუალო კვადრატული გადახრა თითოეული მიახლოებისთვის.

3.11 ნახაზზე მოცემულია კორონული წვიმის დასაწყისში, DEM კოდის საშუალებით ავტომატურად მოძებნილი 240 ერთეული მარყუქის სეგმენტის სტატისტიკური ანალიზი.



ნახაზი 3.11. 240 ერთეული DEM პროგრამული კოდით ავტომატურად მოძებნილი მარყუქების სტატისტიკა. მარჯვენა ზედა მხარეს წარმოდგენილია გაზომილი გამოსხივება როგორც ტემპერატურის ფუნქციის განაწილება Rosner, Tucker, Vaiana (RTV) მოდელის მიხედვით. მარცხენა შუა ნაწილში წარმოდგენილია კორონული მარყუქების ტემპერატურული განაწილება. ქვედა მარცხენა მხარეს - ტემპერატურის ნორმალური განაწილების ნახევარსიგანე. მარცხენა შუა

ნაწილი გვიჩვენებს ელექტრონის სიმკვრივის განაწილებას. ქვედა მარცხენა გრაფიკი წარმოადგენს კორონული მარყუქების სიგანის განაწილებას.

სტატისტიკურმა ანალიზმა კორონული მარყუქების ტემპერატურული პიკი $\log(T) = 6.3 - 6.6 K$ შუალედში გვიჩვენა (იხ. შუა მარცხენა ჩარჩო ნახ. 3.11), ხოლო ელექტრონული სიმკვრივე $\log(n_e) = 9.13 \pm 0.42 \text{ სმ}^{-3}$ (იხ. შუა მარჯვენა ჩარჩო ნახ. 3.11), ამავდროულად DEM ტემპერატურის ნორმალური განაწილების ნახევარსიგანე შეადგენდა $\sigma_T = 0.26 \pm 0.21$ (ქვედა მარცხენა მხარე ნახ. 3.11) და საბოლოოდ მარყუქების სიგანეების განაწილება აღწევდა $\omega = 3.2 \pm 1.7$ მგმ-ს (ქვედა მარჯვენა მხარე ნახ. 3.11). გაზომილი გამოსხივება როგორც ტემპერატურის ფუნქციის განაწილება Rosner, Tucker, Vaiana (RTV) მოდელის მიხედვით, რომელიც განსაზღვრავს მაქსიმალური ტემპერატურის, წნევის და მარყუქის სიგრძის ურთიერთ დამოკიდებულებას ნაჩვენებია 3.11 ნახაზის მარცხენა ზედა კუთხეში 10 – 100 მგმ სიგრძის მქონე მარყუქებისთვის.

აირის წნევა იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლებიდან მოცემულია ფორმულით:

$$p = n_e k_B T \quad (3.1)$$

სადაც n_e - ელექტრონული სიმკვრივეა, k_B - ბოლცმანის მუდმივა, ხოლო T - ტემპერატურა. აქედან გამომდინარე ადიაბატური პროცესები ემორჩილება ტოლობას:

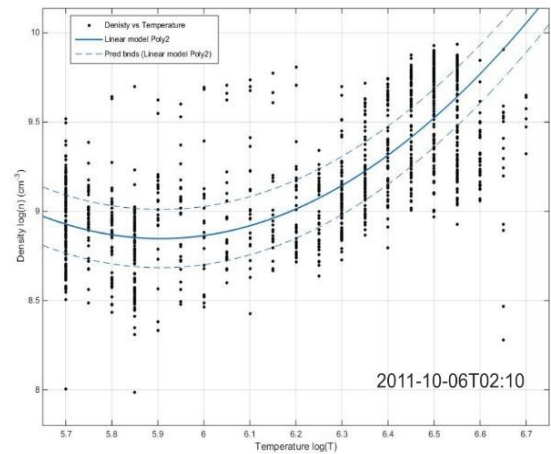
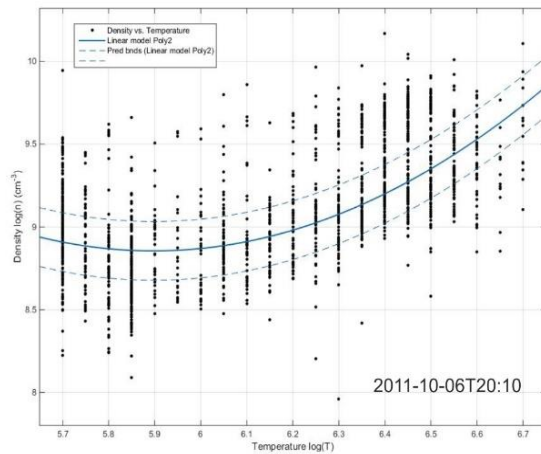
$$p^{1-\gamma} T^\gamma = \text{const} \quad (3.2)$$

სადაც γ სითბოგამტარობის მაჩვენებელია, რომელიც მეტწილად მდებარეობს $[1; 5/3]$ შუალედში. (3.1) და (3.2) ტოლების გამოყენებით შეგვიძლია მივიღოთ თეორიული კავშირი ელექტრულ სიმკვრივესა და ტემპერატურას შორის, ადიაბატური პროცესების დროს:

$$(\gamma - 1) \log(n) = \log(T) - \log \frac{\text{const}}{k_B^{1-\gamma}} \quad (3.3)$$

მეორეს მხრივ, სხვადასხვა კორონული მარყუქის გამოსხივების და ტემპერატურის სტატისტიკური მნიშვნელობები, ელექტრონულ სიმკვრივესა და ტემპერატურას შორის

კავშირის დადგენის საშუალებას იძლევა. 3.12 ნახაზზე მოცემულია კვადრატული პოლინომიალით აპროქსიმირებული ელექტრული სიმკვრივის ტემპერატურაზე დამოკიდებულების მრუდი, კორონული წვიმის დაწყების და დამთავრების დროს.



ნახაზი 3.12. კორონული წვიმის დაწყების (ნახაზის მარცხენა მხარე) და დამთავრების (ნახაზის მარჯვენა მხარე) დროს ელექტრონული სიმკვრივის და ტემპერატურის დამოკიდებულების კვადრატული პოლინომიალით აპროქსიმირებული (უწყვეტი მრუდი) გრაფიკი.

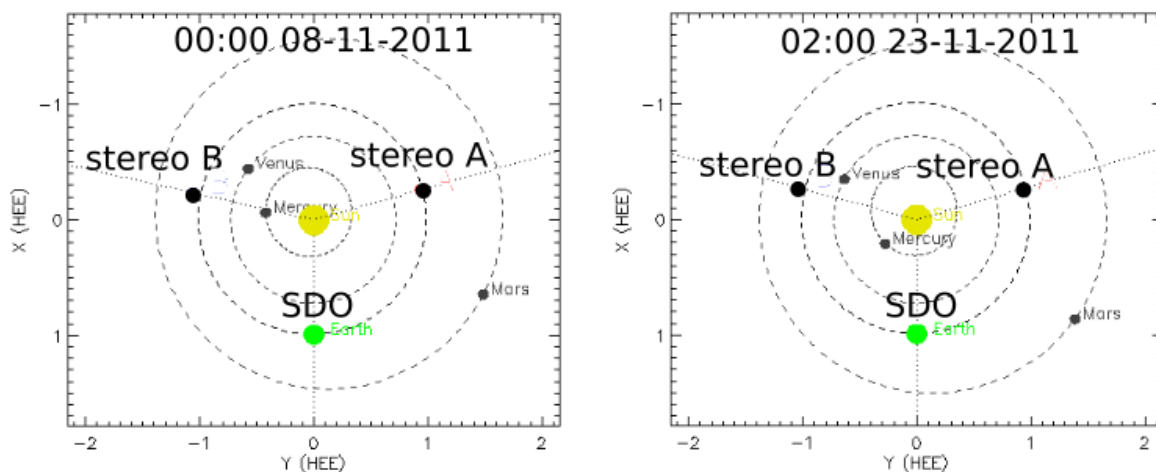
ჩვენს მიერ წვიმის დასასრულს შეფასებული ადიაბატური ინდექსი წარმოადგენდა $\gamma = 1.3 \pm 0.06$, რაც მოსალოდნელი იყო. რაც შეეხება წვიმის ფორმირების დროს ადიაბატური ინდექსი $\gamma = 2.1 \pm 0.11$, რაც გაცილებით დიდია ვიდრე უნდა ყოფილიყო. აქედან გამომდინარე ჩვენ ვვარაუდობთ, რომ ადიაბატური ინდექსის მაღალი მაჩვენებელი დაკავშირებულია კატასტროფულ გაციებასთან.

ჩვენს მიერ შესრულებულ სამუშაოებში ენერგიის შეფასებამ გვიჩვენა ე.წ. „კატასტროფული გაციების“ მოვლენა, რომლის დროსაც რადიაციული კარგვა აღემატებოდა ენერგიის სითბურ წყაროს. „კატასტროფულ გაციებას“ თან ახლდა კორონული წვიმის წვეთების ვარდნა, რაც ადასტურებს კორონული წვიმის ფორმირების და „კატასტროფული გაციების“ კავშირს.

თავი 4. კორონული წვიმის კავშირი პროტუბერანცებთან

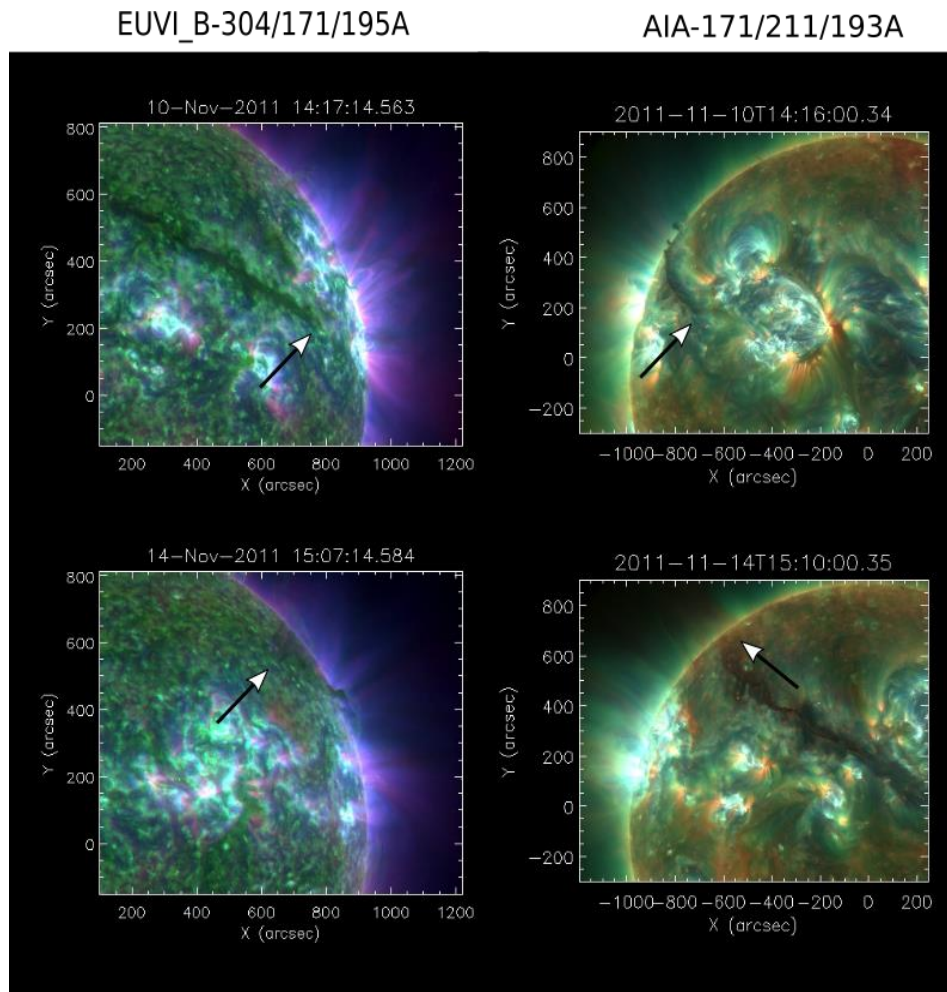
4.1. კორონული წვიმის შედეგად გამოწვეული პროტუბერანცის ამოფრქვევა

ჩვენ შევისწავლეთ SDO-ს და STEREO-ს მიერ ერთდროულად დაკვირვებული მოვლენა 2011 წლის 8 ნოემბრიდან 23 ნოემბრამდე. ეს კოსმოსური თანამგზავრები მზეს სხვადასხვა კუთხიდან აკვირდებიან, რაც პროტუბერანცის სტრუქტურისა და დინამიკის დეტალური შესწავლის საშუალებას გვაძლევს. დაკვირვების განმავლობაში კუთხური დაშორება SDO-სა და STEREO-B-ს შორის იყო -104° , ხოლო SDO-სა და STEREO-A-ს შორის წარმოადგენდა $+106^\circ$. რაც ნიშნავს იმას, რომ დაკვირვების დროს SDO-დან გადაღებულ გამოსახულებაზე მზის აღმოსავლეთ კიდე 14° -ით შიგნით ჩანდა STEREO-B-დან მიღებულ გამოსახულებებზე, ხოლო მზის დასავლეთ კიდე 16° -ით შიგნით STEREO-A-დან დაკვირვებულ გამოსახულებებზე (იხ. ნახაზი 4.1).



ნახაზი 4.1. SDO, STEREO-A და STEREO-B-ს კოსმოსური თანამგზავრების მდებარეობა კოსმოსში დაკვირვებული მოვლენის დროს.

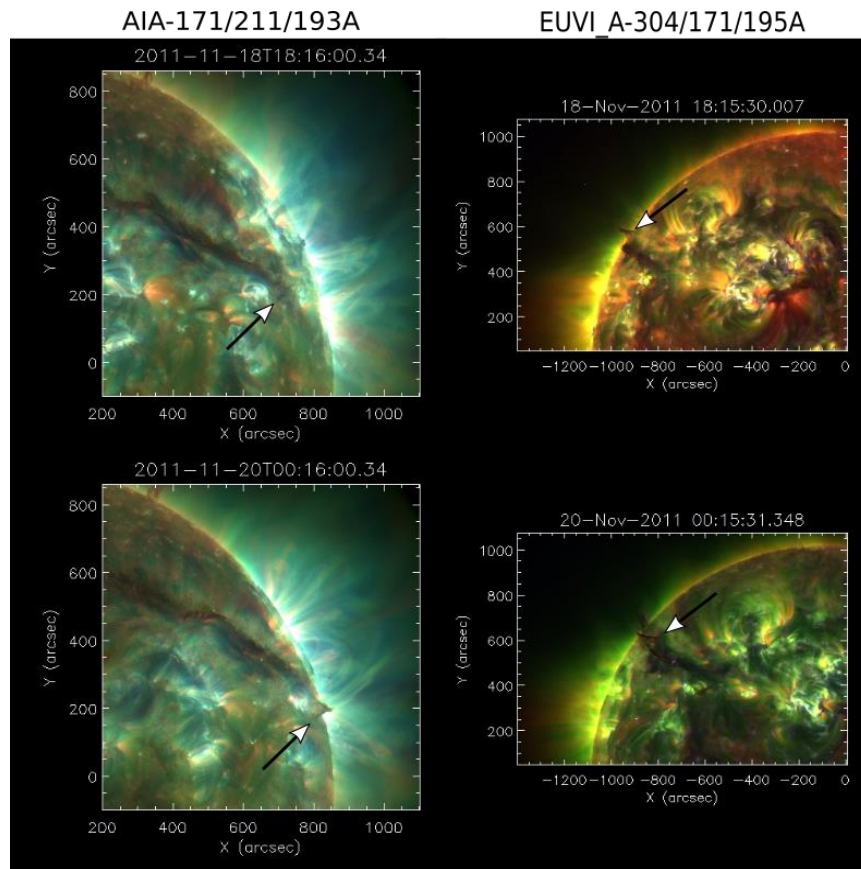
პროტუბერანცი STEREO-B-დან მიღებულ გამოსახულებებზე დაიკვირვებოდა 2011 წლის 14 ნოემბრამდე, ხოლო SDO-დან გადაღებულ გამოსახულებაზე - ამავე წლის 8 ნოემბრიდან 23 ნოემბრამდე. SDO-ს დაკვირვებებითი მონაცემებიდან პროტუბერანცის მზის დასავლეთ კიდეზე გამოჩენისას, ის STEREO-B-ს დაკვირვებებში მზის დისკოს აღმოსავლეთ კიდეზე ფიქსირდებოდა. 4.2 ნახაზზე წარმოდგენილია 2011 წლის 10 ნოემბერს (ზედა ჩარჩო) და 14 ნოემბერს (ქვედა ჩარჩო) დაკვირვებული პროტუბერანცის გამოსახულებები. გამოსახულებების მარცხენა მხარე წარმოადგენს STEREO-B-ს ჯამურ (სხვადასხვა ტალღის სიგრძის გამონასახი ერთ გამოსახულებაზე) სურათებს, ხოლო მარჯვენა მხარე - SDO/AIA-ს ჯამურ სურათებს.



ნახაზი 4.2. პროტუბერანცის ევოლუცია 2011 წლის 10 ნოემბრიდან 14 ნოემბრამდე. სურათის მარცხენა მხარე წარმოადგენს STEREO_B/EUVI-ს 171 Å, 195 Å და 304 Å სპექტრული

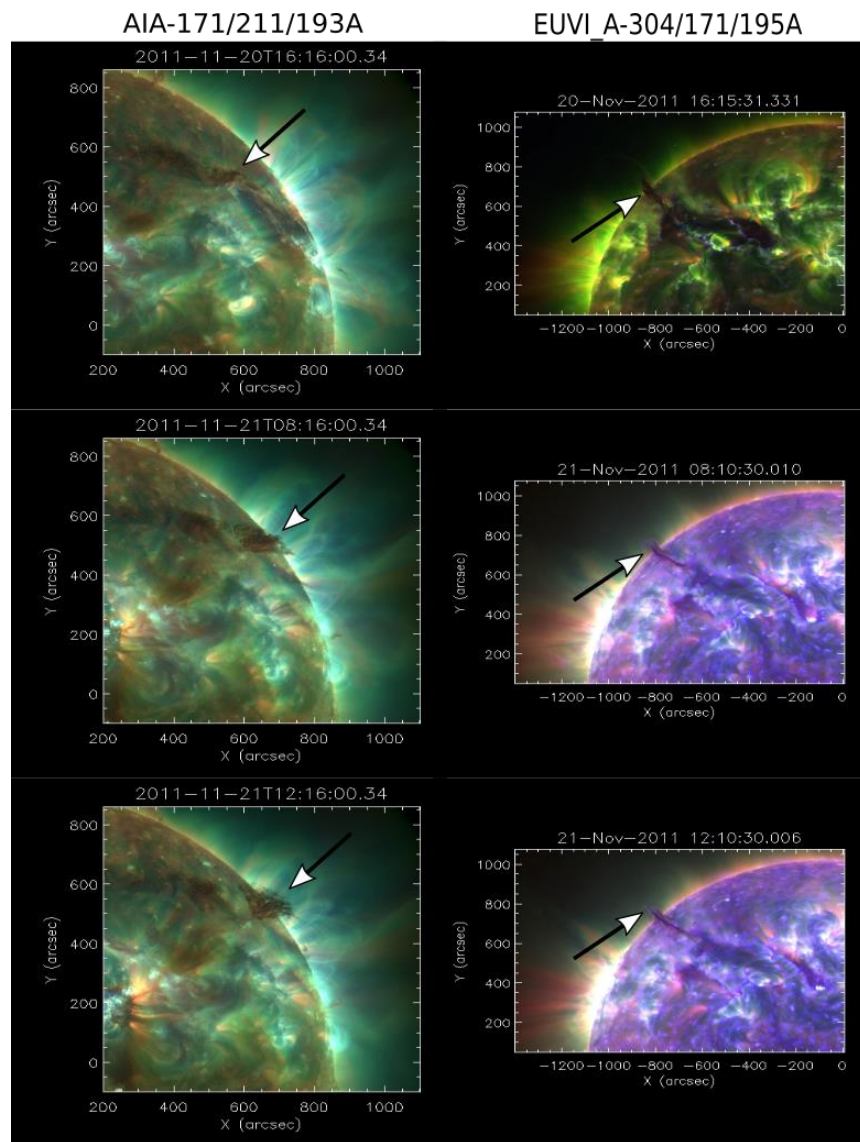
ფილტრებისგან შემდგარ ჯამურ გამოსახულებას. სურათის მარჯვენა სვეტი წარმოადგენს SDO/AIA-ს 171 Å, 193 Å და 211 Å ტალღის სიგრძეებში მიღებული გამონასახის ერთობლიობას. სურათის ზედა გამოსახულებები წარმოადგენს 2011 წლის 10 ნოემბრის დაკვირვებას (ისრით მითითებულია პროტუბერანცის საწყისი საზღვარი), ხოლო ქვედა გამოსახულებები - 2011 წლის 14 ნოემბრის დაკვირვებებს (ისრით მითითებულია დასასრული საზღვარი).

პროტუბერანცმა შემდგომ რამდენიმე დღეში გადაკვეთა მთლიანი მზის დისკო. 2011 წლის 17 ნოემბერს პროტუბერანცი დაიკვირვებოდა STEREO_A/EUVI-ს მიერ მიღებული გამონასახიდან, იმავდროულად ის კვლავ დაიკვირვებოდა SDO/AIA-ს გამოსახულებებში მზის კიდის აღმოსავლეთ მხარეს (იხ ნახაზი 4.3). 2011 წლის 20 ნოემბერს SDO/AIA-ს მიერ მიღებულ გამოსახულებებზე, პროტუბერანცმა მიაღწია მზის აღმოსავლეთ კიდე. 4.3 ნახაზზე წარმოდგენილია 2011 წლის 18 ნოემბერს (ზედა ჩარჩო) და 20 ნოემბერს (ქვედა ჩარჩო) SDO და STEREO_A-ს მიერ დაკვირვებული პროტუბერანცი. ნახაზი 4.3 ისევე როგორც ნახაზი 4.2 წარმოადგენს ჯამური გამოსახულებების ერთობლიობას.



ნახაზი 4.3. პროტუბერანცის ევოლუცია 2011 წლის 18-20 ნოემბერის განმავლობაში. სურათის მარცხენა სვეტი წარმოადგენს SDO/AIA-ს მიერ მიღებული გამოსახულებების ერთობლიობას: 2011 წლის 18 ნოემბერი 18:16 UT ზედა მხარე და 2011 წლის 20 ნოემბერი 16:00 UT ქვედა მხარე. ხოლო სურათის მარჯვენა მხარე წარმოადგენს STEREO_A/EUVI-ის გამოსახულებებს: 2011 წლის 18 ნოემბერი 18:15 UT ზედა და 2011 წლის 20 ნოემბერი 15:31 UT ქვედა. ისრები მიუთითებენ ტორნადოს მდებარეობას პროტუბერანცის საყრდენთან.

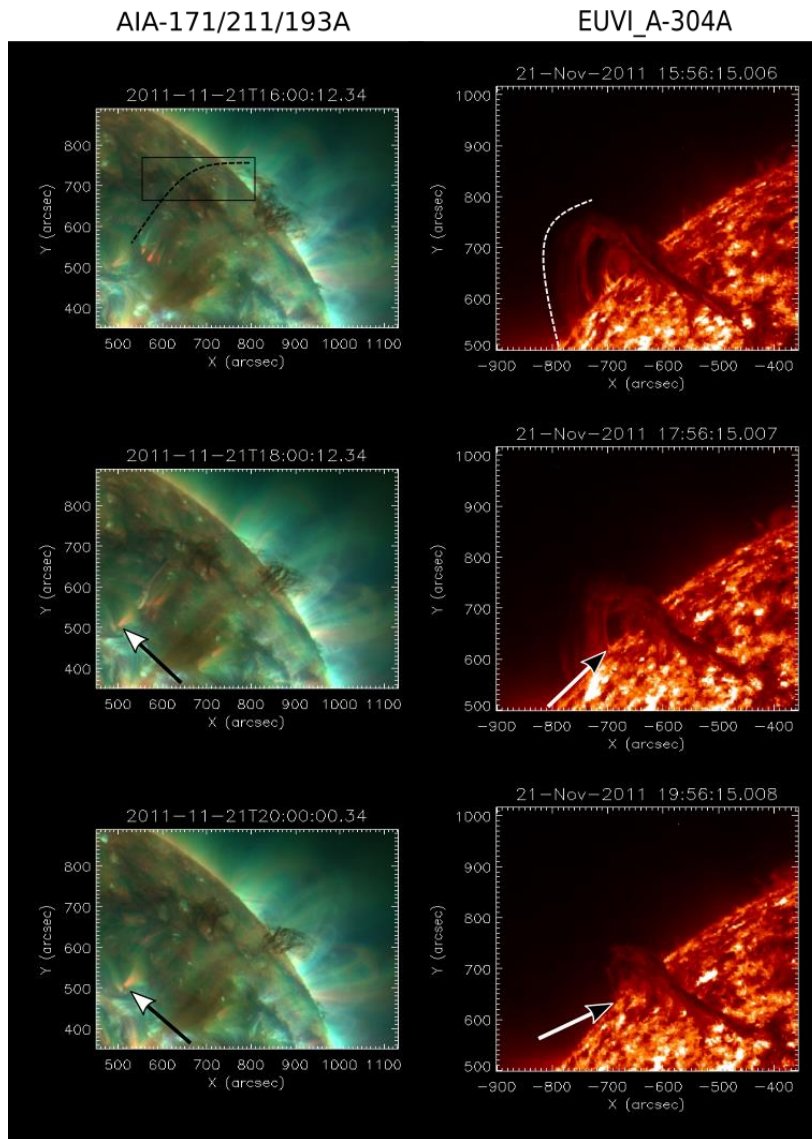
20 ნოემბრის UT 20:16 სთ-დან 21 ნოემბრის UT 12:14 სთ-მდე პროტუბერანცის საყრდენთან დაიკვირვებოდა მზის მაგნიტური ტორნადოს მსგავსი სტრუქტურა. ტორნადო, როგორც შავი ვერტიკალური სტრუქტურა, მკაფიოდ დაიკვირვება STEREO_A/EUVI-ის გამოსახულებებში (მარჯვენა სვეტი ნახაზი 4.4).



ნახაზი 4.4. 2011 წლის 20 – 21 ნოემბრს დაკვირვებული პროტუბერანცის საყრდენთან მზის მაგნიტური ტორნადოს ევოლუცია. მარცხენა სვეტში წარმოდგენილია SDO/AIA-ს ჯამური გამოსახულებები: 20 ნოემბრის UT 16:16 სთ-ზე (ზედა ჩარჩო), 21 ნოემბრის UT 08:16 სთ-ზე (შუა ჩარჩო) და 21 ნოემბრის UT 12:16 სთ-ზე (ქვედა ჩარჩო). მარჯვენა სვეტში - STEREO-A/EUVI-იდან მიღებული გამოსახულებების ჯამი: 20 ნოემბრის UT 16:15 სთ-ზე (ზედა ჩარჩო), 21 ნოემბრის UT 08:10 სთ-ზე (შუა ჩარჩო) და 21 ნოემბრის UT 12:10 სთ-ზე (ქვედა ჩარჩო). ნახაზზე ისრით მითითებულია ტორნადოს ევოლუცია.

პროტუბერანციდან კორონული წვიმის ვარდნა დაიწყო, როდესაც ტორნადომ მიაღწია თავისი სიმაღლის მაქსიმუმს. 4.5 ნახაზზე წარმოდგენილია კორონული წვიმის წვეთების

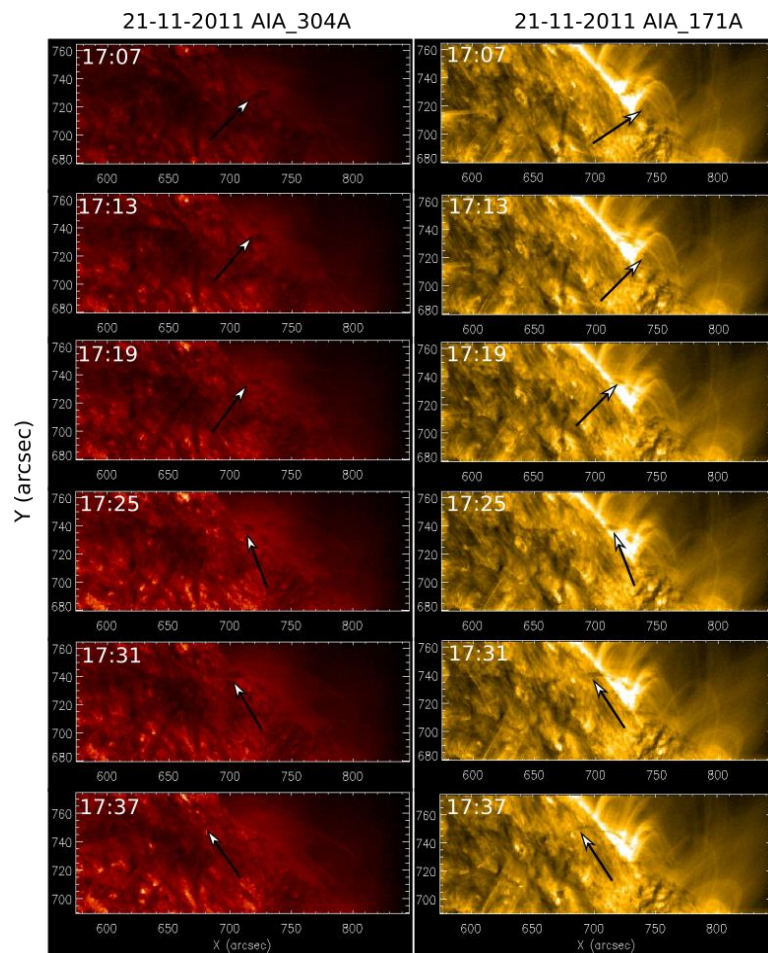
ტრაექტორია მაგნიტური ძალწირების გასწვრივ. პლაზმის ჩამოდენა მიმდინარეობდა დაახლოებით 30 საათი, რაც ნიშნავს იმას რომ, პროტუბერანცმა მასის მნიშვნელოვანი ნაწილი დაკარგა წვიმის სახით.



ნახაზი 4.5. მზის კორონული წვიმა, 2011 წლის 21 ნოემბრის SDO და STEREO-A-ის კოსმოსური თანამგზავრებიდან მიღებული დაკვირვებითი მონაცემი. მარცხენა სვეტში მოცემულია SDO/AIA-ს მიერ მიღებული დაკვირვებების ჯამური გამოსახულებები 21 ნოემბრის: UT 16:00 სთ, UT 18:00 სთ და UT 20:00 სთ-ზე. შავი მართკუთხედით მითითებულია წვიმის წვეთების ვარდნის არე, რაც ნაჩვენებია 4.6 ნახაზზე. დაშტრიხული მრუდი წარმოადგენს წვეთების ვარდნის ტრაექტორიას, ხოლო ისრით მითითებულია წვეთების დაცემის არე. ნახაზის მარჯვენა სვეტში წარმოდგენილია

STEREO-A/EUVI-იდან მიღებული გამოსახულებები 304 Å ხაზში. მარჯვენა სვეტის ზედა, შუა და ქვედა ჩარჩოები შეესაბამება 21 ნოემბრის: UT 15:56 სთ, UT 17:56 სთ და UT 19:56 სთ დროებს.

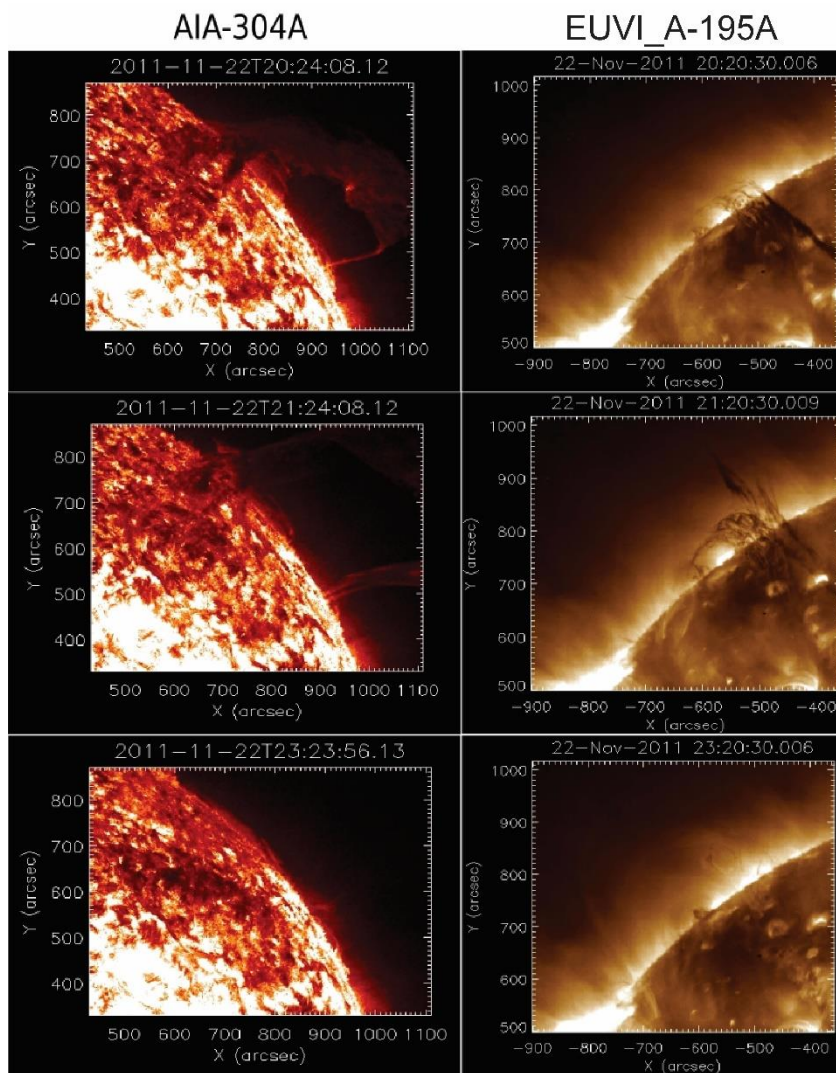
4.5 ნახაზზე ისრით მითითებული არეები, წარმოადგენენ კორონული წვიმის წვეთების ვარდნის ადგილებს. დაცემის ადგილების განათებულობა შეიძლება შემდეგნაირად აიხსნას, კორონული წვიმის წვეთები ვარდნამდე ცხელდებიან კორონაში ან დაცემისას ქრომოსფეროსთან შეჯახებისას აცხელებენ მას.



ნახაზი 4.6. კონკრეტული ერთი წვეთის ვარდნის ტრაექტორია, ჩარჩოები წარმოადგენილია 4.5 ნახაზზე მარცხენა ზედა გამოსახულებაზე დატანილი მართკუთხედის საზღვრების შესაბამისად. კორონული წვიმის წვეთის დინამიკა 30 წუთიანი დროის ინტერვალში (თითოეული ჩარჩოს შორის განსხვავება 6 წთ-ია). მარჯვენა და მარცხენა სვეტები წარმოადგენს SDO/AIA-ს მიერ 304 Å

და 171 Å ხაზში მიღებული გამოსახულებების ერთობლიობას. ისრით მითითებულია წვეთის მდებარეობა დროის მოცემულ მონაკვეთში.

4.6 ნახაზზე ჩვენ წარმოვადგინეთ 30 წუთიანი დროის ინტერვალში კონკრეტული ერთი წვეთის ვარდნის დინამიკა. 4.6 ნახაზზე წარმოდგენილი ჩარჩოები ემთხვევა 4.5 ნახაზის ზედა მარცხენა ჩარჩოზე წარმოდგენილ მართკუთხედის საზღვრებს. ისრით ნახაზზე მითითებულია წვეთის მდებარეობა დროის მოცემულ მონაკვეთში. წვეთის ვარდნა 40 კმ/წმ საშუალო სიჩქარით 70 მგმ-იდან დაიწყო.

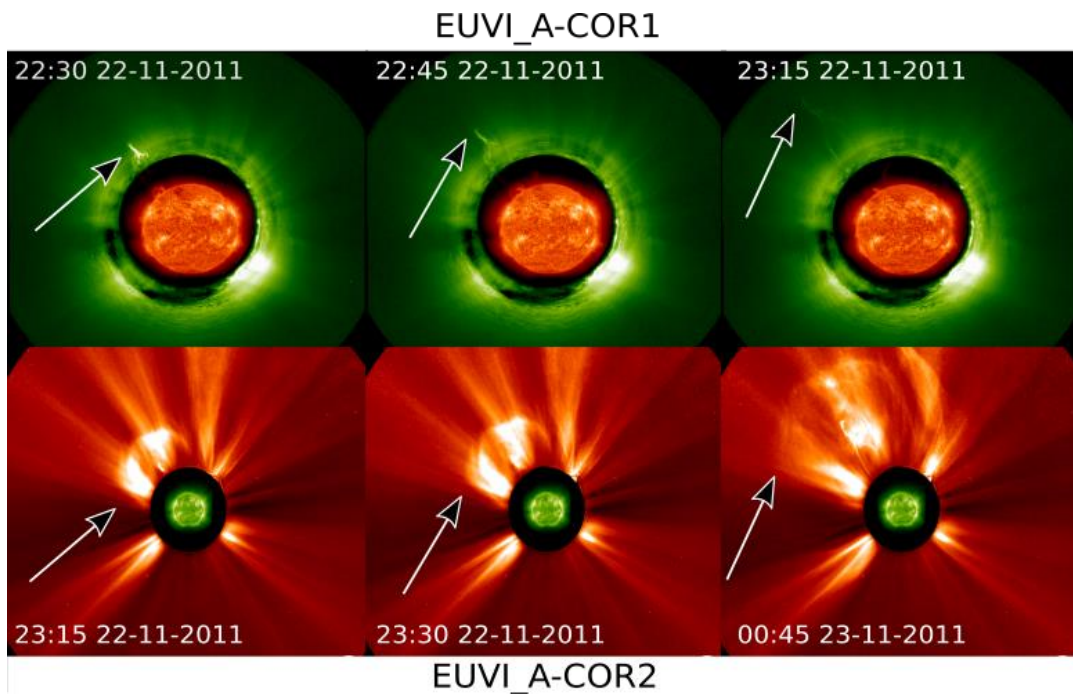


ნახაზი 4.7. კორონული წვიმის შედეგად გამოწვეული პროტუბერანცის არამდგრადობა (წონასწორობის დარღვევა) და ამოფრქვევა. მარცხენა სვეტი გვიჩვენებს SDO/AIA-ს მიერ 304 Å

ხაზში მიღებულ სამ სხვადასხვა გამოსახულებას: ზედა, შუა და ქვედა გამოსახულებები შეესაბამება 22 ნოემბრის: UT 20:24 სთ, UT 21:24 სთ და UT 22:24 სთ დროებს. მარჯვენა სვეტი გვიჩვენებს STEREO-A-ს მიერ 195 Å-ში მიღებულ გამოსახულებებს.

დაახლოებით 30 საათიანი კორონული წვიმის (მასის კარგვის) შემდეგ, პროტუბერანცი გახდა არასტაბილური. 4.7 ნახაზზე გამოსახულია, SDO და STEREO-A-ის მიერ მიღებული დაკვირვებითი მონაცემის საფუძველზე, პროტუბერანცის დინამიკა 2011 წლის 22 ნოემბრის UT 20:00 სთ-დან UT 24:00 სთ-მდე. ზევით ასული პლაზმის ხარჯზე შეგვიძლია ვთქვათ რომ, პროტუბერანცის არამდგრადობა დაიწყო UT 20:20 სთ-ზე (ზედა ჩარჩო ნახ. 4.7). ერთი საათის შემდეგ (შუა ჩარჩო ნახ. 4.7) პროტუბერანცი საკმაოდ ავიდა ზევით. დაახლოებით UT 23:30 სთ-ზე პროტუბერანცი აღარ დაიკვირვებოდა AIA-ს და EUVI-ის სპექტრულ ხაზებში (ქვედა ჩარჩო ნახ. 4.7), შესაბამისათ შეგვიძლია ვთქვათ რომ პროტუბერანცი ამოიფრქვა CME-ის სახით.

კორონის სპექტრული ხაზებიდან პროტუბერანცის გაქრობის შემდგომ, ის კორონული მასის ამოფრქვევის (CME) სახით გამოჩნდა STEREO-A-ს კორონოგრაფის ხილული სინათლის გამონასახებზე. 4.8 ნახაზი აჩვენებს STEREO-A-ს მიერ დაკვირვებულ CME-ის დინამიკას გარე კორონაში.



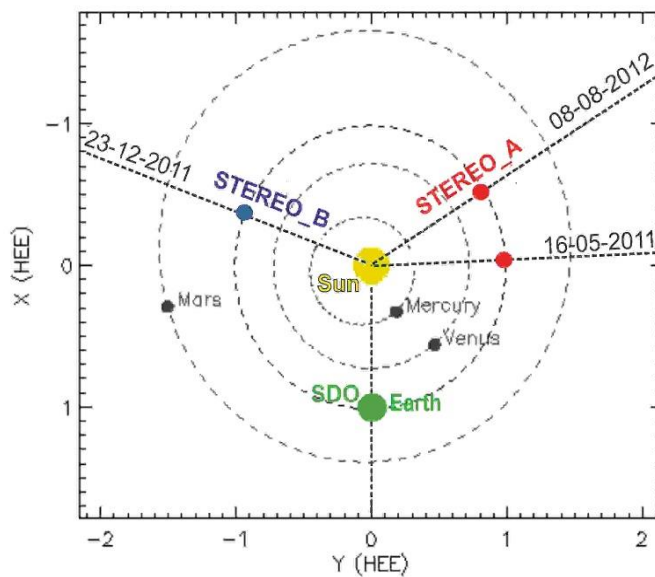
ნახაზი 4.8. STEREO-A-ს თანამგზავრიდან მიღებული CME-ის ამოფრქვევის გამოსახულება. ზედა ჩარჩოები წარმოადგენს STEREO-A-ს კორონოგრაფის COR1-ის დაკვირვებით მიღებულ CME-ის სამ თანმიმდევრულ გამოსახულებას. გამოსახულებების ცენტრში წარმოდგენილია მზის გამოსახულება EUVI-A-ს 304 Å სპექტრულ ხაზში. ისარი მიუთითებს კორონული მასის ამოფრქვევის მდებარეობას. თავდაპირველად CME გამოჩნდა COR1-ის გამოსახულებებში 22 ნოემბერს UT 22:30 სთ-ზე (ზედა მარცხენა ჩარჩო) და გაქრა UT 23:15 სთ-ზე (ზედა მარცხენა ჩარჩო). ქვედა ჩარჩოები წარმოადგენს CME-ის დროით ევოლუციას STEREO-A-ს COR2-ის კორონოგრაფის გამოსახულებებში. სურათის ცენტრებში ქვედა ჩარჩოებზე წარმოდგენილია მზის გამოსახულება EUVI-A-ს 195 Å ხაზში.

STEREO-A-ს კორონოგრაფი COR1 აკვირდება 1.5 – 4 მზის რადიუსის არეს ხილულ სინათლეში, ხოლო COR2 აკვირდება მზის ცენტრიდან 2 – 15 მზის რადიუსის ტოლ არეს. კორონის ქვედა დონიდან პროტუბერანცის ზევით ასვლის შემდეგ ერთ საათში UT 22:30 სთ-ზე COR1 კორონოგრაფში გამოჩნდა CME. კორონული მასის ამოფრქვევის საშუალო სიჩქარე შეადგენდა 200 კმ/წმ-ს.

4.2. მასიური კორონული წვიმით გამოწვეული პროტუბერანცის არამდგრადობა და CME

ჩვენს მიერ შესწავლილი კორონული წვიმის კავშირი პროტუბერანცის არამდგრადობასთან თანმდევი CME-ით, საჭიროებდა მეტი დაკვირვებითი მონაცემის ანალიზს. რისთვისაც ჩვენ ანალიზი ჩავუტარეთ 2011-2012 წლებში SDO და STEREO-ს კოსმოსური თანამგზავრებით დაკვირვებულ სამ სხვადასხვა პროტუბერანცს. სამივე შემთხვევაში პროტუბერანციდან მასიურ კორონულ წვიმას, თან მოყვა პროტუბერანცის არამდგრადობა და CME-ის ამოფრქვევა.

SDO და STEREO კოსმოსური თანამგზავრების განლაგება, თითოეული მოვლენის სხვადასხვა კუთხით დაკვირვების და არჩეული პროტუბერანცის სტრუქტურის დინამიკის შესწავლის შესაძლებლობას გვაძლევდა. პირველი (2011 წლის 16-18 მაისი) და მესამე (2012 წლის, 07-08 აგვისტო) მოვლენა დაიკვირვებოდა SDO და STEREO_A თანამგზავრებიდან, რომელთა შორის კუთხე შესაბამისად $+93^\circ$ და $+122^\circ$ იყო. ხოლო მეორე მოვლენა (2011 წლის 22-24 დეკემბერი) - SDO და STEREO_B-ს თანამგზავრებიდან, რომელთა შორის კუთხე -110° იყო (იხ. ნახაზი 4.9).



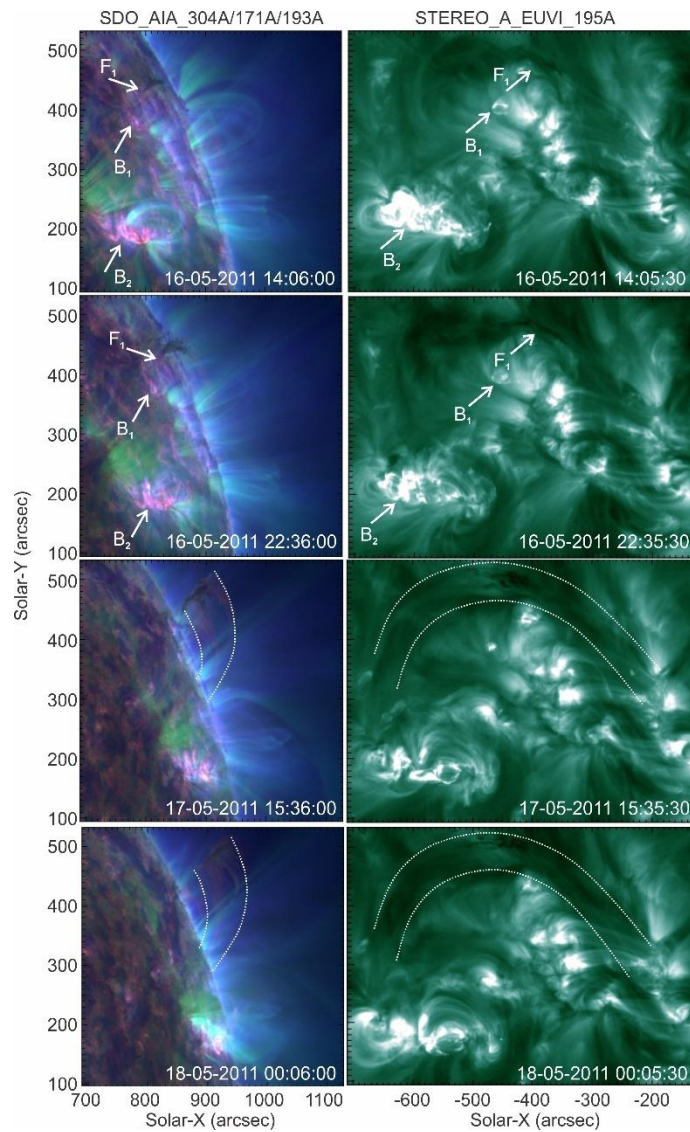
ნახაზი 4.9. კოსმოსში თანამგზავრების მდებარეობა დაკვირვებული მოვლენების დროს.

ჩვენ ცალ-ცალკე შევისწავლეთ თითოეული მოვლენის დაკვირვებითი მონაცემი და მოვახდინეთ მათი ანალიზი.

4.2.1. 2011 წლის 16-18 მაისის მოვლენა

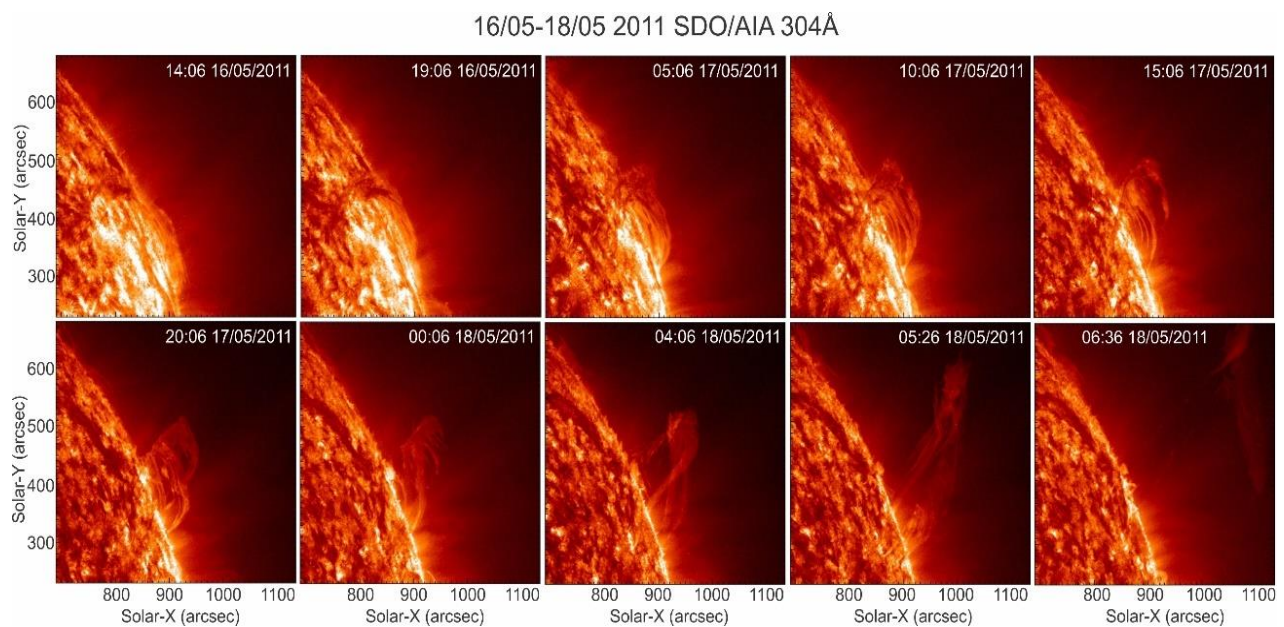
2011 წლის 16 მაისს SDO და STEREO-A კოსმოსურ თანამგზავრებს შორის კუთხე წარმოადგენდა 93° -ს, რაც ნიშნავს იმას რომ SDO-დან მიღებული გამოსახულებებზე მზის აღმოსავლეთ კიდე STEREO-A-დან მიღებულ გამონასახებზე -3° -იან გრძედზე მდებარეობდა. თავდაპირველად პროტუბერანცი გამოჩნდა მზის აღმოსავლეთ კიდეზე 2011 წლის 16 მაისის UT 05:00 სთ-ზე. ამავდროულად იგი დაიკვირვებოდა STEREO-A-ს გამოსახულებებზე მზის დასავლეთ კიდეზე. 4.10 ნახაზზე წარმოდგენილია პროტუბერანცის ევოლუცია 2011 წლის 16 მაისის UT 14:06 სთ-დან და 2011 წლის 18 მაისის UT 00:06 სთ-მდე, SDO და STEREO-A კოსმოსური თანამგზავრების მიღებული დაკვირვებითი მონაცემების საფუძველზე. 4.10 ნახაზის მარცხენა მხარეს მოცემულია SDO/AIA-ს ჯამური გამოსახულებები, ხოლო მარჯვენა მხარეს - STEREO-A/EUVI-იდან მიღებული გამოსახულება $195 \text{ \AA}$ ხაზში.

ტორნადოს მსგავსმა სტრუქტურამ ზევით ასვლა 2011 წლის 16 მაისის UT 05:00 სთ-ზე დაიწყო (იხ. F_1 -ით აღნიშნული წერტილი 4.10 ნახაზზე). უკეთ იდენტიფიცირებისთვის, ორივე კოსმოსური თანამგზავრიდან მიღებულ გამოსახულებებზე მოვნიშნეთ საერთო წერტილები (იხ. B_1 და B_2 -ით აღნიშნული წერტილები 4.10 ნახაზზე).



ნახაზი 4.10. პროტუბერანცის ევოლუცია 2011 წლის 16 მაისის UT 14:06 სთ-დან და 2011 წლის 18 მაისის UT 00:06 სთ-მდე (SDO და STEREO-A კოსმოსური თანამგზავრების ერთობლივი დაკვირვება). მარცხენა მხარე წარმოადგენს SDO/AIA-დან მიღებული 304 Å, 171 Å და 193 Å გამოსახულებების ჯამურ სურათს. მარჯვენა მხარეს ნაჩვენებია STEREO-A/EUVI-დან მიღებული გამოსახულება 195 Å ხაზში. თეთრი ისარი მიუთითებს ერთიდაიმავე წერტილის მდებარეობას სხვადასხვა თანამგზავრიდან გადაღებულ სურათებზე. F_1 -ით აღნიშნულია ტორნადოს მსგავსი სტრუქტურის საწყისი, ხოლო B_1 და B_2 -ით მიითითებულია აქტიური არის ერთიდაიგივე წერტილები. თეთრი წყვეტილი მრუდით მოცემულია პროტუბერანცის დაახლოებითი საზღვრები.

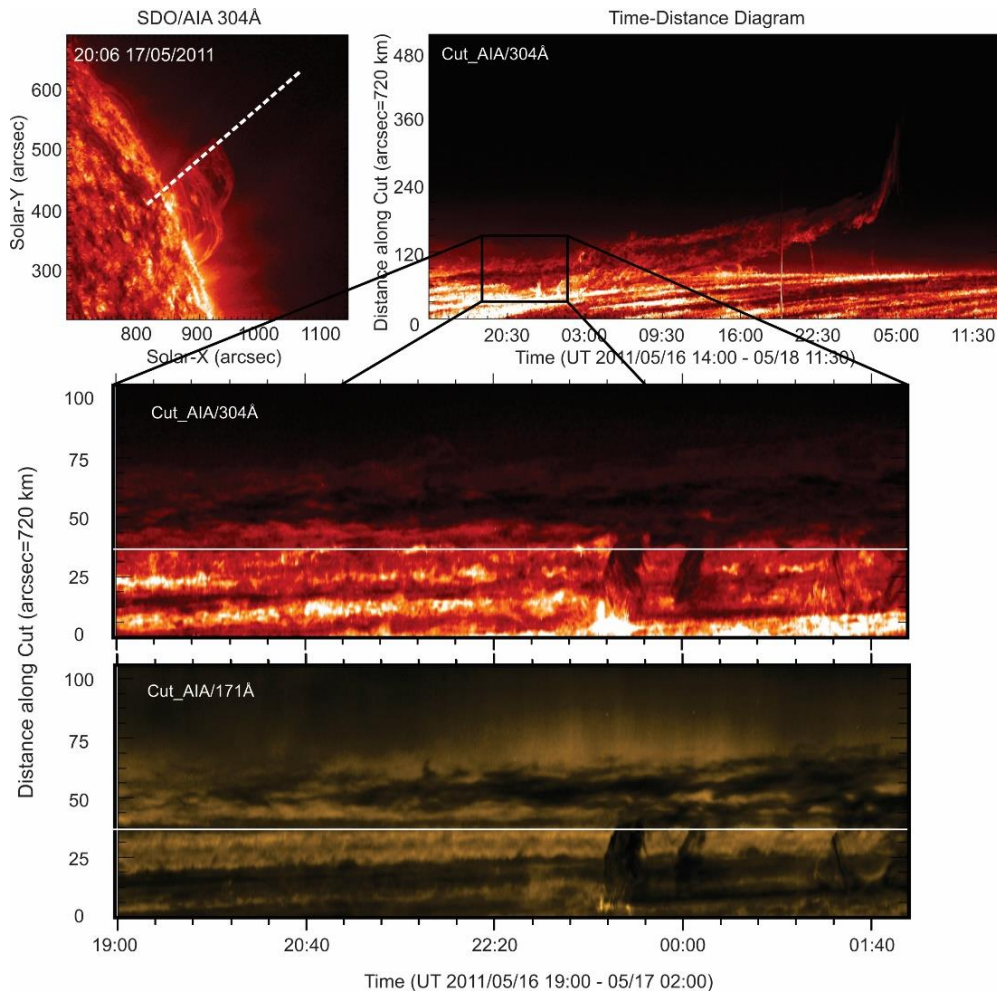
4.11 ნახაზზე ჩვენ წარმოვადგინეთ SDO/AIA-ს მიერ 304 Å ხაზში UT 14:06 სთ-დან (2011 წლის 16 მაისი) UT 06:36 სთ-მდე (2011 წლის 18 მაისი) მიღებული დაკვირვებების საფუძველზე პროტუბერანცის ევოლუციის პროცესის ამსახველი გამოსახულებების ერთობლიობა. პროტუბერანციდან მასიური კორონული წვიმა დაიწყო 2011 წლის 16 მაისის UT 22:00 სთ-ზე და დამთავრდა 2011 წლის 18 მაისის UT 02:00 სთ-ზე. თითქმის 28 საათიანი კორონული წვიმის შედეგად, პროტუბერანცი გახდა არასტაბილური და ამოიფრქვა CME-ის სახით 2011 წლის 18 მაისს.



ნახაზი 4.11. 2011 წლის 16 მაისის UT 14:06 სთ-დან - 2011 წლის 18 მაისის UT 06:36 სთ-მდე SDO/AIA-ს მიერ 304 Å ხაზში დაკვირვებული პროტუბერანცის ევოლუცია.

პროტუბერანცის დინამიკის უკეთ შესასწავლად გამოვიყენეთ ვერტიკალური სივრცე-დროითი ქრილი (იხ. ნახაზი 4.12). თეთრი წყვეტილი ზოლით 4.12 ნახაზზე წარმოდგენილია ვერტიკალური მდებარეობა, რომლის გასწვრივაც მოხდა დროში ჭრა. ნახაზის ზედა მარჯვენა მხარეს წარმოდგენილია სივრცე-დროითი ქრილი პროტუბერანცის ევოლუციის მთელი დროის განმავლობაში. თვალსაჩინოა რომ მთელი პროცესი იყოფა ორ ფაზად: ნელი ასვლის ფაზა (2011 წლის 17 მაისის 03:00 UT-დან 18

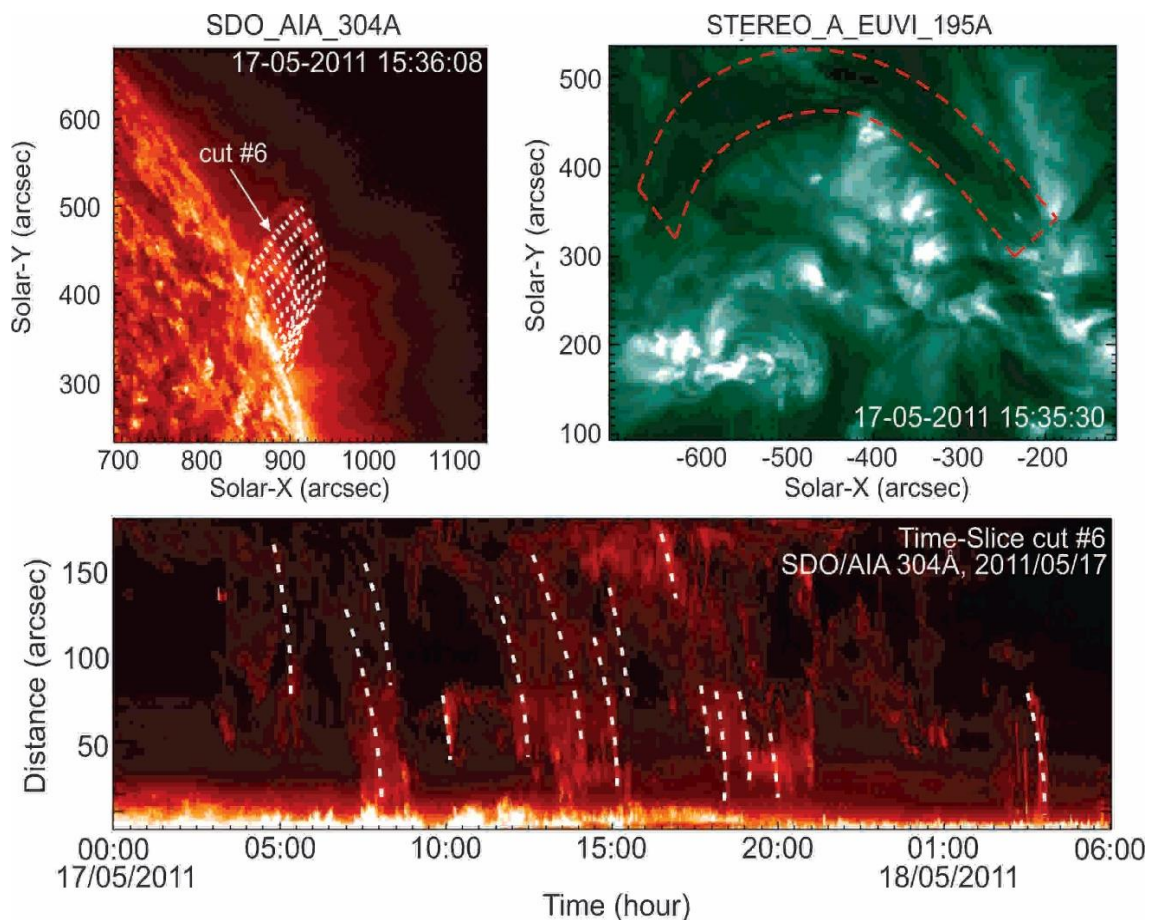
მაისის 04:00 UT-მდე) და სწრაფი ასვლის ფაზა (18 მაისის 04:00 UT-დან). სწრაფი ფაზა წარმოდგენილია პროტუბერანცის დესტაბილიზაციით და თანმდევი CME-ს ამოფრქვევით. ნელი ასვლის ფაზა დიდი ალბათობით დაკავშირებულია კორონული წვიმით გამოწვეულ მასის ნელ კარგვასთან.



ნახაზი 4.12. პროტუბერანცის ევოლუციის სივრცე-დროითი დიაგრამა 304 Å სპექტრულ ხაზში 2011 წლის 16 მაისის 14:00 UT-დან 2011 წლის 18 მაისის 11:30 UT-მდე (ზედა მარჯვენა მხარე). ჭრილის მდებარეობა მოცემულია თეთრი წყვეტილი ხაზით ზედა მარცხენა მხარეს. შუა და ქვედა ნაწილებში წარმოდგენილია 19:00 UT (16 მაისი) – 02:00 UT (17 მაისი) დროითი ინტერვალი 304 Å და 171 Å სპექტრულ ხაზებში.

კორონული წვიმის შესასწავლად, SDO-ს გამოსახულებებიდან, ხილული ტრაექტორიის გასწვრივ ვარდნილ წვეთებს ჩავუტარეთ ანალიზი. ჩვენ მოვახდინეთ 12 ხილული ტრაექტორიის იდენტიფიცირება, რომელიც 4.13 ნახაზის მარცხენა ზედა კუთხეში

თეთრი წყვეტილი მრუდებით არის წარმოდგენილი. ჩვენ მოვახდინეთ თითოეული ხილული ტრაექტორიის სივრცე-დროითი დიაგრამების ანალიზი. 4.13 ნახაზის ქვედა მხარეს წარმოდგენილია ხილული ტრაექტორიის სივრცე-დროითი დიაგრამის ერთი კონკრეტული მაგალითი (იხ. თეთრი ისრით მითითებული მე-6 ტრაექტორია 4.13 ნახაზის ზედა მარცხენა მხარეს). ჩვენ კვადრატული პოლინომიალით აპროქსიმაცია ჩავუტარეთ ვარდნილი წვეთების ტრაექტორიებს (ნახაზი 4.13 თეთრი წყვეტილი მრუდები ქვედა მხარეს). მიღებული საშუალო სიჩქარე წარმოადგენდა $v = 23.5$ კმ/წმ, ხოლო აჩქარება გაცილებით პატარა იყო ვიდრე მზეზე თავისუფალი ვარდნის აჩქარება.

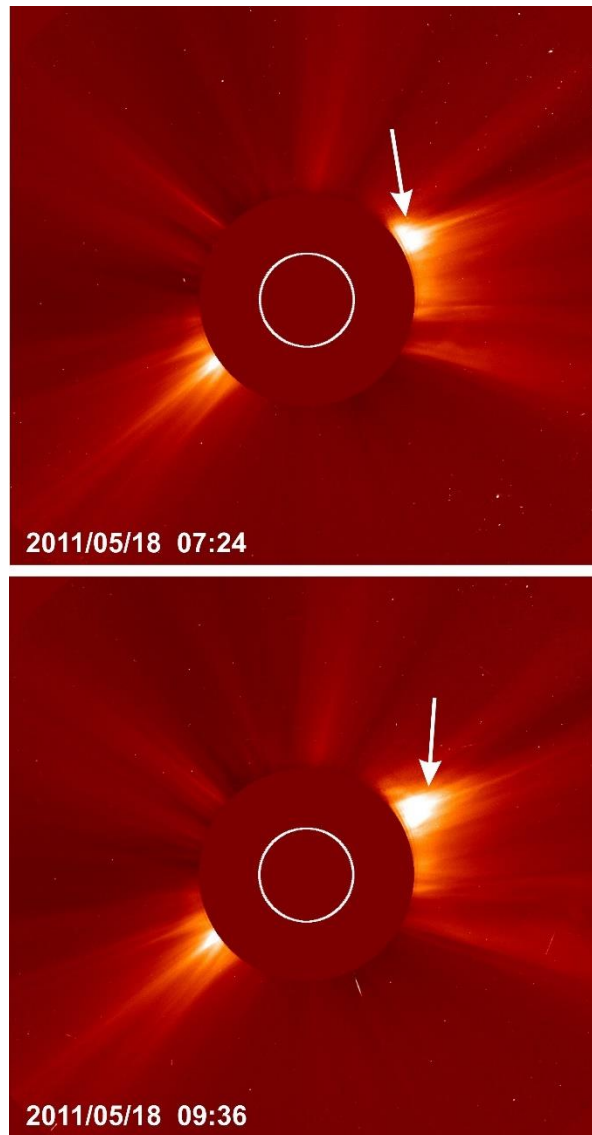


ნახაზი 4.13. ნახაზის ზედა მარცხენა მხარეს წარმოდგენილია ვარდნილი პლაზმის 12 ხილული ტრაექტორია თეთრი წერტილოვანი მრუდით. ნახაზის ზედა მარჯვენა კუთხეში წარმოდგენილია STEREO_A/EUVI თანამგზავრიდან 195 Å სპექტრულ ხაზში მიღებულ პროტუბერანცის მილის გამოსახულებას (წითელი წყვეტილი მრუდი).

როგორც ვიცით პროტუბერანცის წონასწორობა გამოწვეულია ლორენცის ძალის და გრავიტაციული ძალის ბალანსით. აშკარაა რომ კორონული წვიმის შედეგად პროტუბერანცმა დაკარგა მასის დიდი ნაწილი. აქედან გამომდინარე მასის შემცირებამ გამოიწვია წონასწორობის დარღვევა და დაკვირვებული პროტუბერანცის ზევით ასვლა. დაახლოებით 28 საათიანი კორონული წვიმის შემდეგ, ჩვენს მიერ მოხდა პროტუბერანცის მასის დანაკარგის შეფასება. ჩვენს მიერ იდენტიფიცირებული 12 ხილული ტრაექტორიის საერთო სიგანე წარმოადგენდა 12 პიქსელს, რაც დაახლოებით 0.687×10^9 სმ-ია (SDO/AIA-ს ერთი პიქსელი 720 კმ-ია). თუ სიგანეს განვიხილავთ როგორც მაგნიტური მილის დიამეტრს, მაშინ შეგვიძლია ვთქვათ რომ კორონული წვიმის წვეთები 0.59×10^{18} სმ²-ის ფართობში ვარდებოდა. პროტუბერანცებისთვის დამახასიათებელი $n_e = 10^{10}$ სმ³ ელექტრონული სიმკვრივის გამოყენებით, შეგვიძლია შევაფასოთ პროტუბერანცის სიმკვრივე, რომელიც კონკრეტულ შემთხვევაში წარმოადგენდა $\rho = 1.67 \times 10^{-14}$ გ/სმ³. $v = 23.5$ კმ/წმ საშუალო სიჩქარით 2.32×10^9 გ/წმ ნაკადში 28 საათიანი კორონული წვიმის შედეგად პროტუბერანცმა დაკარგა 2.34×10^{15} გ. მასა.

SDO და STEREO-A კოსმოსური თანამგზავრების ერთდროულმა დაკვირვებამ საშუალება მოგვცა შეგვეფასებინა პროტუბერანცის მოცულობა. STEREO-ს დაკვირვებითი მონაცემებიდან პროტუბერანცის სიგრძე წარმოადგენდა 500 პიქსელს, რაც თანამგზავრის სივრცული გარჩევის გათვალისწინებით გვაძლევს 5.76×10^{10} სმ-ს (იხ. წითელი დაშტრიხული არე 4.13 ნახაზის ზედა მარჯვენა გამოსახულებაზე). საშუალო ნახევარსიგანე დაახლოებით 30 პიქსელს წარმოადგენდა, რაც 2.16×10^9 სმ-ია. აქედან გამომდინარე პროტუბერანცის საერთო მოცულობა წარმოადგენს 1.47×10^{19} სმ³-ს, რაც საერთო მასის (1.4×10^{16} გ.) შეფასების საშუალებას გვაძლევს. საერთო და დაკარგული მასის შეფასებებმა გვაჩვენა, რომ პროტუბერანცმა, კორონული წვიმის შედეგად, დაკარგა თავისი მასის 17%-ი. თუმცა ჩვენ ავლნიშნავთ, რომ ეს დანაკარგი შეფასებულია პროტუბერანცის მხოლოდ ერთი ფეხის გასწვრივ. თუ დავუშვებთ რომ პროტუბერანცის მეორე ფეხის გასწვრივაც მსგავსი მასის კარგვა მიმდინარეობს, მაშინ შეგვიძლია ვთქვათ რომ მთლიანად ორივე საყრდენში ერთად მასის 34% იკარგება.

ამოფრქვევის შემდეგ პროტუბერანცი 304 Å სპექტრულ ხაზიდან გაუჩინარდა და გამოჩნდა როგორც CME კოსმოსური თანამგზავრი SOHO-ს ინსტრუმენტის LASCO-ს უწყვეტი სინათლის გამონასახებში.



ნახაზი 4.14. პროტუბერანცის არასტაბილურობის შედეგად ამოფრქვეული CME. თეთრი ისრით მოცემულია CME-ის მდებარეობა 2011 წლის 18 მაისის UT 07:24-09:39 სთ. დროით შუალედში. LASCO/C2-ი აკვირდება 2.1-6 მზის რადიუსის ტოლ არეს უწყვეტ-თეთრ გამონასახებში.

4.14 ნახაზზე ნაჩვენებია LASCO/C2-ის მიერ დაფიქსირებული CME-ის დინამიკა კორონაში. LASCO/C2-ი მოიცავს 2.1-6 მზის რადიუსის ტოლ არეს. LASCO CME-ის

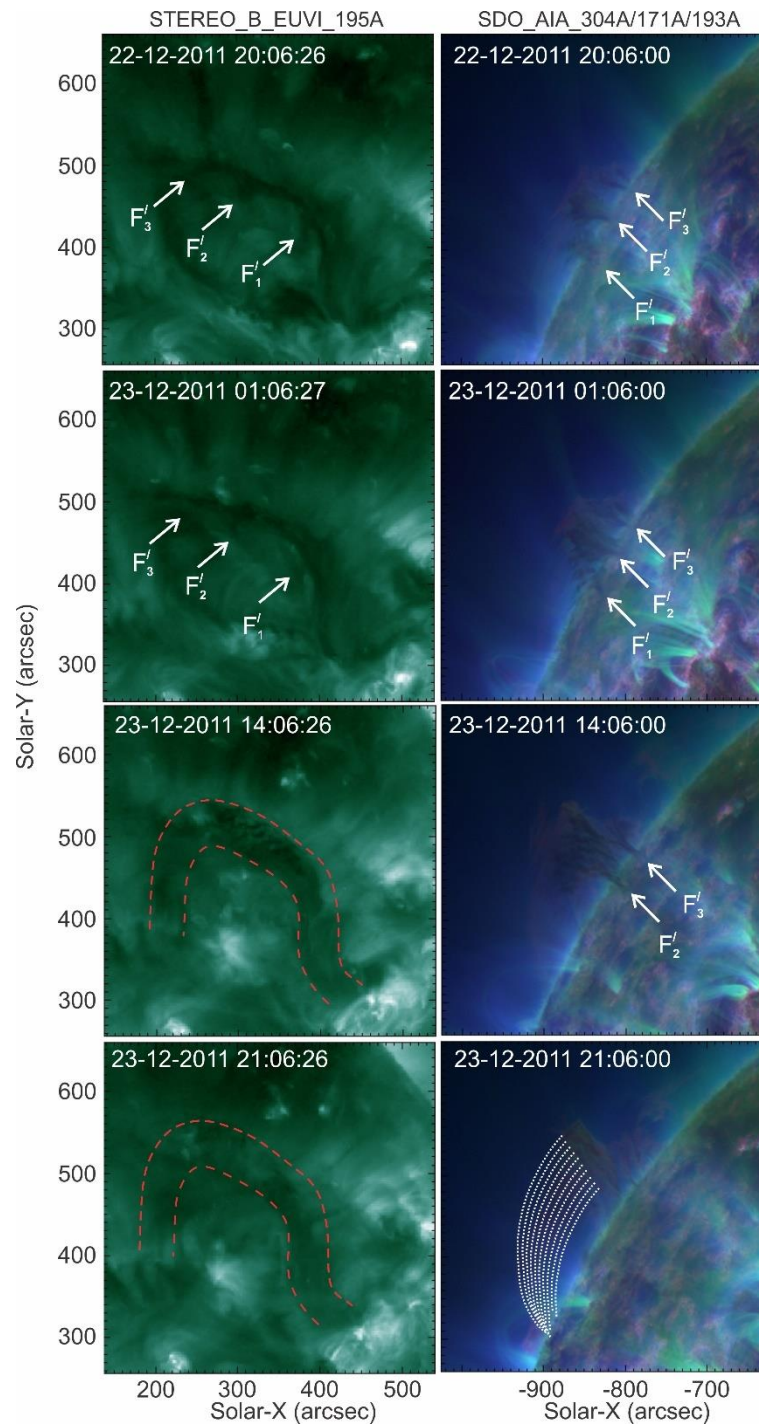
კატალოგზე დაყრდნობით (Yashiro et al. 2004), კორონული მასის ამოფრქვევა პირველად 141 კმ/წმ საშუალო სიჩქარით დაფიქსირდა 2011 წლის 18 მაისის UT 07:00:05 სთ-ზე. CME-ი 36°-იანი კუთხური სიგანით გამოჩნდა მზის ჩრდილო-აღმოსავლეთ კიდეზე (ნახაზი 4.14).

4.2.2. 2011 წლის 22-24 დეკემბრის მოვლენა

ჩვენს მიერ შესწავლილი კიდევ ერთი საინტერესო მოვლენა 2011 წლის 22 დეკემბერს SDO-ს თანამგზავრიდან დაიკვირვებოდა მზის დასავლეთ კიდეზე. ამავდროულად STEREO-B-ს თანამგზავრიდან - მზის დისკზე აღმოსავლეთ კიდეგან ახლოს. 4.15 ნახაზზე წარმოდგენილია STEREO-B/EUVI-ის თანამგზავრიდან 195 Å ხაზში (მარცხენა სვეტი) და SDO/AIA-ს თანამგზავრიდან მიღებული სხვადასხვა სპექტრული ხაზების ჯამური (მარჯვენა სვეტი) გამოსახულებები, 2011 წლის 22 დეკემბრის UT 20:06 სთ და 2011 წლის 23 დეკემბრის UT 21:06 სთ დროით შუალედში.

4.15. ნახაზის ქვედა გამოსახულებებზე წითელი დაშტრიხული მრუდით მონიშნულია პროტუბერანცის სავარაუდო საზღვრები. ჩვენ მოვახდინეთ პლაზმის ვარდნის 10 ხილული ტრაექტორიის იდენტიფიცირება, რომლებიც ნაჩვენებია თეთრი წერტილოვანი მრუდებით 4.15 ნახაზის ქვედა მარჯვენა გამოსახულებაზე.

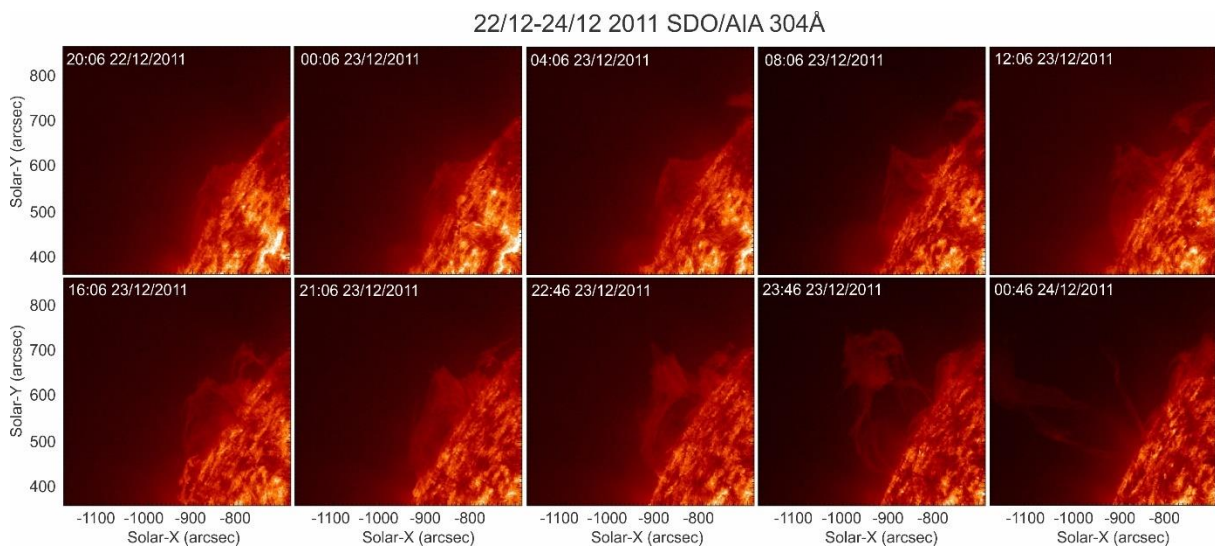
4.16. ნახაზზე ნაჩვენებია UT 20:06 სთ-დან (2011 წლის 22 დეკემბერი) UT 00:46 სთ-მდე (2011 წლის 23 დეკემბერი) SDO/AIA-ს 304 Å ხაზში დაკვირვებითი მონაცემების საშუალებით მიღებული პროტუბერანცის ევოლუციის გამოსახულება. პროტუბერანციდან მასიური კორონული წვიმა დაიწყო 2011 წლის 22 დეკემბრის UT 20:00 სთ-ზე და გაგრძელდა 2011 წლის 23 დეკემბრის UT 21:45 სთ-მდე, თითქმის 26 საათი. წვიმის ხანგრძლიობა წინა შემთხვევის მსგავსია. კორონული წვიმის შემდეგ პროტუბერანცი გახდა არასტაბილური და საბოლოოდ ამოიფრქვა 2011 წლის 24 დეკემბერს.



ნახაზი 4.15. SDO და STEREO-B თანამგზავრებიდან დაკვირვებული პროტუბერანცის ევოლუცია 2011 წლის 22 დეკემბრის UT 20:06 სთ-დან 2011 წლის 23 დეკემბრის UT 21:06 სთ-მდე. მარჯვენა სვეტში წარმოდგენილია SDO-დან 304 Å, 171 Å და 193 Å სპექტრულ ხაზში მიღებული დაკვირვებების ჯამური გამოსახულება, ხოლო მარცხენა სვეტში - STEREO-B თანამგზავრებიდან 195 Å სპექტრულ ხაზში მიღებული გამოსახულებები. F'_1 , F'_2 და F'_3 წერტილები წარმოადგენს პროტუბერანცის საყრდენებს ორივე გამოსახულებაზე. წითელი დამტრიახული მრუდით

წარმოდგენილია პროტუბერანცის სავარაუდო საზღვრები, ხოლო თეთრი წერტილოვანი მრუდით კორონული წვიმის წვეთების ვარდნის ტრაექტორიები.

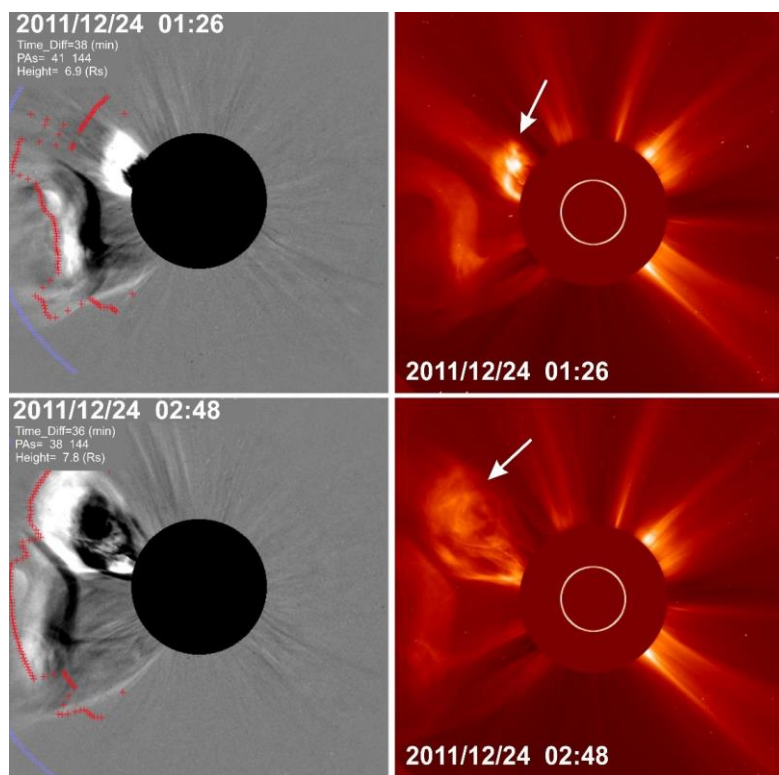
როგორც წინა შემთხვევაში (იხ. 4.2.1 ქვეთავი) ჩვენ კვადრატული პოლინომიალით აპროქსიმაცია ჩავუტარეთ წვეთების ვარდნის ხილულ ტრაექტორიებს და წვეთის ვარდნის საშუალო სიჩქარე $\bar{v} = 52.6$ კმ/წმ-ის ტოლი მივიღეთ. კორონული წვიმის წვეთის ვარდნის აჩქარება კვლავ მცირე იყო მზეზე თავისუფალი ვარდნის აჩქარების მნიშვნელობაზე. ჩვენს მიერ იდენტიფიცირებული 10 ხილული ტრაექტორიის საერთო სიგანე წარმოადგენდა 10 პიქსელს, რაც დაახლოებით 7.2×10^8 სმ-ია (SDO/AIA-ს ერთი პიქსელი 720 კმ-ია), კორონული წვიმის წვეთების ვარდნის 4.08×10^{17} სმ²-ს ტოლ ფართობთან ერთად. რაც პროტუბერანცის ერთი საყრდენის გასწვრივ გვაძლევს 3.58×10^{10} გ/წმ მასის ვარდნის ნაკადს. 26 საათიანი წვიმის შედეგად კი საბოლოო ჯამში გვაქვს პროტუბერანცის 3.35×10^{15} გ. მასის კარგვა.



ნახაზი 4.16. SDO/AIA-ს მიერ 2011 წლის 22 დეკემბრის UT 20:06 სთ-დან - 2011 წლის 24 დეკემბრის UT 00:46 სთ-მდე დაკვირვებული პროტუბერანცის ევოლუციის გამოსახულება.

STEREO-B/EUVI-ის მიერ გადაღებული გამოსახულებებიდან განვსაზღვრეთ პროტუბერანცის სიგრძე და საშუალო სიგანე, როგორც 4×10^{10} სმ (იხ. წითელი

დაშტრიხული არე 3.15 ნახაზის ქვედა მარცხენა მხარეს) და 5.76×10^9 სმ-ი (3.15 ნახაზის ქვედა მარცხენა მხარე), რაც საბოლოო ჯამში $\sim 1.05 \times 10^{30}$ სმ³-ის ტოლ მოცულობას გვაძლევდა. პროტუბერანცის საშუალო სიმკვრივის გამოყენებით (იხ. 4.2.1 ქვეთავი) ჩვენ შევძელით პროტუბერანცის მასის შეფასება, რაც დაახლოებით წარმოადგენდა 1.75×10^{16} გ-ს. აქედან გამომდინარე პროტუბერანცმა წვიმის სახით დაკარგა მასის 19% მანამ სანამ გახდებოდა არასტაბილური. თუ კვლავ განვიხილავთ მასის სიმეტრიულ ვარდნას პროტუბერანცის ორივე საყრდენის სასწვრივ მივიღებთ მასის 38%-იან კარგვას.

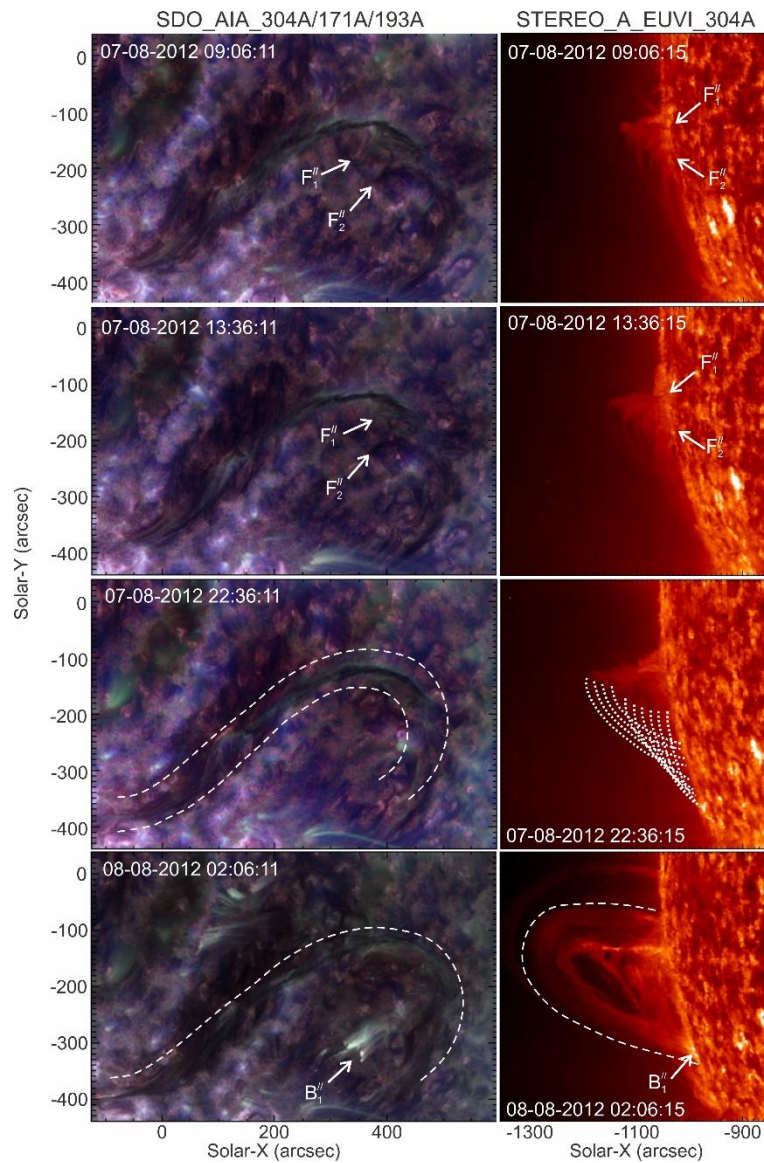


ნახაზი 4.17. SOHO/LASCO-C2-დან დანახული CME-ის ამოფრქვევა პროტუბერანცის არასტაბილურობის შემდეგ. მარცხენა მხარეს წარმოდგენილია დროითი სხვაობის გამოსახულებები (36 წთ-იანი დროითი სხვაობა). ლურჯი ზოლი მიუთითებს წინა კიდის პოზიციას, ხოლო წითელი ზოლი წინა კიდის რიცხვითად მიღებულ მიახლოებით კონტურს. მარჯვენა მხარეს წარმოდგენილია LASCO-C2 კორონოგრაფიდან მიღებული გამოსახულებები. თეთრი ისარი მიუთითებს CME-ის მდებარეობას. გამოსახულებები აჩვენებენ 2011 წლის 24 დეკემბრის UT 01:26-02:48 სთ დროით შუალედს.

ამოფრქვევის შემდეგ, პროტუბერანცი CME-ის სახით გამოჩნდა LASCO/C2 კორონოგრაფის მხედველობის არეში 2011 წლის 24 დეკემბრის UT 00:03:05 სთ-ზე 475 კმ/წმ საშუალო სიჩქარით. ნახაზი 4.17 გვიჩვენებს CME-ის დინამიკას გარე კორონაში. CME-ი გამოჩნდა მზის ჩრდილო-დასავლეთ კიდეზე 61° კუთხური სიგანით. ლურჯი ზოლი 4.17 ნახაზის მარცხენა მხარეს დროითი სხვაობის გამოსახულებებზე წარმოადგენს CME -ის საწყის ზღვრულ პოზიციას გარე კორონაში, ხოლო წითელი ზოლით მოცემულია წინა კიდის მიახლოებითი კონტური, რომელიც სეგმენტაციის ტექნიკის გამოყენებით შეიქმნა (Olmed at el. 2008), მზიდან 6.1 მზის რადიუსის ტოლ მანძილზე (სურათი ადებულია კოსმოსური ამინდის ლაბორატორიის პროექტის „მზის ამოფრქვევადი მოვლენების დეტექტირების სისტემიდან“ (SEEDS)).

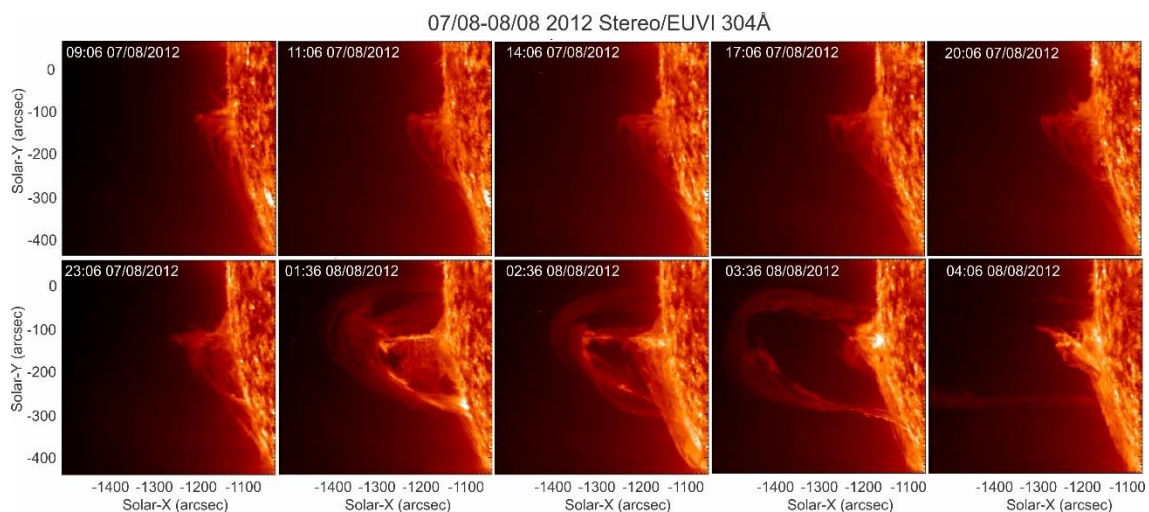
4.2.3. 2012 წლის 7 - 8 აგვისტოს მოვლენა

ჩვენ მიერ შესწავლილი კიდევ ერთი პროტუბერანცი 2012 წლის 07 აგვისტოს UT 09:06 სთ-ზე STEREO-A კოსმოსური თანამგზავრიდან, დაიკვირვებოდა მზის კიდის აღმოსავლეთ ნაწილში. ამავდროულად SDO-თანამგზავრიდან მოვლენა დაიკვირვებოდა მზის დისკოზე დასავლეთ კიდედან ახლოს. 4.18 ნახაზზე ჩვენ წარმოვადგინეთ პროტუბერანცი 2012 წლის 07 აგვისტოს UT 09:06 სთ-დან _ 08 აგვისტოს UT 02:06 სთ-მდე. თეთრი დაშტრიხული მრუდით, 4.18. ნახაზის ქვედა მარცხენა მხარეს, ჩვენ ვაჩვენებთ პროტუბერანცის მილის დაახლოებითი საზღვრები. ამ შემთხვევაში ჩვენ მოვახდინეთ ვარდნილი პლაზმის 10 ხილული ტრაექტორიის იდენტიფიცირება, რომელიც წარმოდგენილია 4.18 ნახაზის ქვედა მარჯვენა მხარეს თეთრი წერტილოვანი მრუდებით.



ნახაზი 4.18. პროტუბერანცის ევოლუცია 2012 წლის 7 აგვისტოს UT 09:06 სთ-დან 8 აგვისტოს UT 02:06 სთ-მდე. მარცხენა მხარე გვიჩვენებს SDO/AIA-ს თანამგზავრის მიერ 304 Å, 171 Å და 193 Å ტალღის სიგრძეში დაკვირვებული გამოსახულებების ჯამურ სურათს. მარჯვენა მხარე გვიჩვენებს STEREO-A/EUVI-ის დაკვირვებებს 304 Å ხაზში. თეთრი ისრებით ნაჩვენებია პროტუბერანცის საყრდენი წერტილები F_1'' და F_2'' ორივე კოსმოსური თანამგზავრის გამოსახულებებზე. თეთრი დაშტრიხული მრუდით აღნიშნულია პროტუბერანცის მილის სავარაუდო საზღვრები, ხოლო თეთრი წერტილოვანი მრუდები პლაზმის ვარდნის ხილულ ტრექტორიებს წარმოადგენს. B_1'' -ით ავლნიშნეთ წვეთის ვარდნის შედეგად მზის ზედაპირზე მიღებული განათებული წერტილი.

როგორც სხვა მოვლენების ანალიზის დროს, ამ შემთხვევაშიც ჩვენ წარმოვადგინეთ პროტუბერანცის ევოლუცია. 4.19 ნახაზზე მოცემული გამოსახულებები წარმოადგენს 2012 წლის 7 აგვისტოს UT 09:06 სთ-დან - 2012 წლის 8 აგვისტოს UT 04:06 სთ-მდე STEREO-A/EUVI-ის მიერ 304 Å ხაზში მიღებულ და დამუშავებულ დაკვირვებით მონაცემს. პროტუბერანციდან მასიური კორონული წვიმა დაიწყო UT 09:06 სთ-ზე (2012 წლის 7 აგვისტო) და გრძელდებოდა UT 04:06 სთ-მდე (2012 წლის 8 აგვისტო), დაახლოებით 18 საათი. როგორც დაკვირვებითი მონაცემიდან ჩანს ამ შემთხვევაში კორონული წვიმის ხანგრძლიობა შედარებით ნაკლებია ვიდრე ზევით განხილული წინა მოვლენების დროს. 2012 წლის 7 აგვისტოს კორონული წვიმის შედეგად პროტუბერანცი გახდა არასტაბილური და ამოიფრქვა CME-ის სახით 8 აგვისტოს.

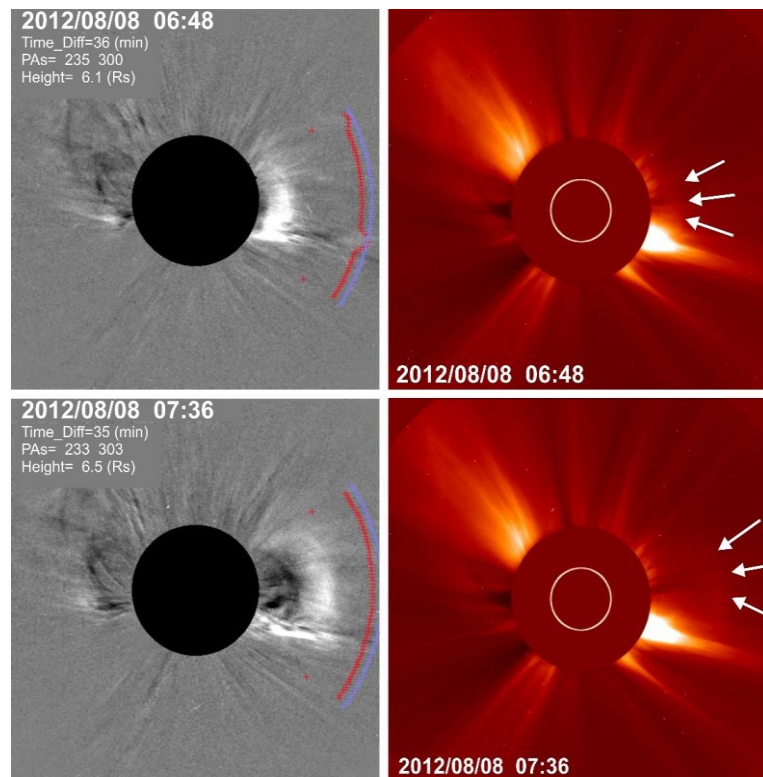


ნახაზი. 4.19. STEREO-A/EUVI-ის 304 Å ხაზში 2012 წლის 7 (UT 09:06 სთ) – 8 (UT 04:06 სთ) აგვისტოს დაკვირვებული პროტუბერანცის ევოლუცია თანმდევი ამოფრქვევით.

კორონული წვეთების საშუალო სიჩქარე წარმოადგენდა $v = 64$ კმ/წმ-ს. წვეთების ვარდნის 10 ხილული ტრაექტორიის მთლიანი სიგანე დაახლოებით 1.15×10^9 სმ-ს შეადგენდა, რაც კორონული წვიმის ვარდნის მილისთვის, 1.04×10^{18} სმ²-ის ტოლ განივი კვეთის ფართობს გვაძლევდა. ეს ყველაფერი, 1.11×10^{10} გ/წმ მასის ნაკადთან ერთად, წინ უძღოდა 18 საათის განმავლობაში 7.22×10^{15} გ. მასის კარგვას. პროტუბერანცის საშუალო

სიგრძე და ნახევარსიგანე შევაფასეთ SDO/AIA-დან მიღებულ გამოსახულებებზე, რომელიც შესაბამისად შეადგენდა $\sim 1.01 \times 10^{11}$ სმ (იხ. თეთრი დაშტრიხული არე 4.18 ნახაზის ქვედა მარცხენა მხარეს) და $\sim 2.88 \times 10^9$ სმ-ს (4.18. ნახაზი ქვედა მარცხენა მხარე). საბოლოო ჯამში პროტუბერანცის მასის (4.39×10^{16} გ.) შეფასებამ გვაჩვენა, რომ კორონული წვიმის შედეგად ერთი საყრდენის გასწვრივ მასის კარგვა წარმოადგენდა 17 %-ს.

ნახაზი 4.20 გვიჩვენებს LASCO/C2-ს მიერ დაკვირვებული CME-ის გამოსახულებებს გარე კორონაში, ასევე ნახაზზე წარმოდგენილია დროითი სხვაობის სურათები. C2 კორონოგრაფის მხედველობის არეში 355 კმ/წმ საშუალო სიჩქარის მქონე CME-ი გამოჩნდა 2012 წლის 08 აგვისტოს UT 05:48:07 სთ-ზე.



ნახაზი 4.20. SOHO/LASCO/C2-ის მიერ დაკვირვებული CME-ის ამოფრქვევა. მარცხენა მხარეს წარმოდგენილია 35 წთ-იანი დროითი სხვაობის გამოსახულებები. ლურჯი ზოლი მიუთითებს CME-ის კიდის საწყის პოზიციას გარე კორონაში, ხოლო წითელი ხაზი - რიცხვითად მიღებული კიდის მიახლოებითი კონტურს. გამოსახულებები გვიჩვენებს CME-ის ევოლუციას 2012 წლის 8

ავგისტოს UT 06:48 სთ-სა და UT 07:36 სთ-ზე. თეთრი ისრებით მითითებულია კორონული მასის ამოფრქვევის მდებარეობა.

4.20 ნახაზზე მარცხენა მხარეს დროითი სხვაობის გამოსახულებებზე ლურჯი ნიშნულით წარმოდგენილია CME-ის კიდის საწყისი პოზიცია გარე კორონაში, ხოლო წითელი ხაზი მიუთითებს რიცხვითად მიღებული კიდის მიახლოებითი კონტურს, რომელიც შექმნილია სეგმენტაციის ტექნიკის გამოყენებით (სურათი აღებულია კოსმოსური ამინდის ლაბორატორიის პროექტის „მზის ამოფრქვევადი მოვლენების დეტექტირების სისტემიდან“ (SEEDS)).

4.2.4. პროტუბერანცის ზევით ასვლის შესაძლო მექანიზმი

როგორც უკვე ავღნიშნეთ, კორონაში პროტუბერანცის წონასწორობა გამოხატულია მაგნიტური ველის და გრავიტაციული ძალის ბალანსით. წონასწორობის დარღვევა, რაც იწვევს პროტუბერანცის თავდაპირველ ნელ ასვლას, შესაძლოა ორი მიზეზით იყოს გამოწვეული. უპირველეს ყოვლისა, თერმული არამდგრადობის შედეგად გამოწვეული კორონული წვიმა შესაძლოა ამცირებდეს პროტუბერანცის მასას, რაც შემდგომ იწვევს მის ზევით ასვლას. ან სხვა შემთხვევაში, წონასწორობის დარღვევა შესაძლოა გამოწვეულია მაგნიტური რეკონსტრუქციის პროცესით, რაც იწვევს პროტუბერანცის ზევით ასვლას და თანამდევ პლაზმის ვარდნას წვიმის წვეთების სახით. ორივე შემთხვევაში კორონული წვიმის წვეთები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ პროტუბერანცის ასვლის პროცესში. თუმცა სასიცოცხლოდ მნიშვნელოვანია გვესმოდეს პროტუბერანცის აღმასვლის გამომწვევი პროცესი.

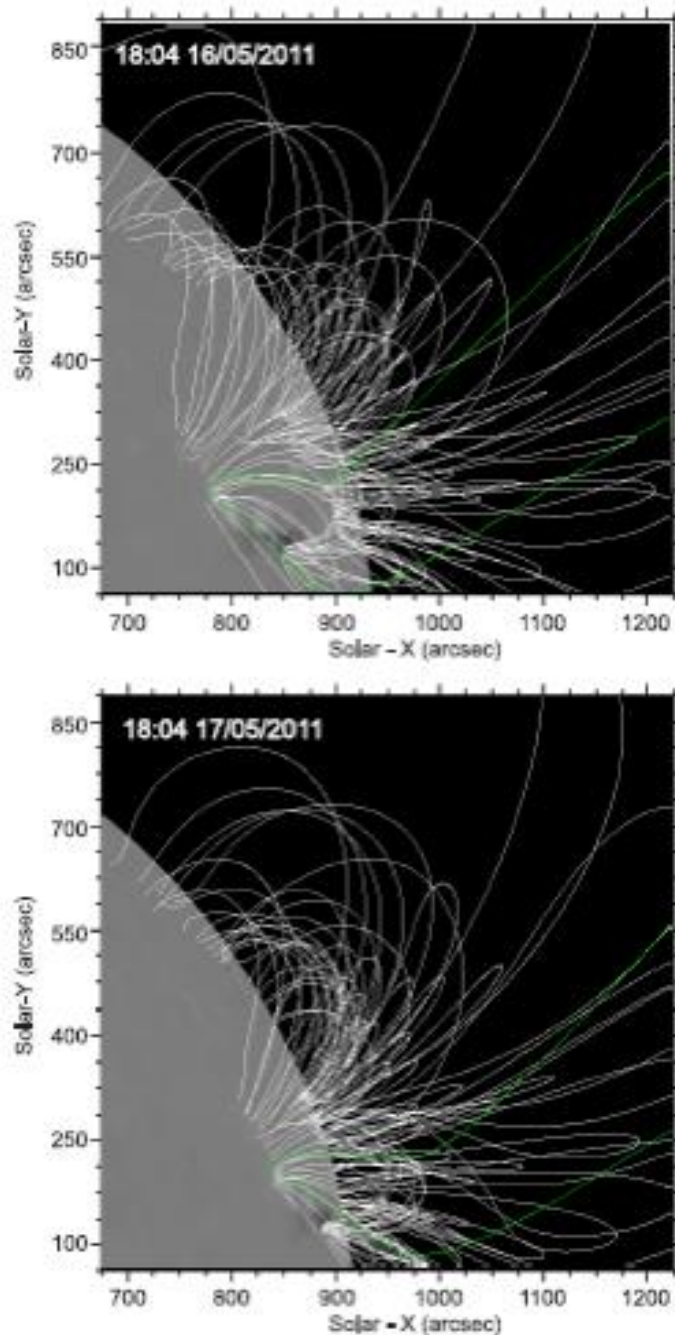
ზევით ასვლის პროცესის შესასწავლად ჩვენ დეტალურად გავაანალიზეთ 2011 წლის 16-18 მაისის მოვლენა. ჩვენ სივრცე-დროითი დიაგრამიდან (იხ. ნახაზი 4.12 შუა და ქვედა ნაწილი) გავადიდეთ კორონული წვიმის დაწყების პერიოდის არე, რომელიც იყო UT 20:00 სთ-ის მიდამოებში (2011 წლის 16 მაისი). შესაბამისმა ანალიზმა გვიჩვენა რომ ორ სხვადასხვა სპექტრულ ხაზში პროტუბერანცი შედარებით სტაბილური იყო 2011 წლის 17 მაისის UT 00:30 სთ-მდე (ნახაზი 4.12 შუა და ქვედა ნაწილი) და შემდგომ დაიწყო ნელი

ასვლა. იქიდან გამომდინარე, რომ ნელი ასვლა დაიწყო ინტენსიური კორონული წვიმის დაწყებიდან 2.5 საათში (2011 წლის 16 მაისის UT 22:00 სთ-დან - 2011 წლის 17 მაისის UT 00:30 სთ-მდე), შეგვიძლია ვივარაუდოთ რომ ნელი ასვლის ფაზა, თერმული არამდგრადობის შედეგად გამოწვეული კორონული წვიმის შედეგია. ცხადია პროტუბერანცის ზევით აწევის გამო, მაგნიტური ველის ძალწირების გასწვრივ პლაზმის წვეთების ვარდნა, გეომეტრიული ეფექტის მეშვეობით მოხდა.

2019 წლის Vasantharaju-ს ნაშრომში გამოთქმული ვარაუდით (Vasantharaju et al. 2019), ნელი ასვლის ფაზა შესაძლებელია დაკავშირებული იყოს რხევით არამდგრადობასთან. თუ ჩვენ ამ ვარაუდს განვიხილავთ ჩვენს მიერ შესწავლილი 2011 წლის 16 - 18 მაისის მოვლენისთვის, მივიღებთ რომ ნელი ასვლის ფაზა დაახლოებით 25 საათია (2011 წლის 17 მაისი UT 03:00 სთ-დან - 2011 წლის 18 მაისის UT 04:00 სთ-მდე (ნახაზი 4.12)). იდეალური რხევითი არამდგრადობის განვითარების დრო (Velli et al. 1990; Torok et al. 2004; Zaqarashvili et al. 2010) შეესაბამება 10 – 100 განივ ალვენის დროს (მაგნიტური მილის რადიუსის და ალვენის სიჩქარის თანაფარდობა). პროტუბერანცის მილის რადიუსის (ან ნახევარ-სიგანის 20 მგმ-ის) გათვალისწინებით, ალვენის სიჩქარე, ჩვენ შემთხვევაში, პროტუბერანცში უნდა ყოფილიყო 10 – 20 კმ/წმ-ი. ხოლო იდეალური რხევითი არამდგრადობის განვითარების დრო - 0.3 – 0.5 სთ-ი, რაც გაცილებით ნაკლებია ვიდრე დაკვირვებულ პროტუბერანცში ნელი ასვლის ფაზის დრო, რომელიც 25 სთ-ს შეადგენს (2011 წლის 17 მაისი UT 03:00 სთ-დან - 2011 წლის 18 მაისის UT 04:00 სთ-მდე (ნახაზი 4.12)). აქედან გამომდინარე პროტუბერანცის აღმასვლის გამომწვევ მიზეზებიდან რხევითი არამდგრადობა შეგვიძლია გამოვრიცხოთ.

პროტუბერანცის ზევით ასვლის ფაზამდე და მის დროს მაგნიტური ველის კონფიგურაციის შესამოწმებლად, ჩვენ შევასრულეთ მაგნიტური ველის ექსტრაპოლაცია (PFSS - პოტენციური ველი წყარო-ზედაპირი). 4.21. ნახაზზე ჩვენ წარმოვადგინეთ მიღებული შედეგი, რამაც აჩვენა რომ მაგნიტური ველი არ აჩვენებს რაიმე სტრუქტურულ ცვლილებას ნელი ასვლის ფაზაში, რაც მაგნიტური ველის არამდგრადობის არ არსებობაზე მიუთითებს (ექსტრაპოლირებული ველის ძალწირები ნელი ასვლის ფაზამდე და მის დროს ნაჩვენებია 2.21 ნახაზის ზედა და ქვედა გამოსახულებებზე). ეს

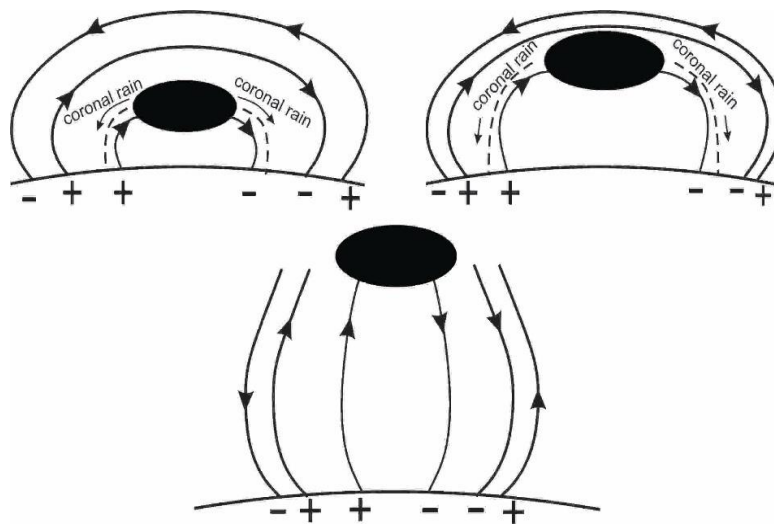
შედეგი ასევე მიუთითებს ფოტოსფეროს სტატიკურ კონფიგურაციაზე მოცემულ ინტერვალში, რაც გამორიცხავს ფოტოსფერული ცვლილებების როლს ნელი ასვლის პროცესში.



ნახაზი 4.21. პროტუბერანცის არეში მაგნიტური ველის ექსტრაპოლაცია ნელი ასვლის პროცესის დაწყებამდე (2011 წლის 16 მაისი UT 18:04 სთ. ზედა გამოსახულება) და დაწყების შემდეგ (2011 წლის 17 მაისი UT 18:04 სთ. ქვედა გამოსახულება). თეთრი მრუდით წარმოდგენილია დახურული

მაგნიტური ძალწირები, ხოლო მწვანე და იასამნისფერი წარმოადგენს ღია ძალწირებს დადებითი და უარყოფითი პოლარობით.

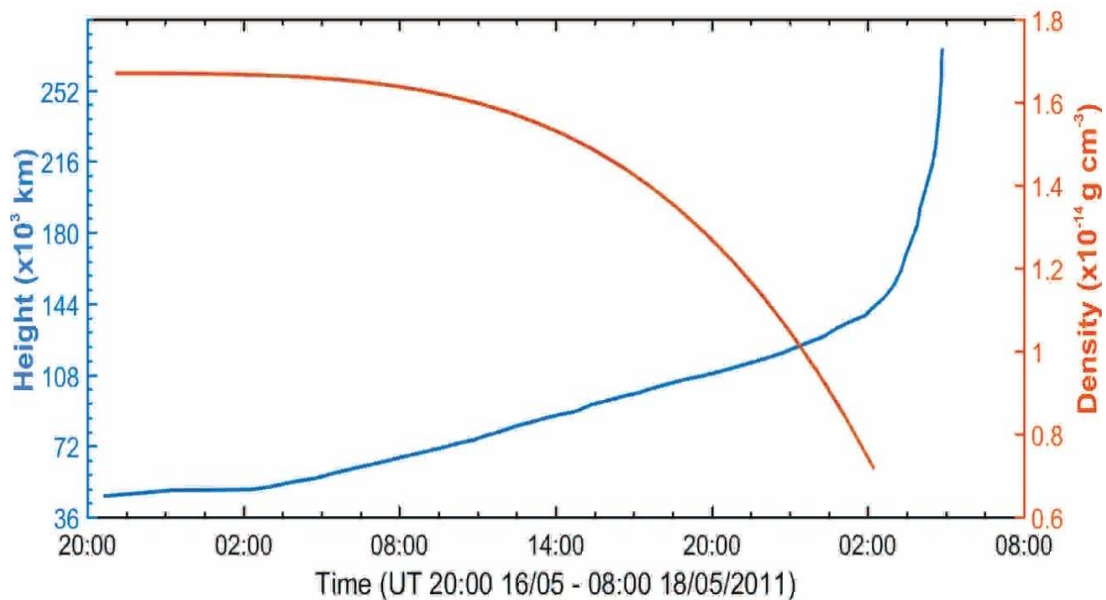
მეორეს მხრივ, სწრაფი ასვლის ფაზა დიდი ალბათობით წარმოადგენს მაგნიტური არამდგრადობის შედეგს, რომელიც შეიძლება გამოხატული იყოს ე.წ. მაგნიტური გარღვევის მოდელით (Antiochos et al. 1999) ან გრეხვითი არამდგრადობით (Torok and Kliem 2007, Filippov 2013, Zuccarello et al. 2014). ჩვენ არ შეგვიძლია მტკიცე დაკვირვებითი დასკვნის ჩამოყალიბება, თუ რომელი მოდელი მოქმედებს ჩვენ შემთხვევაში. სწრაფი ასვლის ფაზაში 4.11 ნახაზი ნათლად გვიჩვენებს პროტუბერანცში დაგრეხილ სტრუქტურებს, რამაც შესაძლოა გრეხვით არამდგრადობას შეუწყო ხელი, თუმცა მაგნიტური გარღვევის მოდელის გამორიცხვაც არ შეიძლება. პროტუბერანცი არასტაბილურობის შემდეგ ამოიფრქვა CME-ის სახით გარე კორონაში. ნახაზი 4.22 გვიჩვენებს მთლიანი მოვლენის სქემატურ სურათს, რაც ჩვენ შემთხვევაში შეიძლება ჩაითვალოს რელევანტურად.



ნახაზი 4.22. პროტუბერანცის ევოლუციის სქემატური დინამიკა. შავი ელიფსი წარმოადგენს პროტუბერანცს, დაშტრიხული მრუდით ნაჩვენებია კორონული წვიმის ვარდნის ტრაექტორია. საწყისი კონფიგურაცია მოცემულია ზედა მარცხენა მხარეს, წვიმის შედეგად პროტუბერანცის ნელი ასვლა წარმოდგენილია ნახაზის ზედა მარჯვენა მხარეს, ხოლო საბოლოო ამოფრქვევა CME-ის სახით - ქვედა სქემაზე.

ნელი ასვლის დროს პროტუბერანცი ნელნელა ვითარდება, რაც ნიშნავს იმას რომ ყოველი თანმიმდევრული კონფიგურაცია შეიძლება წონასწორობის ახალ მდგომარეობად ჩაითვალოს.

ნელი ასვლის დროს მაგნიტური ველი მნიშვნელოვნად არ იცვლება (იხ. ნახაზი 4.21 მაგნიტური ველის ექსტრაპოლაცია), თუმცა პროტუბერანცის საგრძნობლად გაზრდილი სიმაღლე უნდა ბალანსდებოდეს ელექტრონული სიმკვრივის შემცირებით. 4.23 ნახაზი გვიჩვენებს პროტუბერანცის სიმაღლის ცვლილების დაკვირვებით დინამიკას და მთელი ინტერვალის განმავლობაში კორონული წვიმის შედეგად სიმკვრივის ცვლილებას. 4.23 ნახაზიდან აშკარად ჩანს, რომ სიმაღლე და სიმკვრივე ერთმანეთთან ანტიფაზაშია: ერთი იზრდება ხოლო მეორე მცირდება.



ნახაზი 4.23. 2011 წლის 16-18 მაისს დაკვირვებული პროტუბერანცის აღმავალი სვლა (ლურჯი ზოლი) და კორონული წვიმის შედეგად მთელი პროცესის მანძილზე შემცირებული სიმკვრივე (წითელი ზოლი).

ჩვენ ასევე დავინახეთ რომ ნელი ასვლის ფაზა წრფივია, რაც გამორიცხავს რაიმე სახის არამდგრადობის არსებობას ამ პროცესის დროს. მსგავსი შეფასების შედეგად

მივდივართ დასკვნამდე რომ ნელი ასვლის ფაზა კორონული წვიმის შედეგად არის გამოწვეული.

ჩვენ შევისწავლეთ ოთხი ერთმანეთისგან დამოუკიდებელი პროტუბერანცის არამდგრადობის მოვლენა თანმდევი CME-ით. სხვადასხვა ტალღის სიგრძეში სხვადასხვა კოსმოსური თანამგზავრიდან მიღებული მონაცემების საშუალებით დავადგინეთ პროტუბერანცების და კორონული წვიმის ურთიერთკავშირი. თითოეულ შემთხვევაში მასიურ კორონულ წვიმის ვარდნას ფოტოსფეროს მიმართულებით თან ახლდა პროტუბერანცის არამდგრადობა და CME-ის ამოფრქვევა.

თავი 5. შედეგები დისკუსიის სახით

მზის კორონული წვიმა დიდი ალბათობით უკავშირდება კორონის გაცხელებას და ლოკალურ თერმულ არამდგრადობას, ამიტომ საწყის ეტაპზე საჭირო იყო ორ მთავარ კითხვაზე გაგვეცა პასუხი:

- როგორ წარმოიქმნება კორონული წვიმა,
- რატომ არის წვიმის წვეთების ვარდნის აჩქარება მზეზე თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაზე ნაკლები.

ჩვენ გამოვიყენეთ SDO-AIA კოსმოსური თანამგზავრის ინსტრუმენტიდან 304 Å და 171 Å სპექტრულ ხაზებში მიღებული დაკვირვებები. ჩვენ გამოვავლინეთ კორონული მარყუჟის 1 MK (მილიონი კელვინი) ტემპერატურიდან - 0.05 MK ტემპერატურამდე სწრაფი გაციება, რომელსაც ადგილი ჰქონდა 2012 წლის 22 თებერვალს.

ჩვენს მიერ საწყის ეტაპზე დაკვირვებული მარყუჟების გაქრობა მოხდა 171 Å ხაზში და გამოჩენა 304 Å-ში. გაციებას თან ახლდა კორონული წვიმის ფორმირება ვარდნილი წვეთების სახით.

კორონული წვიმა დიდი ალბათობით დაკავშირებულია „კატასტროფულ გაციებასთან“, როდესაც ენერგიის გამოსხივებითი კარგვა ლოკალურად აღემატება ენერგიის სითბურ წყაროს (Parker 1953; Field 1965; Antiochos et al. 1999; Schrijver 2001; Müller et al. 2003, 2004, 2005). შესაბამისად ჩვენ შევაფასეთ ენერგიის ბალანსი კორონული მარყუჟის 1 MK ტემპერატურიდან 0.05 MK ტემპერატურამდე გაციების დროს. უცვლელი განივკვეთის ფართობის მქონე კორონის სტატიკური მარყუჟის ენერგიის განტოლება წარმოადგენს:

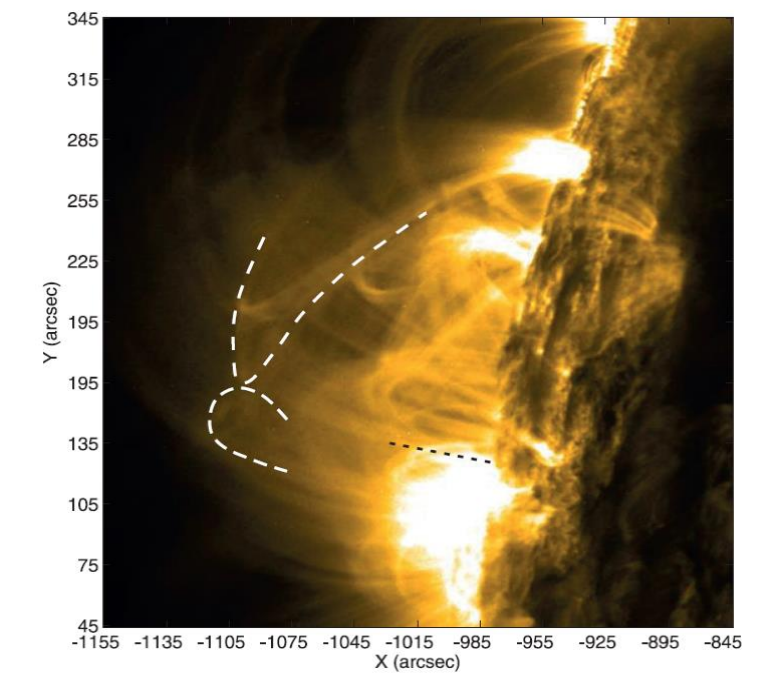
$$\frac{n_e k_B}{\gamma - 1} \frac{\partial T}{\partial t} = E_H - E_R - \nabla F_c \quad (5.1)$$

სადაც n_e - ელექტრული სიმკვრივეა, T - პლაზმის ტემპერატურა, k_B - ბოლცმანის მუდმივა, γ - სითბოგამტარობის კოეფიციენტი (ასევე ცნობილი როგორც: ადიაბატური ინდექსი, ლაპლასის კოეფიციენტი), E_H - სითბური წყაროს ენერგია, E_R - გამოსხივების ენერგია, F_c - სითბოგამტარობის ენერგია. ჩვენ სათითაოდ შევაფასეთ 5.1 ტოლობის მარჯვენა მხარე. მაგნიტური მარყუჟის 3×10^9 სმ³ - ელექტრული სიმკვრივის და 1MK ტემპერატურის შესაბამისი 10^{-22} ერგ * სმ³/წმ გამოსხივების ფუნქციის მნიშვნელობის გამოყენებით, გამოსხივების ენერგია დაახლოებით შეადგენდა $E_R \approx n_e^2 \Lambda(T) = 9 \times 10^{-4}$ ერგ / სმ³ * წმ -ს (Aschwanden 2004). მარყუჟის 110 მგმ-ის სიგრძის (რომელიც შეესაბამება 70 მგმ სიმაღლეზე მდებარე მარყუჟის წვეროს) ერთი საყრდენის გასწვრივ სითბოგამტარობის ენერგია წარმოადგენდა $\nabla F_c \approx 10^{-6} T^{7/2} / L^2 \approx 8 \times 10^{-6}$ ერგ / სმ³ * წმ -ს. როგორც ჩანს გამოსხივებით ენერგიის კარგვა ბევრად მნიშვნელოვანია ვიდრე სითბოგამტარობით. ენერგიის ბალანსისთვის საჭირო სითბური წყაროს ენერგია წარმოადგენდა 3.37×10^{-4} ერგ / სმ³ * წმ -ს. აქედან გამომდინარე ჩვენ დავადგინეთ რომ ენერგიის ბალანსი ირღვევა, გამოსხივების ენერგია ლოკალურად აღემატება სითბური წყაროს ენერგიას, როგორც ერთგვაროვანი ისე არაერთგვაროვანი სითბოს დროს. შესაძლოა ეს პროცესი წინ უძღოდეს „კატასტროფული გაციების“ პროცესს. რაც შეეხება 5.1 ტოლობის მარჯვენა მხარეს, იგი გამოხატავს მარყუჟის 1 MK-დან 0.05 MK-მდე გაციების დროს. შესაბამისმა რიცხვით შეფასებებმა აჩვენა, რომ მარყუჟის 1.5 MK ტემპერატურიდან 0.05 MK ტემპერატურამდე გაციებას შეესაბამება ~45 წთ-ი, რაც ასევე ახლოა ჩვენს მიერ დაკვირვებული გაციების დროსთან.

კორონული მაგნიტური მარყუქების გაციებას თან ახლდა წვიმის ფორმირება ვარდნილი ცივი წვეთების სახით. ჩვენ გამოვიკვლიეთ წვეთების ორი ჯგუფი. პირველი ჯგუფის წვეთები გამოჩნდნენ გაციებული კორონული მარყუქის ქვემოთ პერპენდიკულარული მიმართულებით, ხოლო მეორე ჯგუფის წვეთების ვარდნა დაიკვირვებოდა კორონული მარყუქის გასწვრივ. ერთ-ერთ საინტერესო ფაქტს წარმოადგენდა პირველი ჯგუფის წვეთების ფორმირება გაციებული კორონული მარყუქიდან მოშორებით. ჩვენი ვარაუდით ამის სამი მიზეზი არსებობს. პირველი - წვეთები შეიძლება წარმოქმნილიყვნენ მარყუქის შიგნით თუმცა მცირე მასის და ამავედროულად მცირე სიმკვრივის გამო შეუმჩნეველი ყოფილიყვნენ 304 Å-ის ხაზში. ერთ-ერთი ვარაუდით თერმული არამდგრადობის შემდეგ წვეთები მაღალსიჩქარიანი ნაკადების საშუალებით (Müller et al. 2004) ან გადაერთების შედეგად წარმოქმნილი ნაკადებით (Murawski et al. 2011) მოხვდა მარყუქებიდან მოშორებით. მოგვიანებით წვეთების ვარდნისას გაზრდილი მასის (და ინტენსიობის) გამო, გამოჩნდნენ დაკვირვებულ სიმაღლეზე. ამ შემთხვევაში პირველი ჯგუფის პირველ და მესამე წვეთს გამოჩენისას ქონდა საწყისი სიჩქარე. თუ პირველი წვეთის შესაძლო საწყისი სიჩქარეს (12 კმ/წმ) გამოვიყენებთ ნაკადის საშუალო სიჩქარედ, მაშინ წვეთის ვარდნის დრო შესაბამისი სიმაღლიდან ~30 წთ-ია. მეორე - მაგნიტური გადაერთება, რასაც შეუძლია აქტიური რეგიონის მარყუქების რეკონსტრუქცია და წვეთების ვარდნა მოხდა ახლად შექმნილი მარყუქის გასწვრივ. აქტიური რეგიონის ორი სხვადასხვა მარყუქის შესაძლო გადაერთების გამოსახულება წარმოდგენილია 5.1 ნახაზზე. მესამე - პირველი ჯგუფის წვეთები წარმოიქმნებიან მარყუქში, რომელიც კავშირში არ არის მარყუქთან რომელშიც წარმოიქმნა მეორე ჯგუფის წვეთები. პროექციის ეფექტის გამო ხდება მათი გამოჩენა ისე როგორც ნაჩვენებია 5.1 ნახაზზე (შავი დაშტრიხული ხაზი).

პირველი ჯგუფის წვეთების საშუალო სიჩქარე იცვლებოდა 40 – 60 კმ/წმ შუალედში, ხოლო აჩქარება 120 – 136 მ/წმ² შუალედში რაც გაცილებით მცირეა ვიდრე თავისუფალი ვარდნის აჩქარება, რომელიც 275 მ/წმ²-ია. მეორე ჯგუფის წვეთებისთვის, რომლებიც მიყვებოდა მარყუქის მრუდ ტრაექტორიას მისი წვეროდან მარყუქის ფეხების გასწვრივ,

სიჩქარის ცვლილება დავაფიქსირეთ $60 - 80 \text{ კმ/წმ}$ შუალედში, ხოლო აჩქარების ცვლილება ხდებოდა $100 - 130 \text{ მ/წმ}^2$ შუალედში.



ნახაზი 5.1. კორონული მარყუქების გადაერთება, რის შედეგადაც მოხდა აქტიური რეგიონის რეკონსტრუქცია. შესაძლო მარყუქები ნაჩვენებია თეთრი დაშტრიხული მრუდით, AR 11420 აქტიური რეგიონის მახლობლად $171 \text{ \AA}$ ხაზში 2012 წლის 22 თებერვალის UT 21:00 სთ-ზე. შავი დაშტრიხული ხაზით ნაჩვენებია წვეთის ვარდნის ტრაექტორია.

შემდეგ კორონული წვიმის მოვლენას, რომელიც შევისწავლეთ DEM პროგრამული კოდის გამოყენებით, ადგილი ჰქონდა აქტიური რეგიონის AR 11312 კორონულ მარყუქებში. 2011 წლის 6 ოქტომბერს SDO-AIA კოსმოსური თანამგზავრით დაკვირვებულ მზის დისკოს კიდეზე განთავსებულ კორონულ მარყუქებზე, პროგრამული კოდის დახმარებით მოხდა 240 ერთეული მარყუქის ინდივიდუალური ანალიზი. DEM პროგრამული კოდის საშუალებით შევქმენით აქტიური არის მაგნიტური მარყუქების, გამოსხივების და ტემპერატურული რუკები, კორონული წვიმის დაწყების და დამთავრების დროს (იხ. ნახაზი 3.8). კორონული მარყუქები გარკვევით ჩანს გამოსხივების ლოგარითმულ რუკაზე 20:10 UT (იხ. თეთრი ისარი 3.8 ნახაზის ზედა მარცხენა მხარეს), მაგრამ კორონული წვიმის დასასრულისკენ (3.8 ნახაზის ქვედა მარცხენა მხარე) 02:11 UT მარყუქები თანდათან

გამქრალია. რაც შეეხება ტემპერატურას ორივე შემთხვევაში ინარჩუნებენ $\log(T) \approx 6.2 - 6.5K$ დიაპაზონს (მარჯვენა მხარე ნახ.3). ექვს სხვადასხვა სპექტრულ ხაზში ავტომატურად მოძებნილი მარყუქების დაყოფა მოხდა სეგმენტებად. სხვადასხვა ტალღის სიგრძის თითოეული მარყუქის სეგმენტისთვის მოხდა ტემპერატურის, მარყუქის გასწვრივ ელექტრონული სიმკვრივის, მარყუქის სიგანის შეფასება, რაც შესაბამისად წარმოადგენდა $\log(T) = 6.3 - 6.6 K$, $\log(n_e) = 9.13 \pm 0.42 b\sigma^3$, $\omega = 3.2 \pm 1.7$ მგმ-ს. ელექტრონული სიმკვრივის და ტემპერატურის დამოკიდებულებიდან ჩვენ გამოვთვალეთ ადიაბატური ინდექსი კორონული წვიმის დაწყების და დამთავრების დროს. ადიაბატური ინდექსი კორონული წვიმის დაწყებისას წარმოადგენდა $\gamma = 1.3 \pm 0.06$, ხოლო დასასრულს - $\gamma = 2.1 \pm 0.11$ რაც დიდი ალბათობით კატასტროფულ გაციებასთან არის კავშირში.

კიდევ ერთი მოვლენა, რომელიც ჩვენ შევისწავლეთ, წარმოადგენს პროტუბერანცის და კორონული წვიმის კავშირს. თითქმის 30 საათიანმა უწყვეტმა კორონულმა წვიმამ, მოახდინა პროტუბერანცის მასის შემცირება, რის შედეგადაც გრავიტაციული ძალა მცირდება და ლორენცის ძალის სიჭარბის გამო ხდება პროტუბერანცის მაღლა ასვლა. მსგავსმა პროცესმა შეიძლება გამოიწვიოს გადაერთება ან მსგავსი პროცესი, რომელიც წარმოქმნის გლობალურ არამდგრადობას და შესაბამისად CME-ის.

ჩვენ ანალიზი ჩავუტარეთ 2011-2012 წლებში SDO და STEREO კოსმოსური თანამგზავრების საშუალებით ერთდროულად დაკვირვებულ მზის სამ სხვადასხვა პროტუბერანცს. პროტუბერანცები სხვადასხვა მისიის საშუალებით სხვადასხვა კუთხიდან იქნა შესწავლილი, რამაც მათი დინამიკის დეტალური შესწავლის საშუალება მოგვცა. დაკვირვებული სამივე მოვლენის შემთხვევაში, პროტუბერანცის სტრუქტურიდან მასიური კორონული წვიმის წვეთების ვარდნას თან ახლდა რამდენიმე ათეულ საათში პროტუბერანცის არამდგრადობა და CME-ს ამოფრქვევა. დაკვირვებებმა აჩვენა რომ რამდენიმე საათიანი კორონული წვიმის შედეგად პროტუბერანცმა იწყო ზევით ასვლა, რაც მასის კარგვასთან იყო დაკავშირებული. პროტუბერანცის ასვლა დაკავშირებულია ორ: საწყისი ნელი ასვლის ფაზასა და თანმდევი სწრაფი ასვლის ფაზასთან.

ჩვენ ანალიზი ჩავუტარეთ მრუდი ტრაექტორიის გასწვრივ ვარდნილ კორონული წვიმის წვეთებს (სამივე შემთხვევისთვის ჯამში 32 ტრაექტორია იყო შესწავლილი). ვარდნილი პლაზმის წვეთების აჩქარების და სიჩქარის დასადგენად შესწავლილი ტრაექტორიებიდან, ჩვენ გამოვყავით სივრცე-დროითი დიაგრამები. ჩვენ კვადრატული პოლინომიალით აპროქსიმაცია ჩავუტარეთ მრუდ ტრაექტორიებს და დავითვალეთ წვეთების ვარდნის საწყისი სიჩქარე, რაც წარმოადგენდა საშუალოდ 65 კმ/წმ-ს.

რაც შეეხება კორონული წვიმის წვეთების ვარდნის აჩქარებას, იგი იცვლებოდა 20 – 136 მ/წმ² შუალედში ყველა დაკვირვებული წვიმის წვეთისთვის. აჩქარება მცირეა მზეზე გრავიტაციულ აჩქარებასთან შედარებით რაც ასევე დაიკვირვებოდა ადრეულ შრომებში (Schrijver 2001, De Groof et al. 2004, De Groof et al. 2005, Antolin 2010, Antolin & Verwichte 2011, Antolin & Rouppe van der Voort 2012). ვარდნის დრო მეტწილად 30 წთ-ზე მეტი იყო, ხოლო სიმაღლე 29 მგმ-ზე მეტი, რაც ასევე გამოთქმული იყო ადრეულ სამუშაოებში (De Groof et al. 2004, De Groof et al. 2005, Antolin 2010, Antolin & Verwichte 2011, Antolin & Rouppe van der Voort 2012).

ჩვენ მოვახდინეთ პროტუბერანცის არამდგრადობამდე კორონული წვიმით მასის კარგვის შეფასება, რაც დაახლოებით 17 – 19%-ის მახლობლად მერყეობდა. თუმცა სამივე შემთხვევისთვის ჩვენ დავაკვირდით კორონული წვიმის წვეთებს პროტუბერანცის ერთი ფეხის გასწვრივ, რადგან მეორე ფეხის გასწვრივ წვეთების ვარდნა გარკვევით არ დაიკვირვება. თუ მასის გადინებას სიმეტრიულად განვიხილავთ პროტუბერანცის ორივე ფეხში, მაშინ შეფასებული მასის დანაკარგი იქნება 34 – 38%. თუ საწყისი სიმკვრივე დაკვირვებულ პროტუბერანცებში შეადგენდა $\rho = 1.67 \times 10^{-14}$ გ/სმ³, კორონული წვიმის შედეგად მასის კარგვის შემდეგ სიმკვრივის შეფასებისას (პროტუბერანცის შეუცვლელი მოცულობის შემთხვევაში) 2011 წლის 16-18 მაისის მოვლენისთვის სიმკვრივის მნიშვნელობა წარმოადგენდა 1.11×10^{-14} გ/სმ³, 2011 წლის 24-26 დეკემბრის მოვლენისთვის - 1.02×10^{-14} გ/სმ³ და 2012 წლის 7 - 8 აგვისტოს მოვლენისთვის 1.12×10^{-14} გ/სმ³.

დაკვირვებიდან გამომდინარე მნიშვნელოვანი იყო გაგვეო და შეგვესწავლა პროტუბერანცის ნელი ასვლის მექანიზმი. იგი შეიძლება კავშირში ყოფილიყო მაგნიტური ველის კონფიგურაციის არამდგრადობასთან, როგორც არის რხევითი (კინკ) არამდგრადობა ან გრეხვითი (ტორუს) არამდგრადობა. ჩვენ შემთხვევაში პროტუბერანცის პირობებში რხევითი არამდგრადობის განვითარების დრო ერთ საათზე ნაკლებია. სამივე დაკვირვებული მოვლენის შემთხვევაში ნელი ასვლის ფაზა გრძელდება 25 საათის მახლობლად, აქედან გამომდინარე ნელი ასვლის წარმოშობის მექანიზმად რხევითი არამდგრადობა შეგვიძლია გამოვრიცხოთ. მეორეს მხრივ კორონული წვიმის შედეგად სიმკვრივის და პროტუბერანცის მასის კლება დიდი ალბათობით დაკავშირებულია გრავიტაციული ძალის შემცირებასთან, რაც ხელს უწყობს ლორენცის ძალის ფარდობითი წილის გაზრდას და აქედან გამომდინარე პროტუბერანცის სტრუქტურის აღმავალ სვლას. ჩვენ სივრცე-დროითი დიაგრამის საშუალებით შევისწავლეთ პროტუბერანცის აღმასვლა, რამაც აჩვენა რომ ამის გამომწვევი მექანიზმი შეიძლება იყოს კორონული წვიმა. შესაძლებელია პროტუბერანცის ნელი ასვლა გარკვეულ სიმაღლეზე იწვევდეს გრეხვით არამდგრადობას (Torok and Kliem 2007, Filippov 2013, Zuccarello et al. 2014) ან მაგნიტური გარღვევის მოდელზე დაყრდნობით მაგნიტურ გადაერთებას (Antiochos et al. 1999). ეს არამდგრადობები წარმოადგენენ სწრაფი ასვლის ფაზას, როდესაც პროტუბერანცი საბოლოოდ CME-ის სახით ამოიფრქვა.

კორონული წვიმის დაწყებასა და პროტუბერანცის საბოლოო არამდგრადობას შორის დროითი ინტერვალი: 2011 წლის 16-18 მაისის მოვლენის დროს იყო 28 საათი, 2011 წლის 22-24 დეკემბრის მოვლენისთვის - 26 საათი და 2012 წლის 7 - 8 აგვისტოს მოვლენისთვის - 18 საათი. აქედან გამომდინარე თუ კორონული წვიმა წინ უძღვის საწყის ნელ ასვლას და თანმდევ პროტუბერანცის არამდგრადობას, ჩვენ შეგვეძლება ამოფრქვევამდე 20 - 30 საათით ადრე ვიწინასწარმეტყველოთ CME. ეს გამოიწვევს კოსმოსური ამინდის პროგნოზირების მნიშვნელოვან გაუმჯობესებას. აგრეთვე საჭიროა კორონულ წვიმასა და CME-ის გამომწვევი მიზეზის ურთიერთკავშირის შემდგომი დეტალური სტატისტიკური შესწავლა.

დასკვნა

ჩვენ შევისწავლეთ მზის კორონული წვიმის ფორმირება, ევოლუცია და დინამიკა, რაც შესაძლებელია უკავშირდებოდეს თერმულ არამდგრადობას და კორონის გაცხელებას.

თერმოდინამიკის მეორე კანონიდან გამომდინარე, მანძილის ზრდასთან ერთად თერმული არამდგრადობის შედეგად კორონაში ტემპერატურა საგრძნობლად უნდა იკლებდეს. უფრო მეტიც, გამოსხივების შედეგად კორონა გაცივდებოდა რამდენიმე საათში ან დღეში, რომ არა მუდმივი სითბოს წყარო. იმის გამო, რომ კორონა არაერთგვაროვანია, გათბობის მოთხოვნილება ადგილმდებარეობის მიხედვით სხვადასხვაა. მაგნიტური ველის ორგანიზებული სტრუქტურის გამო მეზობელი სტრუქტურები სრულად იზოლირებულია, რაც იწვევს სხვადასხვა არისტვის განსხვავებული ტემპერატურების არსებობას. ცნობილია რომ სითბო გამტარობა მაგნიტური ველის პერპენდიკულარულად მცირეა, რის ხარჯზეც ხდება არაერთგვაროვანი ტემპერატურის შენარჩუნება კორონაში. მაგნიტურ მარყუქებში გაცხელებისა და გაციების მაჩვენებლებს შორის ბალანსის დარღვევით გამოწვეული ტემპერატურული ცვლილებების ერთ-ერთი მაგალითია კორონული წვიმა, რის გამოც მნიშვნელოვანი იყო ამ ფენომენის შესწავლა.

ჩვენ შევეცადეთ დაგვედგინა კავშირი მზის სხვა მაღალ ენერგიულ მოვლენებთან, დაგვედგინა ვარდნილი პლაზმის წვეთების ფიზიკური მახასიათებლები: სიჩქარე და აჩქარება, რომელიც ნაკლებია მზეზე თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაზე.

დაკვირვებებმა აჩვენა რომ კორონული მარყუქები გაუჩინარდა $171 \text{ \AA}$ სპექტრულ ხაზში და დაახლოებით ერთი საათის მერე გამოჩნდა $304 \text{ \AA}$ სპექტრულ ხაზში, რაც მიანიშნებდა იმაზე რომ მოხდა სწრაფი გაციება $1MK$ -დან $0.05MK$ ტემპერატურამდე. ენერგიის შეფასებამ აჩვენა რომ რადიაციული კარგვა აღემატებოდა ენერგიის სითბურ წყაროს, რაც ე.წ. „კატარსტროფული გაციების“ სახელითაა ცნობილი. გაციებას თან ახლდა კორონული წვიმის ფორმირება ვარდნილი პლაზმის წვეთების სახით. ჩვენ შევისწავლეთ ვარდნილი წვეთების ორი ჯგუფი. პირველი ჯგუფის წვეთების სიჩქარეები იცვლებოდა $40 - 60 \text{ კმ/წმ}$

შუალედში, ხოლო მეორე ჯუფის წვეთების სიჩქარეები 90 – 100 კმ/წმ შუალედში, რაც შეეხება აჩქარებას ორივე შემთხვევაში გაცილებით დაბალი იყო ვიდრე მზეზე თავისუფალი ვარდნის აჩქარება. დავადგინეთ კორონული წვიმის წვეთების ფორმირება დაკავშირებულია „კატასტროფულ გაციებასთან“.

ჩვენი ამოცანა იყო დაგვედგინა ურთიერთკავშირი ელექტრონულ სიმკვრივესა და ტემპერატურას შორის დიფერენციალური გამოსხივების ზომის განსაზღვრის (DEM) მეთოდით, კორონული წვიმის მოვლენის დაწყების და დამთავრების დროს აქტიური მზის ფაზაში. დაკვირვებითი მონაცემი მიღებული იქნა SDO/AIA-ს კოსმოსური თანამგზავრიდან ექვს სხვადასხვა უკიდურეს ულტრაიისფერ (EUV) სპექტრულ ხაზში. 2011 წლის 6 ოქტომბრის 20:10 UT-დან 7 ოქტომბრის 01:10 UT-მდე ჩვენ ანალიზი ჩავუტარეთ 240 სხვადასხვა კორონულ მარყუჟს. ავტომატურად განსაზღვრული კორონული მარყუჟის საშუალო ტემპერატურა, ტემპერატურული სიგანე, ელექტრონის სიმკვრივე და მარყუჟის სიგანე შესაბამისად წარმოადგენდა: $\log(T) = 6.3 - 6.6K$, $\sigma_T = 0.26 \pm 0.21$, $\log(n_e) = 9.13 \pm 0.42 \text{ სმ}^{-3}$ $\omega = 3.2 \pm 1.7 \text{ მგმ}$. ჩვენ გამოვთვალეთ ადიაბატური ინდექსი კორონული წვიმის დაწყების და დამთავრების დროს. 2011 წლის 7 ოქტომბერს კორონული წვიმის დასასრულს ადიაბატური ინდექსი $\gamma = 1.3 \pm 0.06$ მნიშვნელობის ტოლი იყო, რაც წარმოადგენს მნიშვნელობას იზოთერმულ და ადიაბატურ მაჩვენებელს შორის, რაც შესაძლებელია შეესაბამებოდეს სტაბილურ კორონულ პლაზმას. რაც შეეხება კორონული წვიმის დასაწყისს (2011 წლის 6 ოქტომბერი 20:10 UT), ადიაბატური ინდექსი შეესაბამებოდა $\gamma = 2.1 \pm 0.11$ მნიშვნელობას, რაც თერმული არამდგრადობის მანიშნებელია და დაკავშირებულია პლაზმის „კატასტროფულ გაციებასთან“.

ჩვენ შევისწავლეთ პროტუბერანცი სხვადასხვა ტალღის სიგრძეში სხვადასხვა კოსმოსური თანამგზავრიდან მიღებული მონაცემების საშუალებით. SDO, STEREO_A და STEREO_B აკვირდება მზეს სხვადასხვა კუთხიდან, რამაც საშუალება მოგვცა პროტუბერანცის დინამიკის დეტალური შესწავლის საშუალება. დაკვირვების დროს პროტუბერანცმა გადაკვეთა მზის მთელი დისკი SDO-ს გამოსახულებებში. ჩვენ დავაკვირდით ტორნადოს ფორმირებას პროტუბერანცის ფუძეებთან (საყრდენებთან), როდესაც ტორნადომ მიაღწია განსაზღვრულ სიმაღლეს, დაიწყო კორონული წვიმის

წვეთების ვარდნა. 30 საათიანი წვიმის შემდეგ, პროტუბერანცი გახდა არასტაბილური და ამოიფრქვა CME-ის სახით. ჩვენი ვარაუდით პროტუბერანცის არამდგრადობა და თანმდევი CME-ის ამოფრქვევა კორონული წვიმით იყო გამოწვეული.

ასევე ჩვენ შევისწავლეთ პროტუბერანცის სტაბილურობაზე და თანმდევი CME-ის ამოფრქვევაზე კორონული წვიმის გავლენა. ანალიზი ჩავუტარეთ სამი სხვადასხვა პროტუბერანცის დინამიკას SDO/AIA და STEREO/SECCHI ერთდროული დაკვირვებითი მონაცემების გამოყენებით. სამივე შემთხვევაში, მასიური კორონული წვიმა იწყებდა ვარდნას ფოტოსფეროს მიმართულებით, რასაც თან ახლდა პროტუბერანცის არამდგრადობა და CME-ის ამოფრქვევა. პროტუბერანცის აღმავალი მოძრაობა ორი ფაზისგან შედგებოდა: ნელი ასვლის ფაზა და სწრაფი ასვლის ფაზა. ჩვენ ვვარაუდობთ, რომ ნელი ასვლის ფაზა გამოიწვია გრავიტაციულ და ლორენცის ძალას შორის წონასწორობის დარღვევამ, რაც წვიმის შედეგად მასის კარგვით არის გამოწვეული. მეორეს მხრივ სწრაფი ასვლის ფაზა დაკავშირებულია მაგნიტურ არამდგრადობასთან ან გადაერთებასთან, რაც პროტუბერანცის არამდგრადობის წინა პირობაა. პროტუბერანცის ერთი საყრდენის გასწვრივ ჩვენი შეფასებით დაახლოებით 20%-იანი მასის კარგვა შეინიშნებოდა. რაც სიმეტრიული (პროტუბერანცის ორივე საყრდენიდან გამომდინარე) დანაკარგის შემთხვევაში პროტუბერანცის მასის 40 %-იან დანაკარგს გვაძლევდა. თუ სამომავლო ანალიზი აჩვენებს პროტუბერანცის და კორონული წვიმის მსგავს კავშირს, შესაძლებელია კორონული წვიმის გამოყენება პროტუბერანცის არამდგრადობის და შემდგომი CME-ის ამოფრქვევის პროგნოზირებისთვის. ეს ხელს შეუწყობს კოსმოსური ამინდის კომპონენტების უფრო დეტალურ შესწავლასა და წინასწარმეტყველებას.

ბიბლიოგრაფია

1. Antiochos, S. K., MacNeice, P. J., Spicer, D. S., & Klimchuk, J. A. 1999, ApJ, 512, 985
2. Antolin, P., & Rouppe van der Voort, L. 2012, ApJ, 745, 152
3. Antolin, P., & Verwichte, E. 2011, ApJ, 736, 121
4. Antolin, P., Shibata, K., & Vissers, G. 2010, ApJ, 716, 154
5. Antolin, P., Vissers, G., & Rouppe van der Voort, L. 2012, Sol. Phys., 280, 457
6. Arregui, I., Oliver R., and Ballester J. L., 2012, Living Rev. Sol. Phys. 9, 2
7. Aschwanden, M. J. 2004, Physics of the Solar Corona (Chichester, New York: Praxis/Springer)
8. Aschwanden, M. J. 2010a, Sol. Phys. 262, 235
9. Aschwanden, M. J. 2010b, Sol. Phys. 262, 399
10. Aschwanden, M. J. 2010, Sol. Phys. 262, 399
11. Aschwanden, M. J. and Acton, L. W. 2001, ApJ, 550, 475
12. Aschwanden, M. J. and Boerner, P. 2011, ApJ, 732, 81
13. Aschwanden, M. J., Boerner, P., Schrijver, C. J. et al., 2013, Sol. Phys., 283:5-30
14. Aschwanden, M. J. and Nightingale, R. W., 2005, Elementary loop structures in the solar corona analyzed 387 from TRACE triple-filter images. ApJ. 633, 499-517
15. Aschwanden, M. J., & Schrijver, C. J. 2002, ApJS, 142, 269
16. Brosius, J. W., Davila, J. M., Thomas R. J., et al., 1996, ApJ. Suppl. 106, 143
17. Chae J., Denker C., Spirock T. J., et al., 2000, Sol. Phys. 195, 333
18. De Groof, A., Berghmans, D., Van Driel-Gesztelyi, L., & Poedts, S. 2004, A&A, 415, 1141

19. De Groof, A., Bastiaensen C., Müller, D. A. N., Berghmans, D., & Poedts, S. 2005, A&A, 443, 319
20. Fang, X., Xia, C., & Keppens, R. 2013, ApJ, 771, L29
21. Field, G. B. 1965, ApJ, 142, 531
22. Filippov, B., 2013, ApJ., 773, 10
23. Fludra A. and Sylwester, J. 1986, Solar Phys. 105, 323
24. Gopalswamy N., Shimojo M., Lu W., et al., 2003, ApJ., 586, 562
25. Kashyap V. and Drake J. J., 1998, ApJ. 503, 450
26. Kawaguchi, I. 1970, PASJ, 22, 405
27. Kuperus, M., & Raadu, M. A., 1974, A&A, 31, 189
28. Labrose N., Heinzel P., Vial J. C., et al., 2010, Space Sci. Rev., 151, 243
29. Lemen, J. R., Title, A. M., Akin, D. J., et al. 2012, Sol. Phys., 275, 17
30. Li X., Morgan H., Leonard D., et al., 2012, ApJ., 752 L22
31. Liu, W., Berger, T. E., & Low, B. C. 2012, ApJ, 745, 21, L8
32. Mackay, D. H., & Galsgaard, K. 2001, Sol. Phys., 198, 289
33. Mghebrishvili I., Zaqarashvili T. V., Kukhianidze V., et al., 2015, ApJ., 810, 89
34. Mghebrishvili I., Zaqarashvili T. V., Kukhianidze V., et al., 2018, ApJ., 861, 112
35. Müller, D. A. N., Hansteen, V. H., & Peter, H. 2003, A&A, 411, 605
36. Müller, D. A. N., Peter, H., & Hansteen, V. H. 2004, A&A, 424, 289
37. Müller, D. A. N., De Groof, A., Hansteen, V. H., & Peter, H. 2005, A&A, 436, 1067
38. Murawski, K., Zaqarashvili, T. V., & Nakariakov, V. M. 2011, A&A, 533, A18
39. Ning Z., Cao W., & Goode P. R., 2009b, ApJ., 707, 1124

40. Oliver, R., Soler, R., Terradas, J., Zaqarashvili, T. V., & Khodachenko, M. L. 2014, *ApJ*, 784, 17
41. Olmedo, O., Zhang, J., Wechsler, H., Poland, A., Borne, K.: 2008, *Solar Phys.* 248, 485.
42. O'Shea, E., Banerjee, D., & Doyle, J. G. 2007, *A&A*, 475, L25
43. Panesar N. K., 2014, PhD Thesis, Georg-August-Universität Göttingen, Institut für Astrophysik, Germany
44. Parker, E. N. 1953, *ApJ*, 117, 431
45. Pesnell, W. D., Thompson, B. J., & Chamberlin, P. C. 2012, *Sol. Phys.*, 275, 3
46. Priest E. R., 1982, *Solar Magnetohydrodynamics*, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht
47. Priest E. R., & Forbes T. G., 2002, *A&A Rev.*, 10, 313
48. Reale, F., Landi, E., & Orlando, S. 2012, *ApJ*, 746, 18
49. Rosner, R., Tucker, W. H., & Vaiana, G. S. 1978, *ApJ*, 220, 643
50. Schmieder B., Van Driel-Gesztelyi L., Aulanier G., et al., *Adv. Space Res.*, 29, 1451
51. Schrijver, C. J. 2001, *Sol. Phys.*, 198, 325
52. Shen Y., Liu Y., Liu Y. D., et al., 2015, *ApJL*, 814, L17
53. Su Y., Wang T., Veronig A., et al., 2012, *ApJL*, 756, L41
54. Thompson W. T., 2009, *Icarus* 2000, 351
55. Torok T., & Kliem B., 2007, *Astron. Nachr.*, 328, 743
56. Torok T., Kliem B., & Titov V. S., 2004, *A&A*, 413, L27
57. Van Doorselaere T., Wardle N., Del Zanna G., et al., 2011, *ApJL*, 727: L32 (4pp)
58. Vasantharaju N., Vemareddy P., Ravindra B., & Doddamani V.H., 2019, *ApJ*, 885, 89
59. Vashalomidze Z., Kukhianidze V., Zaqarashvili T. V., et al., 2015, *A&A*, 577, id. A136

60. Wedemeyere-Bohm S., Sculliom E., Rouppe van der Voort L., et al., 2013, ApJ., 774, 123
61. Wedemeyere-Bohm S., Sculliom E., Steiner O., et al., 2012, Nature, 486, 505
62. Wüelser J.-P., Lemen J. R., and Nitta N., 2007 SPIE Conf. Ser, 6689
63. Wüelser J.-P., Lemen J. R., Tarbell T. D., et al., 2004 SPIE Conf. Ser, 5171, 111
64. Zhang Q. M., Li D., and Ning Z. J., 2017b, ApJ., 851, 47
65. Zirker J. B., Engvold O., and Martin S. F., 1998 Nature, 396, 440

დანართი 1

დანართის სახით მოცემულია ჩვენს მიერ გაკეთებული კორონული წვიმის კატალოგი. კატალოგში მოცემულია წვიმის: დაწყების დრო, დამთავრების დრო, ხანგრძლიობა საათებში, მოვლენის კოორდინატები და ტალღის სიგრძე, რომელშიც დაფიქსირდა მოვლენა. კატალოგში მოცემულია 2010 წლიდან 2017 წლამდე SDO/AIA-ს მიერ დაკვირვებული მოვლენები.

N	დაწყების დრო	დამთავრების დრო	ხანგრძლიობა (საათი)	X	Y	SDO/AIA -ს დაკვირვება (ტალღის სიგრძე Å)			
						171	193	211	304
1	2010-09-24T00:00:01	2010-09-24T23:54:52	23.91	-722	509				304
2	2010-09-24T00:00:01	2010-09-24T06:04:02	6.07	991	-131				304
3	2010-09-29T08:56:56	2010-09-29T14:00:54	5.07	-943	444				304
4	2010-10-07T00:00:12	2010-10-07T23:59:36	23.99	-733	-643				304
5	2010-10-09T00:00:12	2010-10-09T11:59:36	12	980	-10				304
6	2010-10-09T03:00:12	2010-10-09T06:12:12	3.2	594	781				304
7	2010-10-10T06:32:28	2010-10-10T16:27:13	9.91	629	747				304
8	2010-10-10T10:13:55	2010-10-10T14:01:42	3.8	965	247	171			304
9	2010-10-10T21:30:00	2010-10-11T10:30:11	13	-936	-272				304
10	2010-10-11T12:00:12	2010-10-11T23:55:23	11.92	-781	-309				304
11	2010-10-15T00:00:11	2010-10-15T11:54:34	11.91	753	499			211	304
12	2010-10-15T00:00:11	2010-10-15T11:54:34	11.91	-780	-512	171			304
13	2010-10-15T11:00:11	2010-10-15T23:55:23	12.92	747	-605				304
14	2010-10-30T05:30:33	2010-10-30T08:00:43	2.5	991	345	171			304
15	2010-10-30T08:48:46	2010-10-30T20:47:11	11.97	-651	-712			211	304

16	2010-11-11T00:00:01	2010-11-11T12:59:57	13	779	-619				304
17	2010-12-05T00:00:12	2010-12-05T21:28:15	21.47	-964	-266				304
18	2010-12-05T01:15:17	2010-12-05T18:29:12	17.23	978	239				304
19	2010-12-06T17:08:00	2010-12-06T21:00:12	3.87	-452	-561	171	193	211	
20	2010-12-11T00:00:04	2010-12-11T23:55:19	23.92	982	184				304
21	2011-01-16T04:18:09	2011-01-16T16:30:09	12.2	989	-373				304
22	2011-02-02T00:00:12	2011-02-02T17:00:12	17	407	796	171		211	304
23	2011-02-03T08:58:52	2011-02-03T17:08:28	8.16	-233	175	171	193	211	
24	2011-02-04T00:00:04	2011-02-05T00:00:04	24	-940	291	171			304
25	2011-02-14T09:12:40	2011-02-14T12:23:28	3.18	784	-671				304
26	2011-02-28T04:55:22	2011-02-28T18:21:46	13.44	-697	571				304
27	2011-03-05T04:25:04	2011-03-05T09:25:04	5	770	688				304
28	2011-03-05T19:10:04	2011-03-06T00:00:04	4.83	385	-923				304
29	2011-03-17T02:18:11	2011-03-17T11:12:11	8.9	989	301				304
30	2011-03-20T00:00:04	2011-03-21T10:00:04	34	-560	755			211	304
31	2011-03-20T00:00:04	2011-03-22T09:00:04	57	887	473	171			304
32	2011-03-22T07:40:12	2011-03-23T00:00:12	16.33	914	-185	171			304
33	2011-04-26T12:20:01	2011-04-26T21:25:01	9.08	1040	127				304
34	2011-05-01T05:45:01	2011-05-01T22:20:01	16.58	898	-544	171			304
35	2011-05-02T16:55:01	2011-05-02T19:35:01	2.67	556	848			211	304
36	2011-05-14T10:20:12	2011-05-15T01:20:12	15	922	367				304
37	2011-05-19T23:45:53	2011-05-20T03:25:53	3.67	-538	908				304
38	2011-07-05T22:03:04	2011-07-06T04:42:04	6.65	992	357	171			304
39	2011-08-07T00:00:04	2011-08-08T10:20:04	34.33	-882	369				304

40	2011-08-15T00:00:04	2011-08-15T18:15:04	18.25	985	-6			211	304
41	2011-08-22T02:00:04	2011-08-22T05:20:04	3.33	-926	616	171			304
42	2011-09-07T21:42:36	2011-09-08T02:06:36	4.4	694	405				304
43	2011-09-08T20:40:04	2011-09-09T00:00:04	3.33	-965	131				304
44	2011-09-13T09:42:04	2011-09-13T17:54:04	8.2	-715	927	171			304
45	2011-09-19T10:28:04	2011-09-19T17:04:04	6.6	173	347			211	304
46	2011-10-01T00:00:04	2011-10-01T06:04:04	6.07	-680	741				304
47	2011-10-06T14:10:16	2011-10-09T00:00:16	57.83	-1031	-36	171			304
48	2011-10-06T18:50:16	2011-10-07T20:50:16	26	419	909	171		211	304
49	2011-10-06T20:10:16	2011-10-07T01:00:16	4.83	-827	611	171			304
50	2011-10-09T00:00:04	2011-10-09T03:52:04	3.87	-996	-132				304
51	2011-10-16T12:20:04	2011-10-16T14:30:04	2.17	944	-347				304
52	2011-11-01T02:26:04	2011-11-01T07:00:04	4.57	1035	340				304
53	2011-11-22T14:32:04	2011-11-22T23:48:04	9.27	641	651				304
54	2011-11-22T14:40:04	2011-11-23T00:00:04	9.33	597	663	171	193	211	
55	2011-12-05T05:06:04	2011-12-05T22:36:04	17.5	824	629	171			304
56	2011-12-06T00:00:04	2011-12-06T09:48:04	9.8	1004	250	171			304
57	2011-12-06T00:00:04	2011-12-07T00:00:04	24	822	624	171			304
58	2011-12-07T04:12:04	2011-12-08T00:00:04	19.8	-1007	-209	171			304
59	2011-12-17T00:00:04	2011-12-18T17:40:04	41.67	-929	-412	171			304
60	2012-01-13T00:00:04	2012-01-14T00:00:04	24	929	484	171		211	304
61	2012-01-19T04:15:04	2012-01-19T10:00:04	5.75	671	834				304
62	2012-02-22T19:16:04	2012-02-23T00:00:04	4.73	-1028	193	171			304
63	2012-03-12T11:40:04	2012-03-12T17:20:04	5.67	-979	341				304

64	2012-03-28T01:52:04	2012-03-28T05:58:04	4.1	-348	1027	171			304
65	2012-04-06T07:50:04	2012-04-06T12:20:04	4.5	-951	-286				304
66	2012-04-23T13:00:04	2012-04-23T17:30:04	4.5	1022	-132				304
67	2012-05-05T00:35:04	2012-05-05T11:50:04	11.25	-1057	-12				304
68	2012-06-16T11:00:04	2012-06-16T19:00:04	8	929	183	171			304
69	2012-06-19T23:00:04	2012-06-20T17:50:04	18.83	850	509				304
70	2012-06-23T23:00:04	2012-06-24T23:20:04	24.33	481	902	171			304
71	2012-08-07T23:48:04	2012-08-08T04:08:04	4.33	342	-203	171	193	211	
72	2012-08-15T01:40:04	2012-08-15T09:20:04	7.67	859	-413	171		211	304
73	2012-09-10T07:28:03	2012-09-10T14:46:03	7.3	565	-847				304
74	2012-10-15T10:20:03	2012-10-15T20:20:03	10	-1024	211	171			304
75	2012-11-16T05:00:03	2012-11-16T12:00:03	7	-551	-524				304
76	2012-12-09T16:14:03	2012-12-09T18:52:03	2.63	982	478	171			304
77	2013-01-19T09:45:03	2013-01-19T13:09:03	3.4	-1058	475				304
78	2013-04-27T08:36:03	2013-04-27T14:27:03	5.85	-677	721				304
79	2013-05-11T20:00:03	2013-05-12T01:20:03	5.33	-975	-95				304
80	2013-05-15T00:00:03	2013-05-15T05:10:03	5.17	898	-498	171			304
81	2013-05-18T07:02:03	2013-05-18T16:08:03	9.10	-949	-368				304
82	2013-05-20T00:00:03	2013-05-20T07:20:03	7.33	-896	477				304
83	2013-06-01T00:30:35	2013-06-01T03:30:35	3.00	-702	575				304
84	2013-06-17T00:40:03	2013-06-17T14:10:03	13.50	-1026	-322				304
85	2013-07-31T00:00:03	2013-07-31T12:27:03	12.45	1083	-53				304
86	2013-08-13T00:00:03	2013-08-13T12:00:03	12.00	-1018	-59				304
87	2013-08-20T03:44:03	2013-08-20T12:44:03	9.00	333	-657	171	193	211	

88	2013-10-07T05:21:35	2013-10-07T11:03:35	5.70	-709	-713	171	193	211	
89	2013-10-07T06:57:35	2013-10-07T19:51:35	12.90	696	889				304
90	2013-10-19T11:38:03	2013-10-19T22:40:03	11.03	-103	865				304
91	2013-11-12T08:42:03	2013-11-12T15:26:03	6.73	854	-570				304
92	2013-12-05T20:00:03	2013-12-05T22:00:03	2.00	-964	-390				304
93	2013-12-08T19:42:03	2013-12-09T00:00:03	4.30	-696	-560				304
94	2013-12-09T14:14:03	2013-12-09T20:28:03	6.23	-958	589				304
95	2014-01-25T00:00:03	2014-01-26T00:00:03	24.00	450	993			211	304
96	2014-01-28T03:48:03	2014-01-28T10:18:03	6.50	-1074	-115				304
97	2014-03-06T12:00:03	2014-03-07T20:00:03	32.00	1033	-19				304
98	2014-03-14T07:39:03	2014-03-14T15:48:03	8.15	865	-566				304
99	2014-03-22T06:48:03	2014-03-22T08:15:03	1.45	-961	337				304
100	2014-04-07T18:50:03	2014-04-08T00:40:03	5.83	-465	928	171		211	304
101	2014-04-11T18:00:03	2014-04-12T05:50:03	11.83	-1020	267				304
102	2014-04-30T23:00:03	2014-05-01T05:30:03	6.50	1036	249				304
103	2014-05-18T06:10:03	2014-05-18T08:40:03	2.50	1024	306	171		211	304
104	2014-07-28T05:10:35	2014-07-29T11:00:35	29.83	-1069	-115	171		211	304
105	2014-08-06T06:15:03	2014-08-06T14:54:03	8.65	1035	-104				304
106	2014-12-05T11:30:04	2014-12-05T16:10:04	4.67	647	-388		193		304
107	2015-01-11T06:44:03	2015-01-11T18:48:03	12.07	-941	235	171	193	211	304
108	2015-02-01T03:00:03	2015-02-03T04:00:03	49.00	781	-644	171			304
109	2015-03-27T06:28:03	2015-03-28T00:00:03	17.53	-911	476	171	193	211	
110	2015-06-26T00:00:03	2015-06-26T19:10:03	19.17	-1026	-39				304
110	2015-07-10T00:00:06	2015-07-10T04:28:06	4.47	650	-564	171	193	211	

112	2015-10-30T09:28:06	2015-10-30T15:40:06	6.20	791	642	171	193	211	
113	2015-11-04T00:00:06	2015-11-04T05:36:06	5.60	870	150	171	193	211	
114	2015-12-04T16:35:23	2015-12-04T18:35:23	2.00	-865	210		193		
115	2015-12-25T00:00:06	2015-12-26T00:00:06	24.00	1056	-37				304
116	2015-12-26T00:00:06	2015-12-26T22:00:06	22.00	921	-76				304
117	2016-01-01T22:20:23	2016-01-02T02:20:23	4.00	845	-410		193		
118	2016-01-16T17:00:06	2016-01-17T06:00:06	13.00	-885	517	171			
119	2016-01-29T20:00:06	2016-01-30T04:00:06	8.00	894	-379	171		211	
120	2016-02-03T00:00:06	2016-02-03T12:10:06	12.17	-916	-405				304
121	2016-02-12T11:00:06	2016-02-13T03:00:06	16.00	-1068	-26	171		211	
122	2016-02-15T00:00:06	2016-02-16T00:00:06	24.00	-909	165				304
123	2016-02-19T00:00:06	2016-02-19T13:50:06	13.83	1031	184	171			
124	2016-02-27T17:08:06	2016-02-27T22:52:06	5.73	622	414	171	193	211	
125	2016-04-03T09:20:06	2016-04-03T23:00:06	13.67	994	-111				304
126	2016-05-15T15:00:03	2016-05-16T00:00:03	9.00	928	263		193		
127	2016-05-15T16:10:11	2016-05-15T18:00:35	1.84	917	268		193		
128	2017-04-18T18:55:14	2017-04-19T02:01:14	7.10	-954	293		193		
129	2017-09-10T15:00:02	2017-09-11T01:00:02	10.00	1059	-213		193		

დანართი 2

დანართი 2-ის სახით მოცემულია ჩვენს მიერ გაკეთებული კორონული წვიმის კატალოგი, რომელშიც მოცემულია 2013 წლიდან 2018 წლამდე IRIS-ის მიერ დაკვირვებული მოვლენები. კატალოგში მოცემულია წვიმის: დაწყების დრო, დამთავრების დრო, ხანგრძლიობა საათებში, მოვლენის კოორდინატები და სპექტრული ხაზი, რომელშიც დაფიქსირდა მოვლენა.

N	დაწყების დრო	დამთავრების დრო	ხანგრძლიობა (საათი)	X	Y	IRIS - ის დაკვირვება (სპექტრული ხაზი)		
						Si IV	C II	Mg II kh
1	2013-07-22T19:45:13	2013-07-22T19:56:25	0.19	-887	-360	Si IV		
2	2013-07-28T13:39:32	2013-07-28T14:58:28	1.32	906	329			Mg II hk
3	2013-12-24T09:56:13	2013-12-24T10:36:08	0.72	964	-296	Si IV		
4	2014-02-20T20:20:03	2014-02-20T21:29:49	1.16	-994	-1		C II	
5	2014-03-13T23:48:22	2014-03-14T01:22:39	1.57	959	310	Si IV		
6	2014-03-14T03:05:02	2014-03-14T03:23:09	0.30	944	244		C II	
7	2014-03-14T11:39:46	2014-03-14T13:27:39	1.80	949	316	Si IV		
8	2014-03-14T13:42:46	2014-03-14T15:05:37	1.38	961	289	Si IV		
9	2014-03-14T15:39:57	2014-03-14T16:38:23	0.97	974	273	Si IV		
10	2014-05-06T06:35:20	2014-05-06T06:49:40	0.24	952	-133		C II	
11	2014-05-08T10:50:44	2014-05-08T15:12:25	4.36	-938	-246		C II	
12	2014-07-01T12:45:25	2014-07-01T13:11:58	0.44	-985	-219		C II	
13	2014-07-18T19:47:35	2014-07-18T22:39:56	2.87	966	165		C II	
14	2014-07-21T18:05:31	2014-07-22T03:19:27	9.23	-965	-122		C II	
15	2014-07-30T02:41:20	2014-07-30T02:52:50	0.19	380	51		C II	

16	2014-08-02T07:53:37	2014-08-02T08:17:34	0.40	-320	-233	Si IV		
17	2014-10-09T18:24:55	2014-10-09T21:57:24	3.54	818	-555			Mg II hk
18	2014-10-11T19:02:25	2014-10-11T19:55:07	0.88	-346	-384	Si IV		
19	2014-11-10T23:54:16	2014-11-11T00:10:29	0.27	111	171		C II	
20	2014-11-14T12:12:30	2014-11-14T13:06:14	0.90	-983	-243		C II	
21	2014-11-15T02:50:30	2014-11-15T03:44:14	0.90	-991	-240		C II	
22	2014-11-19T01:11:09	2014-11-19T01:34:56	0.40	-290	-276		C II	
23	2014-11-22T12:05:10	2014-11-22T12:53:16	0.80	988	147		C II	
24	2014-11-22T13:33:45	2014-11-22T14:31:41	0.97	978	140		C II	
25	2014-12-23T02:40:14	2014-12-23T03:28:11	0.80	943	-383	Si IV		
26	2015-03-08T18:44:13	2015-03-08T22:03:53	3.33	-982	33	Si IV		
27	2015-03-11T22:48:14	2015-03-12T03:47:12	4.98	-282	-194	Si IV		
28	2015-05-05T16:34:18	2015-05-05T19:05:17	2.52	-955	242		C II	
29	2015-08-07T05:01:11	2015-08-07T10:59:39	5.97	-912	-343		C II	
30	2015-08-08T13:30:57	2015-08-08T15:32:37	2.03	-892	-394	Si IV		
31	2015-09-30T08:04:07	2015-09-30T10:59:27	2.92	968	-165		C II	
32	2015-10-20T05:33:46	2015-10-20T05:40:33	0.11	918	-367	Si IV		
33	2015-12-04T10:57:08	2015-12-04T12:05:17	1.14	986	178	Si IV		
34	2015-12-04T12:34:37	2015-12-04T13:42:46	1.14	982	190	Si IV		
35	2015-12-05T16:22:46	2015-12-05T17:07:14	0.74	-970	-203	Si IV		
36	2016-01-02T10:30:21	2016-01-02T11:20:41	0.84	890	-389		C II	
37	2016-01-11T13:49:11	2016-01-11T14:46:17	0.95	930	-350		C II	
38	2016-01-11T15:39:46	2016-01-11T16:14:46	0.58	937	-331		C II	
39	2016-03-10T02:54:33	2016-03-10T03:01:07	0.11	976	224		C II	

40	2016-03-10T04:19:33	2016-03-10T07:49:09	3.49	976	212		C II	
41	2016-03-10T12:59:09	2016-03-10T15:58:51	3.00	-944	123		C II	
42	2016-04-03T00:42:05	2016-04-03T02:54:25	2.21	955	-267			Mg II hk
43	2016-04-06T11:21:41	2016-04-06T11:25:22	0.06	-968	127		C II	
44	2016-04-09T21:01:02	2016-04-09T21:19:46	0.31	-809	201		C II	
45	2016-04-10T16:28:21	2016-04-10T16:52:02	0.39	-791	214	Si IV		
46	2016-04-12T16:47:22	2016-04-12T16:52:40	0.09	-358	213			Mg II hk
47	2016-05-01T12:25:15	2016-05-01T12:50:25	0.42	979	-77	Si IV		
48	2016-05-10T07:19:44	2016-05-10T09:30:31	2.18	933	342			Mg II hk
49	2016-05-12T17:33:26	2016-05-12T21:31:44	3.97	-963	143			Mg II hk
50	2016-05-19T22:44:33	2016-05-20T03:37:36	4.88	-766	619	Si IV		
51	2016-05-19T22:45:05	2016-05-20T03:38:08	4.88	-763	620			Mg II hk
52	2016-05-25T23:16:47	2016-05-25T23:48:25	0.53	988	-111	Si IV		
53	2016-05-26T20:49:32	2016-05-26T21:42:57	0.89	957	-157	Si IV		
54	2016-05-30T22:29:10	2016-05-30T23:06:00	0.61	942	261	Si IV		
55	2016-05-31T10:07:56	2016-05-31T11:35:46	1.46	969	203	Si IV		
56	2016-06-02T09:16:39	2016-06-02T10:28:55	1.20	964	133	Si IV		
57	2016-06-02T09:24:28	2016-06-02T10:28:55	1.07	966	60	Si IV		
58	2016-06-03T07:39:09	2016-06-03T08:58:18	1.32	969	89	Si IV		
59	2016-06-03T08:25:33	2016-06-03T08:58:18	0.55	950	144	Si IV		
60	2016-06-03T09:02:09	2016-06-03T10:44:11	1.70	970	107	Si IV		
61	2016-06-04T07:29:16	2016-06-04T09:39:47	2.18	-969	278	Si IV		
62	2016-06-04T07:29:16	2016-06-04T09:39:47	2.18	-960	182	Si IV		
63	2016-06-22T14:26:32	2016-06-22T15:10:44	0.74	976	-62	Si IV		

64	2016-07-24T20:57:52	2016-07-25T02:58:37	6.01	965	83			Mg II hk
65	2016-08-20T03:10:27	2016-08-20T03:26:40	0.27	-96	68		C II	
66	2016-09-15T19:25:45	2016-09-15T22:20:17	2.91	1013	112		C II	
67	2016-09-23T05:09:11	2016-09-23T06:32:16	1.38	960	192		C II	
68	2016-10-04T20:04:01	2016-10-04T21:05:24	1.02	-972	-268			Mg II hk
69	2016-10-23T11:17:26	2016-10-23T15:01:40	3.74	990	110		C II	
70	2016-11-03T14:25:55	2016-11-03T15:26:26	1.01	982	91		C II	
71	2016-11-08T22:46:35	2016-11-08T23:38:32	0.87	969	145		C II	
72	2016-11-09T03:39:03	2016-11-09T03:55:38	0.28	971	139		C II	
73	2016-11-10T02:47:46	2016-11-10T03:22:02	0.57	971	117		C II	
74	2016-12-10T07:57:33	2016-12-10T08:55:09	0.96	1009	-123			Mg II hk
75	2016-12-10T21:25:41	2016-12-10T22:32:59	1.12	1019	-115			Mg II hk
76	2016-12-10T23:03:09	2016-12-10T23:59:41	0.94	1020	-109			Mg II hk
77	2016-12-25T12:52:21	2016-12-25T13:22:55	0.51	926	-372			Mg II hk
78	2016-12-25T13:55:22	2016-12-25T14:55:53	1.01	948	-390			Mg II hk
79	2016-12-25T15:32:50	2016-12-25T16:33:21	1.01	944	-349			Mg II hk
80	2016-12-25T17:10:18	2016-12-25T18:10:49	1.01	938	-340			Mg II hk
81	2017-01-11T15:58:13	2017-01-11T16:12:09	0.23	964	221	Si IV		
82	2017-01-29T12:33:55	2017-01-29T13:11:15	0.62	949	263	Si IV		
83	2017-01-30T04:27:13	2017-01-30T05:06:50	0.66	978	222			Mg II hk
84	2017-01-30T21:03:13	2017-01-30T21:37:07	0.57	970	233			Mg II hk
85	2017-01-30T23:59:51	2017-01-31T00:55:17	0.92	965	217			Mg II hk
86	2017-02-04T01:14:32	2017-02-04T02:07:23	0.88	922	346	Si IV		
87	2017-03-10T05:01:13	2017-03-10T09:36:13	4.58	963	306			Mg II hk

88	2017-03-14T05:40:44	2017-03-14T09:52:45	4.20	666	750			Mg II hk
89	2017-03-15T05:15:35	2017-03-15T12:33:11	7.29	903	-449			Mg II hk
90	2017-04-14T11:20:47	2017-04-14T16:54:40	5.56	950	-62			Mg II hk
91	2017-04-15T08:35:33	2017-04-15T10:26:09	1.84	980	-89			Mg II hk
92	2017-04-18T23:40:44	2017-04-19T03:35:35	3.91	-820	546			Mg II hk
93	2017-04-20T13:22:33	2017-04-20T17:17:41	3.92	-964	259	Si IV		
94	2017-05-04T00:59:28	2017-05-04T03:00:46	2.02	963	-155		C II	
95	2017-06-02T07:28:16	2017-06-02T12:55:28	5.45	-995	142			Mg II hk
96	2017-06-13T09:15:55	2017-06-13T11:15:18	1.99	976	89			Mg II hk
97	2017-06-14T08:53:21	2017-06-14T10:19:05	1.43	967	129			Mg II hk
98	2017-06-22T12:09:14	2017-06-22T16:27:34	4.31	954	224		C II	
99	2017-06-23T12:54:35	2017-06-23T15:41:44	2.79	967	242		C II	
100	2017-07-07T05:20:05	2017-07-07T07:39:08	2.32	-825	-116	Si IV		
101	2017-07-17T23:29:33	2017-07-18T03:32:00	4.04	950	-116		C II	
102	2017-07-18T07:16:26	2017-07-18T08:03:46	0.79	968	-112	Si IV		
103	2017-07-18T22:20:08	2017-07-18T22:37:21	0.29	960	-105		C II	
104	2017-07-18T23:56:52	2017-07-19T00:13:37	0.28	961	-118		C II	
105	2017-08-27T07:38:43	2017-08-27T17:24:38	9.77	954	211	Si IV		
106	2017-09-01T15:55:04	2017-09-01T22:47:44	6.88	-942	293			Mg II hk
107	2017-09-01T22:52:43	2017-09-02T03:27:43	4.58	-934	294			Mg II hk
108	2017-09-02T04:51:30	2017-09-02T14:57:15	10.10	-946	278			Mg II hk
109	2017-09-02T15:48:34	2017-09-02T19:28:29	3.67	-953	270			Mg II hk
110	2017-09-02T20:17:18	2017-09-02T21:12:21	0.92	-930	297			Mg II hk
110	2017-09-02T23:19:38	2017-09-03T04:39:23	5.33	-957	239			Mg II hk

112	2017-09-03T06:56:30	2017-09-03T12:31:24	5.58	-950	234			Mg II hk
113	2017-09-10T15:34:18	2017-09-10T19:23:28	3.82	970	-210		C II	
114	2017-09-10T19:44:11	2017-09-10T21:16:45	1.54	1002	-141		C II	
115	2017-10-03T19:59:48	2017-10-03T22:36:52	2.62	1003	-329			Mg II hk
116	2018-01-24T05:39:21	2018-01-24T06:26:00	0.78	971	-225			Mg II hk
117	2018-01-24T08:52:29	2018-01-24T09:33:36	0.69	974	-202			Mg II hk
118	2018-01-24T12:07:29	2018-01-24T12:55:58	0.81	975	-222			Mg II hk
119	2018-01-24T15:22:29	2018-01-24T16:10:58	0.81	974	-223			Mg II hk
120	2018-01-24T18:37:19	2018-01-24T19:25:48	0.81	978	-225			Mg II hk
121	2018-01-25T02:44:29	2018-01-25T03:32:58	0.81	973	-239	Si IV		Mg II hk
122	2018-02-17T01:12:09	2018-02-17T02:00:01	0.80	1013	-93	Si IV		
123	2018-02-17T02:04:21	2018-02-17T02:19:53	0.26	1003	-90			