

გიგანტური ტორნადოები მზის ატმოსფეროში

ირაკლი მღებრიშვილი

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

ფიზიკისა და ასტრონომიის სადოქტორო პროგრამა

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: თეიმურაზ ზაქარაშვილი, სრული პროფესორი.

თანახელმძღვანელი: ვასილ კუხიანიძე, ასოცირებული პროფესორი.

ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტი

თბილისი, 2019

განაცხადი

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

ირაკლი მღებრიშვილი

11.06.2019

აბსტრაქტი

მზის ატმოსფეროში მიმდინარე სხვადასხვა არასტაციონალური მოვლენები დიდ გავლენას ახდენენ მზის სისტემის პლანეტებსა და საპლანეტაშორისო სივრცეზე. ბოლო დროს გაშვებული თანამედროვე კოსმოსური მისიების ერთ-ერთ ამოცანას წარმოადგენს მზის აქტიურობის და ცვალებადობის გავლენის შესწავლა დედამიწაზე. გარეატმოსფერულმა დაკვირვებებმა მნიშვნელოვანი წვლილი შეიტანეს მზის აქტიურობის შესწავლაში, თუმცა მრავალი პრობლემა ჯერ კიდევ გადასაჭრელია. კოსმოსური ამინდის პროგნოზირებისთვის აუცილებელია შევძლოთ მზეზე მიმდინარე პროცესების წინასწარმეტყველება.

სადოქტორო დისერტაციის მთავარ თემას მზის პროტუბერანცებთან არსებული ტორნადოების დინამიკისა და მზის ამინდის პროგნოზირებაში მათი წვლილის შესწავლა წარმოადგენს. როგორც ბოლო დროს ჩატარებული კვლევებიდან ცნობილია, ტორნადოები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ პროტუბერანცის მასით მომარაგებასა და ფორმირებაში. ტორნადოების ბრუნვა შესაძლოა გახდეს პროტუბერანცებში არამდგრადი პროცესების აღმძვრელი მექანიზმი. არამდგრად ტორნადოებს შეუძლიათ გამოიწვიონ მასთან ასოცირებული პროტუბერანცის არამდგრადობა და საბოლოოდ კორონალური მასის ამოფრქვევა.

მზის ტორნადოს წარმოშობის, ევოლუციის და დინამიკის შესასწავლად, ჩვენ ავირჩიეთ ერთი კონკრეტული მოვლენა, რომელიც დაიკვირვებოდა 2012 წლის 7-8 ნოემბერს. დაკვირვებითი მონაცემები მიღებულ იქნა გარეატმოსფერული დაკვირვებებიდან, კერძოდ Solar Dynamics Observatory/ Atmosphere Imaging Assembly-დან. ტორნადოს არსებობის განმავლობაში დავაფიქსირეთ მისი ღერძის ორი კვაზი-პერიოდული რხევა სხვადასხვა სიმაღლეზე. ტორნადოს შიგნით ალვენის სიჩქარე შეფასდა როგორც 50 კმ/წმ, ხოლო მაგნიტური ველის სიძლიერე 4 გაუსი. ტორნადოს

საბოლოო ეტაპზე დაკვირვებულ იქნა არამდგრადობა, რასაც მოჰყვა მაგნიტური გადაერთება გამოწვეული მაგნიტური გარღვევის მოდელით და საბოლოოდ ტორნადოს ამოფრქვევა CME-ის სახით. კვლევის შედეგად ირკვევა, რომ ტორნადოები შესაძლოა გახდნენ არამდგრადი პროცესების აღმძვრელები თავის მასპინძელ პროტუბერანცში, რასაც შეიძლება მოყვეს მისი ამოფრქვევა, როგორც CME (Coronal Mass Ejection).

წარმოდგენილ ნაშრომში ასევე განხორციელებულია კვლევა ტორნადოებისა და CME-ის ამოფრქვევებს შორის კავშირის დასადგენად. დაკვირვება მოიცავდა ერთ სრულ წელიწადს, რის დროსაც გამოვლინდა 361 ტორნადო და ტორნადოთა ჯგუფები. დეტალურად შესწავლილი 166 ტორნადოდან, 80 (48%) წარმოადგენდა *ამოფრქვევად* ტორნადოს, 83 (50%) - *აქტიურ* ტორნადოს და მხოლოდ 3 (2%) - *მიღევად* ტორნადოს. საიდანაც შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ თითქმის ყველა ტორნადოს მსგავსი პროტუბერანცი აჩვენებს რაიმე სახის აქტიურობას, იქნება ეს ამოფრქვევა, არშემდგარი ამოფრქვევა თუ შინაგანი არამდგრადობა. მეორეს მხრივ, ტორნადოს მსგავსი პროტუბერანცების თითქმის ნახევარი ამოიფრქვა როგორც CME. მიღებული შედეგი საშუალებას გვაძლევს გამოვიყენოთ მზის ტორნადოები კოსმოსური ამინდის პროგნოზირებისთვის. CME-ის დაწყების პროგნოზირება მზის და კოსმოსური ამინდის ერთ-ერთ მთავარ ამოცანას წარმოადგენს. მძლავრმა ამოფრქვევებმა შესაძლოა დიდი ზეგავლენა მოახდინოს ჩვენს გარემოზე და ტექნოლოგიებზე. შესაბამისად, CME-ის პროგნოზირებას დიდი მნიშვნელობა აქვს კაცობრიობის მომავალი მეცნიერულ-ტექნიკური პროგრესისთვის.

ძირითადი საძიებო სიტყვები: პროტუბერანცი, ტორნადო, კორონალური მასის ამოფრქვევა.

Abstract

Powerfull instability processes in the solar atmosphere have a great influence on the Solar system planets and interplanetary environment. One of main tasks of modern space missions is to study the influence of solar activity variations on our civilization. High resolution observations from recent space missions played an important role in the study of solar activity, however many problems still remain to be solved. To predict the processes on the sun and to study their influence on the Earth are important for the forecasting of the space weather.

The subject of the thesis is to study solar tornadoes which are associated with prominences. As recent research reveals, tornadoes play a distinct role in the supply of mass and twisting filaments. Rotation of tornadoes may trigger instability processes in the solar prominences. The unstable tornadoes can destabilize associated prominence and consequently trigger CME (Coronal Mass Ejection).

We studied the formation, evolution and dynamic of a giant solar tornado, which has been observed during November 7-8, 2012. We used observational data obtained by the AIA on board SDO. Time-distance plots show two quasi-periodic patterns in the transverse displacement of the tornado axis on different heights during the whole life time of the tornado. Alfvén speed in the tornado is estimated as 50 km/s, while magnetic field strength – 4G. At the final stage the tornado became unstable, which led to the magnetic reconnection at the null point above the prominence and to the eruption of CME. According to the research, tornadoes can destabilize associated prominence, which lead to their eruption as CME.

In the presented thesis we also investigated the role of tornados in triggering of CMEs. We analyzed the data during the whole year of 2011 and detected 361 tornados and group of tornadoes. We studied 166 tornadoes in detailed, from which 80 (48%) were eruptive, 83 (50%) were active, and only 3 (2%) were quasi-quiescent. This means almost all tornado-hosting

prominences show some activity in the form of eruption, failed eruption, or internal instability. On the other hand, almost half of the tornado-hosting prominences erupted as CMEs. This results allow us to use tornadoes for forecasting of space weather. To predict the start of the CME is one of the main tasks of the solar and space weather. Powerful eruptions may have a great impact on our environment and technology. Consequently, prediction of CMEs is important for the future scientific-technical progress of humanity.

Keywords: Prominence, Tornadoes, CME.

მადლობა

მადლობას ვუხდით სადისერტაციო ნაშრომში მონაწილე ყველა პიროვნებას. განსაკუთრებული მადლიერება და პატივისცემა მსურს გამოვხატო ჩემი ხელმძღვანელის თეიმურაზ ზაქარაშვილის და თანახელმძღვანელის ვასილ კუხიანიძის მიმართ. მადლობა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნულ სამეცნიერო ფონდს (DO/233/6-310/13), ვისი დაფინანსებითაც შესრულდა სადისერტაციო ნაშრომის ნაწილი.

სარჩევი

სარჩევი.....	vii
ცხრილების ჩამონათვალი	viii
ნახაზების ჩამონათვალი.....	ix
აბრევიატურის ჩამონათვალი.....	xi
თავი 1. შესავალი.....	1
<i>1.1 მზე</i>	<i>3</i>
<i>1.2 პროტუბერანცები.....</i>	<i>7</i>
<i>1.3 ტორნადოები</i>	<i>12</i>
თავი 2. მეთოდოლოგია.....	20
<i>2.1 მზის დინამიკის ობსერვატორია.....</i>	<i>20</i>
<i>2.2 JHelioviewer.....</i>	<i>24</i>
თავი 3. ტორნადოს წარმოშობა, ევოლუცია და დინამიკა.....	26
<i>3.1 ტორნადოს რხევები.....</i>	<i>28</i>
<i>3.2 ტორნადოს როლი მასთან ასოცირებული პროტუბერანცის</i> <i>დესტაბილიზაციაში.....</i>	<i>34</i>
<i>3.3 მოკლე დასკვნა.....</i>	<i>38</i>
თავი 4. ტორნადოების კავშირი CME-ებთან.....	40
<i>4.1 ამოფრქვევადი ტორნადოები</i>	<i>45</i>
<i>4.2 აქტიური ტორნადოები</i>	<i>47</i>
<i>4.3 მილევადი ტორნადოები.....</i>	<i>49</i>
თავი 5. შედეგების ინტერპრეტაცია/დისკუსია.....	51
დასკვნა	57
სამომავლო განვითარება	58
ბიბლიოგრაფია.....	59
დანართი.....	66

ცხრილების ჩამონათვალი

ცხრილი 1. მზის ფიზიკური პარამეტრები	3
ცხრილი 2. პროტუბერანცების კლასიფიკაცია და მათი მოკლე აღწერა.....	10
ცხრილი 3. 2011 წლის განმავლობაში დაკვირვებული ტორნადოების კლასიფიკაცია	44

ნახაზების ჩამონათვალი

ნახ. 1.1 მაუნდერის ანუ პეპლების დიაგრამა	2
ნახ. 1.2 მზის აგებულება და მასზე მიმდინარე სხვადასხვა მოვლენები.....	4
ნახ. 1.3 თერმობირთვული რეაქციის ამსახველი სქემატური სურათი	5
ნახ. 1.4 მზის ზედაპირზე დაკვირვებული გრანულაცია	6
ნახ. 1.5 მზის პროტუბერანცის და ბოჭკოს გამონასახები	8
ნახ. 1.6 წყნარი პროტუბერანცი დაკვირვებული H_{α} ხაზში	9
ნახ. 1.7 მზის ტორნადოს გამონასახი.....	14
ნახ. 2.1 მზის დინამიკის ობსერვატორია და მასზე მოთავსებული ტელესკოპები.....	20
ნახ. 2.2 JHelioviewer-ის ინტერფეისი.....	25
ნახ. 3.1 ტორნადოს ჩამოყალიბება, ევოლუცია და ამოფრქვევა.....	27
ნახ. 3.2 დრო-მანძილის დიაგრამისთვის ასაგები ჭრილის მდებარეობები.....	29
ნახ. 3.3 დრო-მანძილის დიაგრამა მზის ზედაპირიდან ორ სხვადასხვა სიმაღლეზე	30
ნახ. 3.4 დრო-მანძილის დიაგრამა ჭრილი 1-ის მიხედვით.....	30
ნახ. 3.5 დრო-მანძილის დიაგრამა 2-6 ჭრილების მიხედვით	31
ნახ. 3.6 კინკ ტალღის ამსახველი სქემატური სურათი.....	33
ნახ. 3.7 CME-ს ამოფრქვევის ეტაპი დაკვირვებული LASCO/C2-ის მიერ	35
ნახ. 3.8 ტორნადოს და კორონალური ღრმულის კომპოზიტური სურათი.....	36
ნახ. 3.9 მაგნიტური გარღვევის მოდელის ამსახველი სქემატური სურათი	37
ნახ. 3.10 პროტუბერანცის ამოფრქვევის ფაზა დაკვირვებული $304 \text{ \AA}$ სპექტრულ ხაზში..	38

ნახ. 4.1 2011 წლის განმავლობაში დაკვირვებული ყველა ტორნადოს სიცოცხლის ხანგრძლივობის განაწილება.....	43
ნახ. 4.2 სიცოცხლის ხანგრძლივობის განაწილება: (a) სიცოცხლის ბოლო ეტაპამდე დაკვირვებული ტორნადოები, (b) ამოფრქვევადი ტორნადოები და (c) აქტიური ტორნადოები	43
ნახ. 4.3 ამოფრქვევადი ტორნადოს ევოლუცია და ამოფრქვევის ფაზა	46
ნახ. 4.4 აქტიური ტორნადოს დინამიკა დაკვირვებული SDO/AIA 171 და 304 Å სპექტრულ ხაზებში	48
ნახ. 4.5 მიღევადი ტორნადოს საბოლოო ეტაპი.....	50

აბრევიატურის ჩამონათვალი

AIA – Atmosphere Imaging Assembly (ატმოსფერული გამონასახების ნაკრები)

CME – Coronal Mass Ejection (კორონალური მასის ამოფრქვევა)

EUV – Extreme Ultraviolet (უკიდურესი ულტრაიისფერი)

EVE – Exreme ultraviolet Variability Experiment (უკიდურესი ულტრაიისფერი ცვალებადობის ექსპერიმენტი)

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

GPS – Global Positioning System (გლობალური პოზიციონირების სისტემა)

HEK – Heliophysics Events Knowledgebase (ჰელიოფიზიკური მოვლენათა ცოდნის ბაზა)

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

IDL – Interactive Data Language (ინტერაქტიულ მონაცემთა ენა)

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

LWS – Living With a Star (ვარსკვლავთან ერთად ცხოვრება)

MHD – Magnetohydrodynamics (მაგნიტოჰიდროდინამიკა)

PIL – Polarity Inversion Line (ნეიტრალური ხაზი)

SDO – Solar Dynamics Observatory (მზის დინამიკის ობსერვატორია)

SOHO – The Solar and Heliospheric Observatory (მზის და ჰელიოსფერული ობსერვატორია)

SST – Swedish 1-m Solar Telescope (შვედური 1 მეტრიანი ტელესკოპი)

SSW – SolarSoftWare (მზის პროგრამული უზრუნველყოფა)

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

UV – Ultraviolet (ულტრაიისფერი)

VTT – Vacuum Tower Telescope (ვაკუუმური კოშკურა ტელესკოპი)

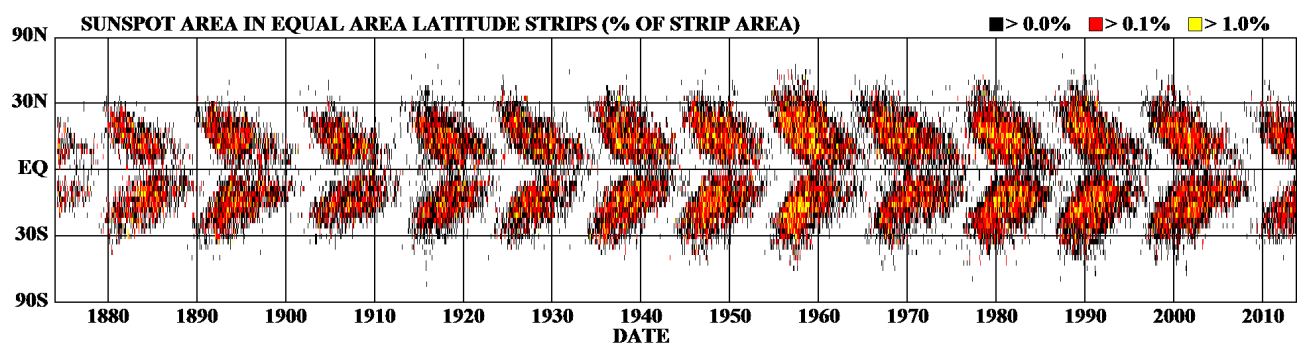
თავი 1. შესავალი

მზე ჩვენი უახლოესი ვარსკვლავია. მას ეჭირა მნიშვნელოვანი ადგილი სხვადასხვა მითოლოგიებში. მზე ასევე გვხვდება ზოგიერთი ცივილიზაციის რელიგიაში. მზე მრავალი ქვეყნის უძველეს კულტურაში ღვთაებად და ზებუნებრივ ფენომენად იყო მიჩნეული. მას ეთაყვანებოდნენ ეგვიპტელები, ინკები და აცტეკები. ყველა ეგვიპტელი ფარაონი მზის შვილის სახელს ატარებდა და დარწმუნებულები იყვნენ, რომ ისინი მზიდან იყვნენ დაშვებული.

მნიშვნელოვანი ფაქტია ისიც, რომ მეფე აიეტიც მზის შვილად იწოდებოდა. ძველი ბერძნული მითოლოგიის მიხედვით აიეტის სამშობლო დასავლეთ საქართველოს მაშინდელი დიდი სახელმწიფოებრივი გაერთიანება - კოლხეთია. აიეტის უმცროსი ასული იყო მედეა, რომელსაც, მრავალი ლეგენდებისა და ისტორიული წყაროების თანახმად სამკურნალო ბალახებისგან წამლების დამზადება და მკურნალობა შეეძლო. სწორედ მისი სახელიდან მომდინარეობს საერთაშორისო ტერმინი „მედიცინა“.

ცხადია მზე, თავისი სიდიდით და სიკაშკაშით გამოხატული ცის თაღზე, იწვევდა შიშს და აღფრთოვანებას ძველ ხალხში, რამაც გამოიწვია მისი ამგვარად გაკულტება. ამ დროისთვის ჩვენთვის უკვე კარგად ცნობილია, რომ ჩვენი პლანეტა - დედამიწა იმყოფება მზის სისტემაში, რომლის ცენტრში მდებარეობს მზე და ჩვენ დანარჩენ 7 პლანეტასთან ერთად ვმოძრაობთ მის გარშემო. მზე ერთ-ერთ უმნიშვნელოვანეს როლს თამაშობს დედამიწაზე სიცოცხლისთვის აუცილებელი გარემოს შექმნაში. რაც შეეხება მზის გამოსხივებას იგი წარმოადგენს დედამიწაზე ენერგიის და სიცოცხლის წყაროს. ის ქმნის ისეთ ტემპერატურულ კლიმატს ჩვენს პლანეტაზე რაც აუცილებელია ადამიანის არსებობისთვის. ამასთანავე მზის სინათლის შთანთქმის შედეგად ხდება მცენარეებში ფოტოსინთეზი, რაც გვამღევს სიცოცხლისთვის ყველაზე აუცილებელ ელემენტს - ჟანგბადს. თუმცა ყველა ზემოთ ჩამოთვლილ წყალობასთან ერთად, მზეს შეუძლია დიდი ზიანის მოტანა დედამიწისთვის მასში მიმდინარე არასტაციონალური პროცესების მეშვეობით.

მზეს სხვა ვარსკვლავების მსგავსად ახასიათებს მაგნიტური აქტივობა. ის წარმოქმნის ძლიერ, ცვალებად მაგნიტურ ველს, რომელიც იწვევს მზის აქტივობის პერიოდულ ცვლილებებს, რაც მის 11 წლიან ციკლში აისახება. ტრადიციულად ციკლის ფაზები იზომება მზის ზედაპირზე დაკვირვებული მზის ლაქების რაოდენობით. პერიოდულობა აღმოჩენილი იქნა 1843 წელს შვაბეს (Schwabe) მიერ. მზის ლაქებზე დაკვირვებით დადგინდა, რომ ისინი ჩნდებიან ციკლის დასაწყისში შუა განედებზე და თანდათანობით გადადიან ეკვატორისკენ. ამ მოვლენას შპიორერის კანონი (Spörer's Law) ეწოდება და კარგად დაიკვირვება მაუნდერის ანუ პეპლების დიაგრამაზე (იხ. ნახ. 1.1). მზის აქტივობის გამოვლინებებია: მზის ლაქები (Sunspots), მზის ანთებები (Flare), კორონალური მასის ამოფრქვევები (Coronal Mass Ejection - CME) და სხვა. მზის ატმოსფეროში მიმდინარე ყველა ამ მოვლენის დაკვირვებას და შესწავლას დიდი მნიშვნელობა აქვს იმ ზეგავლენის გამოკვლევისთვის, რასაც იგი ახდენს მზის სისტემის პლანეტებსა და საპლანეტთაშორისო სივრცეზე. მზის ანთებებიდან და კორონალური მასის ამოფრქვევებიდან წამოსულ მაღალ ენერგეტიკულ ნაწილაკებს შეუძლიათ საფრთხე შეუქმნან ტელესაკომუნიკაციო თანამგზავრებს, გლობალურ პოზიციონერების სისტემებს (GPS) და ასტრონავტებს. შესაბამისად, კოსმოსური ამინდის (Space Weather) პროგნოზირებისთვის აუცილებელია შევძლოთ მზეზე მიმდინარე პროცესების წინასწარმეტყველება და მისი ზეგავლენის შესწავლა დედამიწის ატმოსფეროზე.



ნახ. 1.1 მაუნდერის ანუ პეპლების დიაგრამა აჩვენებს თუ როგორ გადაადგილდებიან დროში მზის ლაქები შუა განედებიდან ეკვატორისკენ. ჰორიზონტალურ ღერძზე ნაჩვენებია დრო, ხოლო ვერტიკალურზე განედი (<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e1/Sunspot-bfly.gif>).

ამ თავში ჩვენ განვაგრძობთ მზის მიმოხილვას და შემდგომ უფრო კონკრეტულად აღვწერთ პროტუბერანცებს და ტორნადოებს. წარმოვაჩენთ დღემდე არსებული კვლევების ძირითად შედეგებს და წამოვჭრით ამ სფეროში ჯერ კიდევ გადაუჭრელ პრობლემებს. აღვწერთ სადისერტაციო კვლევის მიზნებს და იმ საკვლევ პრობლემებს, რის გადაჭრასაც ემსახურება მიმდინარე ნაშრომი.

1.1 მზე

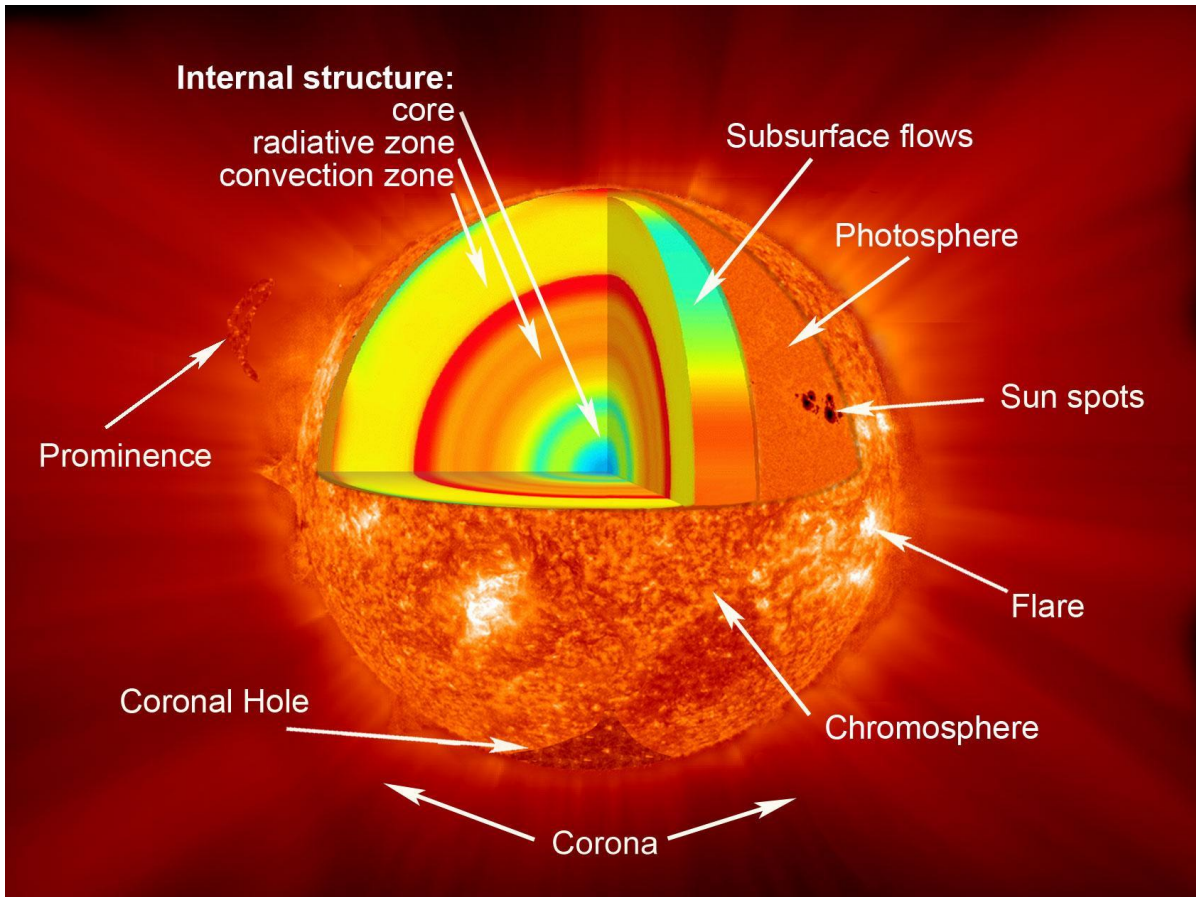
მზის სიახლოვე საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ უამრავი დაკვირვებითი მონაცემი როგორც დედამიწიდან, ასევე გარეატმოსფერული ტელესკოპებით. ჩვენ საშუალება გვაქვს დავაკვირდეთ მზის ატმოსფეროში ისეთ მოვლენებს, რომელთა დანახვაც სხვა ვარსკვლავზე სიშორის გამო შეუძლებელია. შესაბამისად მზის შესწავლა მნიშვნელოვან ინფორმაციას გვაძლევს არა მარტო მზის ფიზიკაში არამედ ზოგადად ასტრონომიაში.

ცხრილი 1. მზის ფიზიკური პარამეტრები.

მასა	1.99×10^{30} კგ
რადიუსი	6.955×10^8 მ
საშუალო დაშორება დედამიწიდან	1.496×10^{11} მ
ეფექტური ტემპერატურა	5785 კელვინი
საშუალო სიმკვრივე	1.4×10^3 კგ მ ⁻³
გამოსხივება	3.86×10^{26} ვტ
ზედაპირის გრავიტაცია	274 მ წმ ⁻²
მასის კარგვის წილი	10^9 კგ წმ ⁻¹

მზე წარმოადგენს G2V სპექტრული ტიპის მთავარი მიმდევრობის ვარსკვლავს. ცხრილი 1.-ში მოყვანილია მისი მთავარი ფიზიკური პარამეტრები (Priest, 2014). მზის აგებულების მარტივად აღსაწერად ჩვენ შეგვიძლია ის განვიხილოთ ორ ნაწილად,

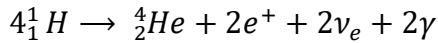
როგორც მზის შიდა სტრუქტურა და ატმოსფერო. თავის მხრივ მზის შიდა სტრუქტურა იყოფა სამ არედ: მზის ცენტრალური გული, სხივური გარსი და კონვექციური გარსი. ხოლო ატმოსფერო მოიცავს: ფოტოსფეროს, ქრომოსფეროს და კორონას. ნახ. 1.2-ზე ნაჩვენებია მზის აგებულება და მისი ფენები. თეთრი ისრებით ნაჩვენებია ასევე მზის ფენებში მიმდინარე სხვადასხვა მოვლენები, კერძოდ: კორონალური ხვრელები (Coronal Hole), ანთებები (Flare), მზის ლაქები (Sun spots) და პროტუბერანცები (Prominence).



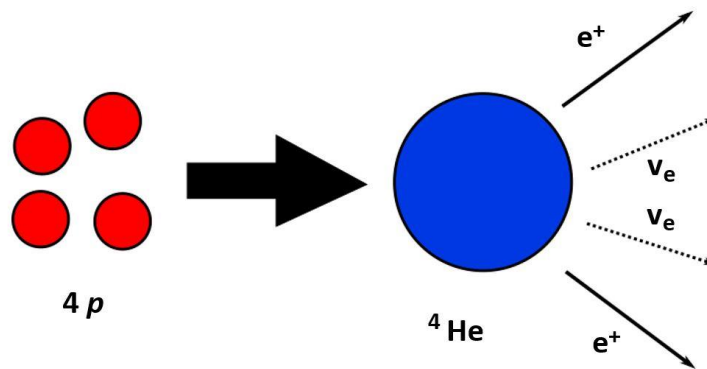
ნახ. 1.2 მზის აგებულება და მასზე მიმდინარე სხვადასხვა მოვლენები (https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/Sunlayers.html).

მზის გულში წარმოიქმნება ენერგია პროტონ-პროტონული ჯაჭვის რეაქციების შედეგად. ამ არეში თერმობირთვული რეაქციების მეშვეობით ხდება წყალბადის გარდაქმნა ჰელიუმად, რის დროსაც გამოთავისუფლდება ენერგია. რეაქციების შედეგად 4 წყალბადის ბირთვი წარმოქმნის ერთ ჰელიუმის ბირთვს. სქემატური სურათი

თერმობირთვული რეაქციის წარმოდგენილია ნახ. 1.3-ზე, ხოლო შესაბამისი ფორმულა შემდეგნაირად იწერება:



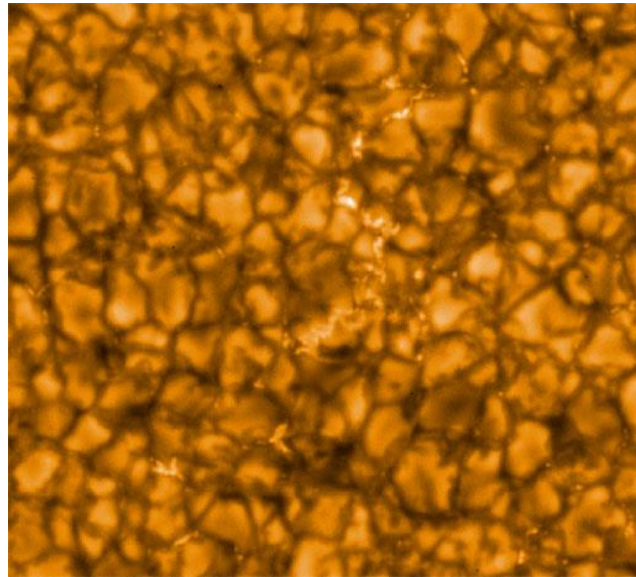
სადაც H წარმოადგენს წყალბადის ბირთვს, He - ჰელიუმის ბირთვს, e^+ - პოზიტრონს, ν_e - ელექტრონულ ნეიტრინოს და γ - გამა ქვანტს. მზის გული $0.25 R_{\odot}$ -ია და მისი ცენტრის ტემპერატურა 15 მილიონ კელვინამდე აღწევს, ხოლო სიმკვრივე არის $1.6 \times 10^5 \text{ კგ მ}^{-3}$. მზის ბირთვში წარმოქმნილ ფოტონებს ვაკუუმში გავრცელებისას დაახლოებით 2 წამი დაჭირდებოდათ, რომ მიეღწიათ ზედაპირამდე, თუმცა მზის წიაღში მრავალი დაჯახებების (შთანთქმა და კვლავ გამოსხივების) გამო, მათი მოგზაურობა გრძელდება დაახლოებით 170 000 წელი (Mitalas and Sills, 1992).



ნახ. 1.3 თერმობირთვული რეაქციის ამსახველი სქემატური სურათი.

სხივური გარსი მდებარეობს $0.25 R_{\odot}$ -დან $0.7 R_{\odot}$ შუალედში. სწორედ ამ ზონაში ხდება თერმობირთვული რეაქციების შედეგად წარმოქმნილი ენერგიის გადატანა შთანთქმისა და გამოსხივების საშუალებით მზის ზედაპირზე. სხივურ გარსში ტემპერატურა და სიმკვრივე კლებულობს მზის გულთან შედარებით. სხივური გარსს შემდგომ მოსდევს კონვექციური გარსი, რომელიც აღწევს მზის ზედაპირამდე. კონვექციურ გარსში ხდება ენერგიის გადატანა კონვექციის საშუალებით. ნივთიერების ცხელი მასები ადიან მზის ზედაპირზე, ცივდებიან და უკან ბრუნდებიან. სწორედ ამ მოვლენას ასახავს გრანულაცია, რომელიც დაიკვირვება მზის ზედაპირზე კონვექციური უჯრედების სახით. გრანულაციის ამსახველი სურათი ნაჩვენებია ნახ. 1.4-ზე.

კონვექციურ გარსს მის ქვედა ფენებთან განსხვავებით ახასიათებს დიფერენციალური ბრუნვა. ასევე უნდა აღინიშნოს თხელი შრე - ტახოკლინი (Tachochline), რომელიც მდებარეობს სხივური გარსსა და კონვექციურ გარს შორის. ამ ფენაში ძლიერდება მაგნიტური ველი მზის დინამოს საშუალებით (Parker, 1955).



ნახ. 1.4 Hinode SOT-ის (Solar Optical Telescope) მიერ მზის ზედაპირზე დაკვირვებული გრანულაცია (https://www.nasa.gov/mission_pages/hinode/solar_013.html).

მზის იმ ნაწილს საიდანაც ფოტონები თავისუფლად ვრცელდებიან კოსმოსში ატმოსფერო ეწოდება. ფოტოსფერო წარმოადგენს ატმოსფეროს ყველაზე ქვედა ფენას, რასაც ჩვენ მზის ზედაპირს ვუწოდებთ. მისი სისქე დაახლოებით 500 კმ-ია, ხოლო ტემპერატურა 6500 გრადუსი. ძირითადი ინფორმაცია მზის ქიმიური შემადგენლობის შესახებ მიღებული გვაქვს სწორედ ფოტოსფეროს დაკვირვების შედეგად. ამ ფენაში დაიკვირვება ინტენსიური 5 წუთიანი რხევები (Leighton et al. 1962), რომლებიც წარმოადგენენ მდგარ რეზონანსულ ბგერით ტალღებს. ამ ტალღების შესწავლის მეშვეობით ჰელიოსეისმოლოგია იკვლევს მზის შინაგან სტრუქტურას.

ფოტოსფეროს შემდგომ მოდის 2 000 კმ სისქის ფენა ქრომოსფერო, რომლის ტემპერატურაც სიმაღლის მატებასთან ერთად თანდათანობით იზრდება 25 000 გრადუსამდე, ხოლო სიმკვრივე მცირდება. ქრომოსფეროში ყველაზე გავრცელებული სტრუქტურებია სპიკულები, რომლებიც წარმოადგენენ მკვრივი და ცივი მასის დინებებს

ცხელ და გაუხშოებულ კორონაში (Roberts, 1945). სპიკულები ფოტოსფეროს აკავშირებენ კორონასთან და მიიჩნევა, რომ მათ გადააქვთ ენერგია და ნივთიერება, რასაც შესაძლოა წვლილი შეჰქონდეს კორონის გაცხელებაში.

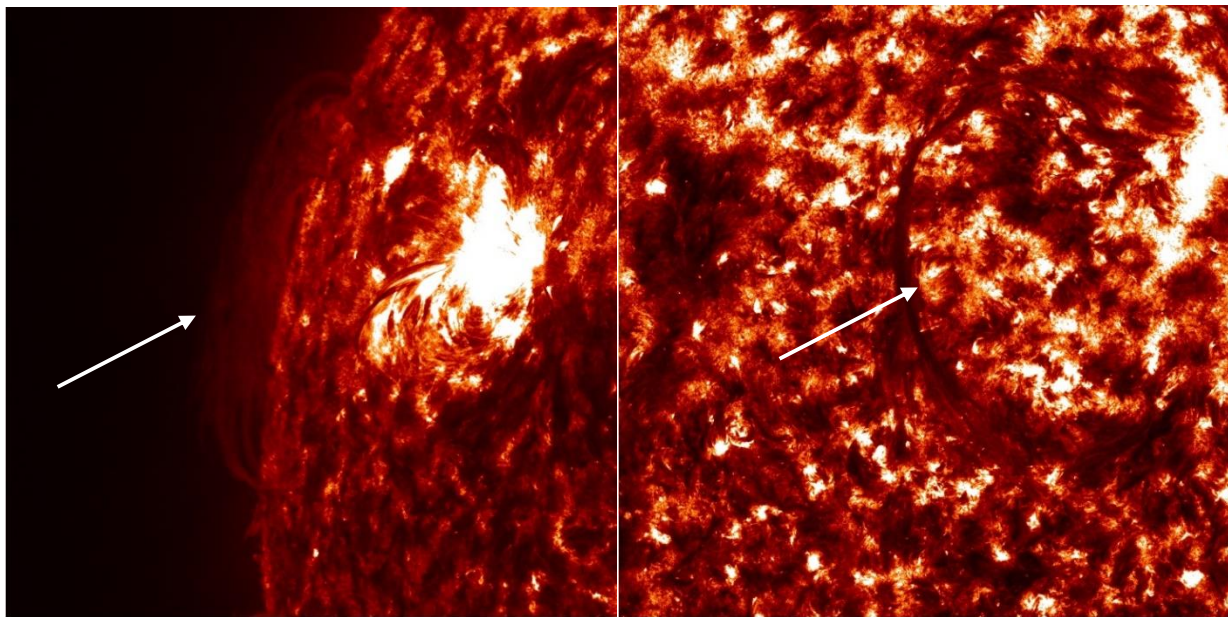
მზის ატმოსფეროს ბოლო ფენაა კორონა (გვირგვინი), სადაც ტემპერატურა მილიონ გრადუსამდე იზრდება. კორონის ამგვარი გაცხელება ერთ-ერთ მთავარ პრობლემად რჩება მზის ფიზიკაში. კორონის დაკვირვება ოდითგანვე იყო შესაძლებელი მხოლოდ მზის დაბნელებების დროს, თუმცა ეს შეზღუდვა 1930 წელს კორონოგრაფის შექმნამ მთლიანად მოხსნა. კორონაში დაიმზირება სხვადასხვა მოვლენები, კერძოდ: მზის ქარი, კორონალური მარყუქები, კორონალური ხვრელები, პროტუბერანცები და სხვა. მზე შედგება საკმაოდ რთული სტრუქტურისგან, სადაც სხვადასხვა ფენები ერთმანეთთან მჭიდროდ არიან დაკავშირებული. შესაბამისად მის შესასწავლად და ერთიანი სურათის მისაღებად აუცილებელია მის სხვადასხვა ფენებში მიმდინარე მოვლენების საფუძვლიანად შესწავლა.

1.2 პროტუბერანცები

პროტუბერანცები წარმოადგენენ ცივი და მკვრივი პლაზმის ღრუბლებს, რომლებიც მაგნიტური ველის საშუალებით ჩერდებიან ცხელ კორონაში (Priest, 1989; Tandber-Hanssen, 1995; Parenti and vial, 2007; Labrosse et al. 2010; Mackay et al. 2010). ისინი მზის კიდეზე დაიკვირვებიან როგორც კაშკაშა ობიექტები, ხოლო მზის დისკზე როგორც შავი სტრუქტურები და შესაბამისად მათ ბოჭკოებს ვუწოდებთ. ნახ. 1.5-ზე ნაჩვენებია თუ როგორ დაიკვირვებიან ორივე შემთხვევაში პროტუბერანცები. კორონულ ტემპერატურის მქონე სპექტრულ ხაზებში პროტუბერანცები დაიკვირვებიან მუქად, შესაბამისად ამ ობიექტებს უნდა ახასიათებდეს უფრო დაბალი ტემპერატურა ვიდრე გარემომცველ კორონას. ზოგადად პროტუბერანცების ტემპერატურა უდრის $\approx 10^4$ K, ხოლო სიმკვრივე $10^9 - 10^{11} \text{ სმ}^{-3}$ (Labrosse et al. 2010). მზის ბოჭკოები ყოველთვის დაიკვირვება

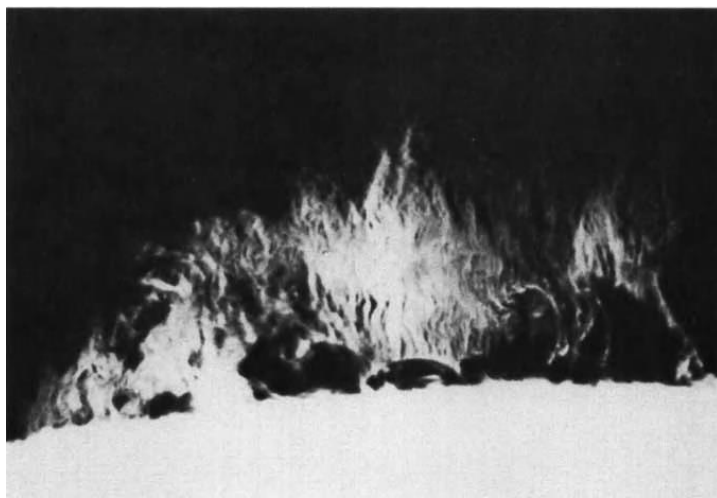
ნეიტრალური ხაზის (Polarity Inversion Line, PIL) ზემოთ, რომელიც ფოტოსფეროს მაგნიტური ველის საპირისპირო პოლარობებს ერთმანეთისგან ყოფს.

პროტუბერანცებს აკვირდებოდნენ მზის დაბნელებების დროს და შესაბამისად ეს ობიექტები დიდი ხანია ცნობილია. თუმცა ისინი რომ მზის წარმონაქმნები იყო და არა მეტეოროლოგიური ფენომენი ცხადი გახდა მხოლოდ 1860 წლის მზის დაბნელების დროს, როდესაც ფოტოგრაფია პირველად იყო წარმოდგენილი (Foukal, 2004). სპექტროსკოპიის განვითარების შემდგომ პროტუბერანცებს პირველად დააკვირდნენ 1868 წელს ყვითელ D_3 ხაზში $5877 \text{ \AA}$ ტალღის სიგრძეზე (Janssen, 1869; Secchi, 1870). პროტუბერანცები ძირითადად შედგებიან წყალბადის და ჰელიუმისგან, ისევე როგორც დანარჩენი მზე. შესაბამისად მათ დასაკვირვებლად ყველაზე ხელსაყრელია ინსტენსიური წყალბადის ლაიმანის და ბალმერის სერიები.



ნახ. 1.5 მზის პროტუბერანცი დაკვირვებული AIA/SDO-ს მიერ $171 \text{ \AA}$ ტალღის სიგრძეზე. ორივე სურათზე ნაჩვენებია ერთი და იგივე პროტუბერანცი. პირველი სურათი გადაღებულია 2012 წლის 5 იანვარს 06:00 UT დროს, სადაც მოვლენას ვაკვირდებით მზის კიდეზე და შესაბამისად პროტუბერანცს ვუწოდებთ. მეორე სურათი გადაღებულია 10 იანვარის 06:00 UT სადაც პროტუბერანცი მზის ბრუნვის გამო უკვე მზის დისკზე დაიკვირვება შავი გრძივი ხაზის სახით და ამ შემთხვევაში მას ბოჭკოს ვუწოდებთ. თეთრი ისრებით ნაჩვენებია პროტუბერანცის/ბოჭკოს მდებარეობები.

ზოგადად, პროტუბერანცები ძალიან განსხვავდებიან ერთმანეთისგან სხვადასხვა თვისებებით და მათი კლასიფიცირება შესაძლებელია მოხდეს განსხვავებული ხასიათით: აქტიურობით, მორფოლოგიით, მდებარეობით და მაგნიტური ველის სიძლიერით. თუმცა, ძირითადად განიხილავენ ორი ტიპის პროტუბერანცებს, იმის მიხედვით თუ რა ადგილას წარმოიშვებიან ისინი მზის ზედაპირზე, ესენია - *აქტიური* (Active) და *წყნარი* (Quiescent) პროტუბერანცები. *წყნარი პროტუბერანცები* წარმოიშვებიან წყნარი მზის ადგილას და ითვლება რომ ისინი ცოცხლობენ დიდხანს (რამდენიმე კვირა) მზის ზედაპირზე თუ მასთან ახლოს მდებარე რაიმე მოვლენამ არ გამოიწვია მათი შემფოთება/ამოფრქვევა. *წყნარი პროტუბერანცებს* ყველგან შევხვდებით მზის ზედაპირზე, მათ შორის მზის პოლუსებთან ახლოსაც. აქტიურ რეგიონებში მყოფ პროტუბერანცებს ეწოდებათ *აქტიური პროტუბერანცები*. ისინი ცოცხლობენ გაცილებით ცოტა ხანს ვიდრე *წყნარი პროტუბერანცები* და ახასიათებთ ძლიერი ამოფრქვევა, რის დროსაც შეუძლიათ აღძრან ორ მარყუჟიანი ანთებები (two-ribbon flare). *წყნარი პროტუბერანცები* არიან უფრო დიდი ზომის და გააჩნიათ სუსტი მაგნიტური ველი ვიდრე *აქტიურ პროტუბერანცებს*, შესაბამისად მათი ამოფრქვევა ყოველთვის არ იწვევს ანთებებს, თუმცა ამოფრქვევის ძირითადი მაგნიტური პროცესები ორივე ტიპისთვის ერთნაირად დამახასიათებელი უნდა იყოს. ერთ-ერთი *წყნარი პროტუბერანცის* H_{α} სურათი წარმოდგენილია ნახ. 1.6-ზე.



ნახ. 1.6 *წყნარი პროტუბერანცი* დაკვირვებული H_{α} ხაზში (Sacramento Peak Observatory photograph).

Pettit-მა (1925, 1932) ერთ-ერთმა პირველმა მოახდინა პროტუბერანცების კლასებად დაყოფა. მან თავის ნაშრომში პროტუბერანცებიდან გამოყო 5 სხვადასხვა ტიპი, სადაც შედიოდა ტორნადოს მსგავსი პროტუბერანცებიც. ეს კლასიფიკაცია ნაჩვენებია ცხრილი 2.-ის სახით.

ცხრილი 2. პროტუბერანცების კლასიფიკაცია და მათი მცირე აღწერა.

კლასი	სახელი	აღწერა
I	აქტიური	ჩნდებიან მზის ლაქების სიახლოვეს
II	ამოფრქვევადი	მიემართებიან მაღლა მეტ-ნაკლებად ვერტიკალური მიმართულებით
III	რგოლური	ხშირად აქვს შეკრული მარყუჟის ფორმა
IV	ტორნადო	დაიკვირვებიან ვერტიკალური სპირალის ან მჭიდროდ დაგრეხილი თოკის მსგავსად
V	წყნარი	განიცდის მხოლოდ მცირე ცვლილებებს დროთა განმავლობაში

პროტუბერანცებს არ ახასიათებთ ერთგვაროვანი მორფოლოგიური ფორმა და ყველა მათგანი განსხვავდება ერთმანეთისგან. მზის დისკზე H_{α} და He II სპექტრულ ხაზებში ბოჭკოებზე დაკვირვების დროს საშუალება გვაქვს დავაფიქსიროთ წვრილი მუქი ხერხემალი (Spine), რომელიც ჰორიზონტალურად დაკიდებულია სტრუქტურის ღერძებზე. მხედველობის ველის დახრის კუთხის გათვალისწინებით ზოგიერთ შემთხვევაში ვაკვირდებით პროტუბერანცის საყრდენებს (Barbs), რომლებიც მოთავსებულნი არიან პროტუბერანცის ხერხემლიდან მზის ზედაპირამდე. პროტუბერანცზე დაკვირვებების დროს შთაბეჭდილება რჩება, რომ პროტუბერანცი ამ საყრდენებზე დგას. ზოგიერთ შემთხვევაში ერთ დიდ პროტუბერანცს გააჩნია რამდენიმე საყრდენი. ზოგჯერ ხდება, რომ პროტუბერანცის ხერხემალს ვერ ვაფიქსირებთ

გარკვეული მიზეზების გამო და რჩება შთაბეჭდილება რომ დაკვირვებული საყრდენები ინდივიდუალურ პროტუბერანცს წარმოადგენს.

პროტუბერანცების საყრდენები არ წარმოადგენს ერთიან სტრუქტურას და ის შედგება მრავალი ძაფებისგან (Threads) შემდგარი სისტემისგან. შვედური 1 მეტრიანი მზის ტელესკოპის (Swedish 1-m Solar Telescope – SST; Scharmer et al. 2003) H_{α} ფილტრში დაკვირვებულმა მონაცემების ანალიზმა აჩვენა, რომ ამ ძაფების სიგანე მერყეობს 150 – 450 კმ-ის შუალედში (Lin et al. 2005, 2008). შესაძლოა სიგანე გაცილებით ვიწროც იყოს, თუმცა 150 კმ ამ შემთხვევაში ინსტრუმენტის გარჩევის ზღვრულ სიდიდეს წარმოადგენს. ზოგადად პროტუბერანცის სიგანე არის 5 000 – 15 000 კმ, სიმაღლე შეადგენს 15 000 – 100 000 კილომეტრს, ხოლო მზის ზედაპირზე ისინი გადაჭიმულნი არიან 60 000 – 600 000 კმ-ის სიგრძეზე.

პროტუბერანცები ძალიან დინამიური სტრუქტურებია და ახასიათებთ ნივთიერებათა დინებები. ეს დინებები კარგად დაიკვირვება ელექტრომაგნიტური გამოსხივების სხვადასხვა უბანში და მათ შესწავლას დიდი მნიშვნელობა აქვს პროტუბერანცის ჩამოყალიბების და სტაბილურობის შესასწავლად. მზის კიდეზე მდებარე წყნარ პროტუბერანცებზე H_{α} ფილტრში კარგად დაიკვირვება ვერტიკალური აღმავალი და დაღმავალი დინებები (Berger et al. 2008). ამ დინებების სიჩქარე მერყეობს 2-35 კმ/წმ შუალედში, მაშინ როდესაც უკიდურეს ულტრაიისფერ გამოსხივებაში დაკვირვებული დინებების სიჩქარე ოდნავ უფრო მეტია. რასაკვირველია, აქტიურ პროტუბერანცებში ეს სიჩქარეები გაცილებით დიდია და 200 კმ/წმ აღწევს. გარდა პლაზმის აღმავალი და დაღმავალი მოძრაობისა, პროტუბერანცებს ახასიათებს მრავალი ტიპის რხევა (Arregui et al. 2012). თავდაპირველად დააფიქსირეს მაღალი ამპლიტუდის მქონე რხევები, რომლებიც გამოწვეული იყო ახლოს მდებარე ანთების შემფოთებით. თუმცა მოგვიანებით დედამიწიდან დაკვირვებულ იქნა მცირე ამპლიტუდის მქონე რხევებიც (Harvey. 1969).

პროტუბერანცის რხევები რომლებიც 20 კმ/წმ-ზე მეტია წარმოადგენენ მაღალი ამპლიტუდის რხევებს და ითვლება რომ გამოწვეულია მორეტონის ტალღებით (Moreton

waves; Ramsey and Smith. 1966), EIT ტალღებით (Okamoto et al. 2004), ახლოს მდებარე ანთებებით (Jing et al. 2003; Vršnak et al. 2007) ან პროტუბერანცთან ახლოს აღმოცენებული ახალი ნაკადებით (Isobe and Triphati. 2006). ზოგიერთ შემთხვევაში ეს რხევები ასევე გამოწვეულია პროტუბერანცის ამოფრქვევის ფაზაში ყოფნისას (Isobe and Triphati. 2006; Isobe et al. 2007). მეორე მხრივ, მცირე ამპლიტუდის მქონე რხევებს არ გააჩნიათ რაიმე აღმძრავი მექანიზმი და ისინი უფრო ხშირად დაიკვირვება პროტუბერანცის ძაფებში (Oliver and Ballester. 2002; Lin et al. 2005, 2007, 2009; Mackay et al. 2010).

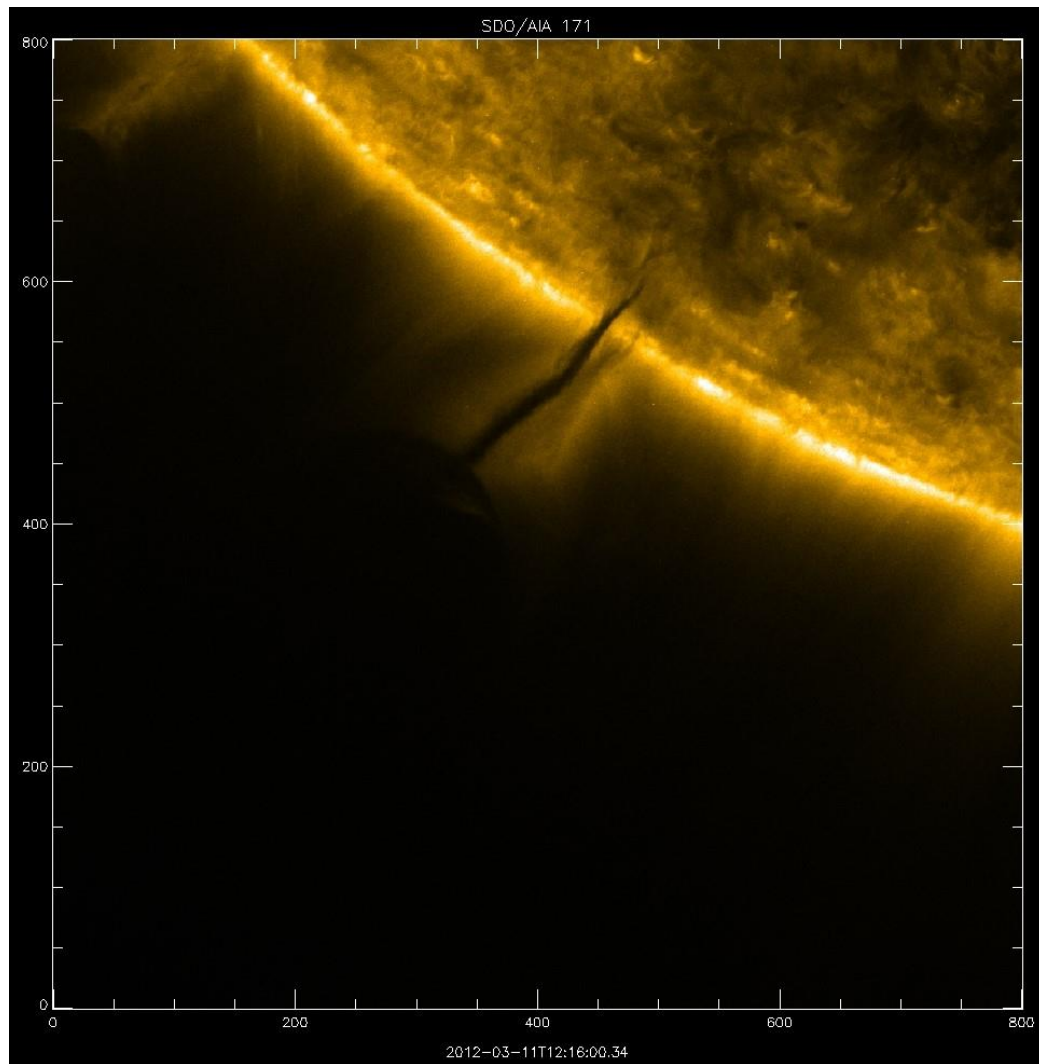
სპექტრული მონაცემების ანალიზის შედეგად Chen et al. (2008) აღმოაჩინა, რომ პროტუბერანცი განიცდიდა გრძელ პერიოდიან რხევას, სანამ საბოლოოდ არ ამოიფრქვა. შედეგად ავტორები ვარაუდობენ რომ პროტუბერანცის რხევები შესაძლოა განვიხილოთ CME-ს აღმძვრელ პროცესად, ვინაიდან შემფოთებებს შეუძლიათ პროტუბერანცის რხევის გამოწვევა. CME-ები და პროტუბერანცების ამოფრქვევები მჭიდრო კავშირშია ერთმანეთთან (Gopalswamy et al. 2003; Jing et al. 2004; Chen 2011), როდესაც ამოფრქვევადი პროტუბერანცი ხდება CME-ს კაშკაშა ბირთვი, ხოლო დარჩენილი ნაწილი უკან ეშვება მზის ზედაპირზე.

1.3 ტორნადოები

ტერმინი „მზის ტორნადო“ (Zöllner, 1869; Pettit, 1925, 1932, 1950) ეწოდება მზეზე დაკვირვებულ მოვლენას, რომელიც გამოიყურება დედამიწის ტორნადოს მსგავსად. მზის კიდეზე დაკვირვებული ეს მოვლენა ძალიან წააგავს დედამიწაზე მომხდარ ტორნადოებს, თუმცა მათში მიმდინარე ფიზიკური პროცესები ერთმანეთისგან განსხვავდება. დედამიწის ანალოგებისგან განსხვავებით მზის ტორნადოებში დომინირებს მაგნიტური ველი, რაც მნიშვნელოვან როლს ასრულებს ამ ობიექტებში მიმდინარე ფიზიკურ პროცესებში. როგორც ზემოთ ვახსენეთ, პროტუბერანცების კლასიფიკაცია პირველად მოახდინა Pettit-მა, სადაც შედიოდა ტორნადოს მსგავსი პროტუბერანცებიც. ის ამ

მოვლენას აღწერს როგორც: „ვერტიკალური სპირალი ან მჭიდროდ დაგრეხილი თოკი“. მას შემდეგ რამდენიმე ათეული წლების განმავლობაში ამ ობიექტების კვლევა ფაქტიურად შეჩერებული იყო. ტორნადოების კვლევა განახლდა ბოლო წლების განმავლობაში, მას შემდეგ რაც გაეშვა სხვადასხვა კოსმოსური ტელესკოპები. მე-20 საუკუნის დასაწყისში მიმდინარეობდა ძირითადად მხოლოდ სპექტროსკოპული დაკვირვებები და შესაბამისად არ არსებობდა სრული ინფორმაცია ტორნადოების შესახებ. ტელესკოპების და მიმღებების განვითარებამ საშუალება მოგვცა დავაკვირდეთ მზის ატმოსფეროს სხვადასხვა ფენას ულტრაიისფერ უბანში, რაც საშუალებას გვაძლევს შევისწავლოთ ტორნადოები მზის ზედაპირიდან დაშორებულ სხვადასხვა სიმაღლეზე. ულტრაიისფერი გამოსხივება დედამიწიდან ფაქტიურად დაუმზერადია, ატმოსფეროს მიერ მისი შთანთქმის გამო, ამიტომ იგი ძირითადად რეგისტრირდება ხელოვნურ თანამგზავრებზე მოთავსებული აპარატურის საშუალებით. ნახ. 1.7-ზე წარმოდგენილია მზის ტორნადოს გამონასახი დაკვირვებული SDO/AIA-ის მიერ 171 Å ტალღის სიგრძეში, სადაც ტორნადო ჩანს მზის კიდეზე შავი სტრუქტურის სახით.

ტორნადოები, რომლებიც სადისერტაციო კვლევის ობიექტებს წარმოადგენენ დაკავშირებულები არიან პროტუბერანცებთან და მათ სხვაგვარად მზის ტორნადოებს და/ან გიგანტურ ტორნადოებსაც უწოდებენ. არსებობს ასევე მცირე ზომის მაგნიტური ტორნადოები, რომელთაც პირდაპირ ვერ ვაკვირდებით და მათ ანაბეჭდებად უნდა ჩავთვალოთ ქრომოსფერული მორევები, რომლებიც ბეჭდის ან ნახევარკალის მსგავს ფორმად დაიკვირვება. მაგნიტური ტორნადოები სავარაუდოდ ყალიბდება მზის ფოტოსფერული გრიგალების საშუალებით, რომლებიც ხშირად ჩანს როგორც დაკვირვებისას, ასევე რიცხვით დათვლებში (Stein and Nordlund 1998; Bonet et al. 2008, 2010; Wedeneyer-Böhm et al. 2009, 2012; Steiner et al. 2012). მცირე ზომის მაგნიტური ტორნადოები შესაძლოა წარმოადგენდნენ ენერგიის გადატანის ალტერნატიულ მექანიზმს მზის ატმოსფეროს ქვედა ფენებიდან ზედა ფენებზე. მზის ტორნადოების ამ ორ კატეგორიას შორის კავშირი ჯერ კიდევ არ არის ცნობილი.



ნახ. 1.7 დაკვირვებული მზის ტორნადო 2012 წლის 11 მარტს SDO/AIA 171 Å-ის მიერ.

მზის ტორნადოების პირველი ფოტოგრაფირება ეკუთვნის Pettit-ს. მან თავის გადაღებული გამონასახების დროითი სერიების მეშვეობით გამოითვალა ტორნადოს მსგავსი პროტუბერანცის ბრუნვის სიჩქარე და მიიღო 54 კმ/წმ (Pettit, 1941). მოგვიანებით Pettit-მა 1945 წელს დაკვირვებული H_{α} სპექტრული ხაზის დაკვირვების ანალიზის შედეგად გაზომა დოპლერის წანაცვლება. მან იპოვნა რომ ტორნადოს ღერძი ერთ მხარეს განიცდიდა წითელ წანაცვლებას, ხოლო მეორე მხარეს - ლურჯ წანაცვლებას, რაც დამახასიათებელი უნდა იყოს მბრუნავი სტრუქტურისთვის. შედეგად მან ტორნადოს ბრუნვის სიჩქარედ განსაზღვრა 2-4 კმ/წმ, რაც წინა შეფასებისგან გაცილებით პატარა სიდიდეა (Pettit, 1946). Pettit-მა სიჩქარეებს შორის დიდი სხვაობა ახსნა იმით რომ პირველ

შემთხვევაში ტორნადო იყო უფრო აქტიური, რომელიც უცაბედად ამოიფრქვა, რამაც განაპირობა ბრუნვის უფრო მაღალი სიჩქარე.

Pettit-ის შემდგომ დახლოებით 60 წელი მზის ტორნადოების შესწავლა მივიწყებულ იქნა და აქტიურად განახლდა 2012 წლიდან. ეს ფაქტი განპირობებულია იმით რომ 2010 წელს კოსმოსში გაეშვა SDO (Solar Dynamic Observatory), რომელიც მზის სრულ დისკოს აკვირდება უწყვეტ რეჟიმში. უკიდურეს ულტრაიისფერი ტალღის სიგრძეში მაღალი გარჩევადობის მქონე გამონასახებში მრავლად დაიკვირვება ტორნადოები მზის კიდეზე, რამაც მიიქცია ამ ობიექტისადმი მეცნიერების ყურადღება.

Li et al. (2012) 2011 წლის 24 სექტემბერს დააკვირდნენ ტორნადოს SDO/AIA და დედამიწიდან H_{α} ტელესკოპით, პროტუბერანცს და მის თავზე მოთავსებულ კორონალურ ღრმულს სამხრეთ-დასავლეთ კიდეზე. კორონალურმა ღრმულმა თანდათანობით დაიწყო გაფართოება 55-95 კმ/წმ სიჩქარით, რასაც მოყვა პროტუბერანცის ზრდა და მის გასწვრივ ნივთიერების ზემოთ ატანა. ეს მოვლენა დაიკვირვებოდა ტორნადოს მსგავს სტრუქტურად. გაფართოების დროს პროტუბერანცმა ზომაში მოიმატა 50 000 კმ-ით.

შემდგომი დეტალური შესწავლა ორ სხვადასხვა ტორნადოთა ჯგუფზე მოახდინა Su et al. (2012). ამისთვის მათ გამოიყენეს ორი კოსმოსური თანამგზავრული ტელესკოპი: SDO/AIA და STEREO, რამაც საშუალება მისცა მოვლენას დაკვირვებოდნენ განსხვავებული კუთხით. ავტორებმა დაადგინეს კავშირი ტორნადოებს და გრიგალებს შორის, რომლებიც როგორც წესი მოთავსებულნი არიან ფოტოსფეროში გრანულებს და სუპერგრანულებს საზღვრებს შორის. ისინი დააკვირდნენ გრიგალურ ნაკადებს ტორნადოს ფეხებთან, რაც მიუთითებს რომ ტორნადოს აღმძვრელ მექანიზმს სწორედ გრიგალები უნდა წარმოადგენდნენ. ავტორებმა ტორნადოს ღერძის მართობულად გაკეთებული ჭრილის საფუძველზე ააგეს დრო-მანძილის დიაგრამა, სადაც დაფიქსირდა ტორნადოს რხევა. მათ იგულისხმეს რომ ეს რხევა გამოწვეული იყო ტორნადოს ბრუნვის გამო და შეაფასეს ტორნადოს ბრუნვის სიჩქარე, რომელიც მერყეობდა 5-10 კმ/წმ-ის შუალედში.

Orozco Suárez et al. (2012) დააკვირდნენ Vacuum Tower Telescope (VTT)-ით, რომელიც მდებარეობს კუნძულ ტენერიფეზე (ესპანეთი). დაკვირვება განხორციელდა 2011 წლის 19 მაისს ბუჩქის მსგავს პროტუბერანცზე He I 10830 Å სპექტრულ ხაზში. დოპლერის სიჩქარეების დათვლამ ტორნადოს ღერძის კიდებზე აჩვენა რომ ეს სტრუქტურა ბრუნავდა ± 3 კმ/წმ სიჩქარით. მიღებული სიდიდე მსგავსია Pettit-ის (1946) მიერ მიღებულ სიჩქარესთან.

მზის ტორნადოების სტატისტიკური შესწავლა მოახდინა Wedemeyer et al. (2013), SDO-ს და SST-ის დაკვირვებების საშუალებით. ავტორებმა შეისწავლეს 201 ტორნადოს სივრცული განაწილება, სიცოცხლის ხანგრძლივობა და ზომები, რომლებსაც დააკვირდნენ 25 დღიანი პერიოდის განმავლობაში. დაკვირვებების შედეგად ისინი ტორნადოებს განიხილავენ როგორც პროტუბერანცის ფეხებს. მათ მიერ დაკვირვებული ყველა ტორნადო წარმოადგენდა პროტუბერანცის ნაწილს. საშუალო სიცოცხლის ხანგრძლივობამ შეადგინა 35 საათი, ხოლო ტორნადოს სიგრძე მერყეობდა 7 000 – 75 000 კმ-ის ფარგლებში. დაკვირვებებმა გამოავლინეს, რომ ტორნადოთა უმრავლესობა არიან გაცილებით მცირე დიამეტრის ფეხებთან, ვიდრე მზის ზედაპირიდან მოშორებით. შეიძლება ითქვას რომ ტორნადოებს დაახლოებით ძაბრის ფორმა აქვს, რომლის საშუალო სიგანე 4 400 კმ $\pm$ 2 400 კმ-ს წარმოადგენს. დაკვირვებული 201 ტორნადოდან 36 (18%) მათგანმა თავის სიცოცხლე დაამთავრა ამოფრქვევით. დოპლერის სიჩქარეების შესწავლის შემდგომ ამ კვლევაშიც დადასტურდა რომ ტორნადოები ბრუნავენ, ხოლო ბრუნვის სიჩქარე შეადგენდა ± 20 კმ/სთ.

Panasenco et al. (2014) წარმოადგინა მოსაზრება, რომ ტორნადოს მსგავსი პროტუბერანცები შესაძლოა არ ბრუნავდნენ და ეს იყოს მხოლოდ პროექციის ეფექტით გამოწვეული ილუზია. მან განიხილა ორი განსხვავებული შემთხვევა, რის დროსაც მზის კიდეზე დაკვირვებულმა პროტუბერანცმა შესაძლოა გამოავლინოს ტორნადოს მსგავსი თვისებები. პირველ შემთხვევაში ტორნადოს ღერძის რხევამ შესაძლოა შექმნას ბრუნვითი მოძრაობის ილუზია. მეორე შემთხვევაში განვიხილოთ პროტუბერანცი რომელსაც გააჩნია კორონალური ღრმული, რომლის გაფართოებამ შესაძლოა გამოიწვიოს

ნივთიერების ზემოთ ასვლა. თუ ნივთიერების ნაკადს აქვს დახვეული რთული სტრუქტურა, ზემოთ ასვლის დროს შექმნის ტორნადოს მსგავს მოვლენის ეფექტს.

Panesar et al. (2013) აგრეთვე შეისწავლა Li et al. (2012)-ის მიერ შესწავლილი ტორნადო. აღნიშნულ ნაშრომში შესწავლილია კავშირი CME, ანთებებს და პროტუბერანცებს შორის. მან აღნიშნა, რომ პროტუბერანცის აქტიურობა შესაძლოა გამოწვეული იყო ახლოს მდებარე ანთებებისგან. ავტორები დააკვირდნენ ტორნადოსთან ახლოს მდებარე აქტიურ არეს, სადაც გარკვეული დროითი ინტერვალით მოხდა მზის სამი ანთება ერთმანეთის მიყოლებით. ყოველ ანთების შემდგომ ტორნადო და მასთან ასოცირებული პროტუბერანცი განიცდიდა შემოფოთებას. პირველ და მეორე ანთებას მოყვა პროტუბერანცის აქტიურობა და ტორნადოს ღერძის რხევის დაწყება. კორონალურმა ღრმულმა განიცადა ყველაზე დიდი ცვლილება მესამე ანთების შემდგომ, როდესაც მან დაიწყო სწრაფად ბრუნვა. პროტუბერანცის თავი ბრუნავდა დაახლოებით 3.5 საათის განმავლობაში, 55 კმ/სთ-დან 95 კმ/სთ-მდე სიჩქარით (Li et al. 2012).

ტორნადოების ბრუნვა სხვადასხვა ავტორების მიერ სპექტროსკოპული დაკვირვებებით დადასტურებულია (Su et al. 2014; Levens et al. 2015). თუმცა, ბოლო დროინდელმა დაკვირვებებმა არ დაადასტურა ზოგიერთ ტორნადოს შემთხვევაში მბრუნავი დინამიკა (Schmieder et al. 2017). ზოგიერთ შემთხვევაში ავტორები გვთავაზობენ, რომ ტორნადოს ბრუნვა (თუ ნამდვილად ბრუნავს) არის მხოლოდ წყვეტილი და არ გრძელდება ერთ საათზე მეტ ხანს (Martínez González et al. 2016). ბოლო წლების განმავლობაში ასევე დაკვირვებულია ტორნადოს ღერძის რხევებიც (Martínez González et al. 2016; Schmieder et al. 2017).

სხვადასხვა ავტორების მიერ მოხდა ტორნადოს მსგავს პროტუბერანცში მაგნიტური ველის გაზომვები (Schmieder et al. 2015; Levens et al. 2016a, 2016b, 2017). საიდანაც ირკვევა, რომ მაგნიტური ველის დახრა ტორნადოების ფეხებთან არის ძირითადად ჰორიზონტალური, ანუ პარალელურია მზის ზედაპირის მიმართ. ტორნადოში გაზომილი მაგნიტური ველი ძირითადად შეადგენს 15 გაუსს, თუმცა ზოგიერთ ადგილებში 40 – 60 გაუსის ფარგლებშიც მერყეობს (Levens et al. 2016b).

როგორც ზემოთ უკვე აღვნიშნეთ, ინფორმაცია მზის ტორნადოების წარმოშობის და ევოლუციის შესახებ მხოლოდ ბოლო დროს ჩატარებული კვლევებიდან არსებობს. შესაბამისად ბევრი რამ არის შესასწავლი და დასადგენი ამ ობიექტების შესახებ. მათი კავშირი პროტუბერანცებთან უფრო აქტუალურს ხდის ამ ობიექტებისადმი ყურადღებას. როგორც ბოლო დროს ჩატარებული კვლევებიდან ჩანს ტორნადოები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ პროტუბერანცის მასით მომარაგებაში და ფორმირებაში. ამ ობიექტების შესწავლა ახალ წარმოდგენას მოგვცემს პროტუბერანცების განვითარებაში. ასევე, ტორნადოები შესაძლოა მნიშვნელოვან როლს ასრულებდნენ კონორალური მასის ამოფრქვევებში. ეს ამოფრქვევები ძირითად მოვლენებს წარმოადგენენ კოსმოსური ამინდის ფორმირებაში. პროტუბერანცების წონასწორული მდგომარეობიდან გამოსვლა იწვევს დიდი რაოდენობის კორონალური პლაზმის ამოფრქვევას, რომელიც ნაწილდება მზის სისტემაში. მზის ამოფრქვევების ფიზიკური მექანიზმების შესწავლა ძალიან მნიშვნელოვანია როგორც მზის ფიზიკისთვის, ასევე მზე-დედამიწის კავშირების უკეთ შესასწავლად.

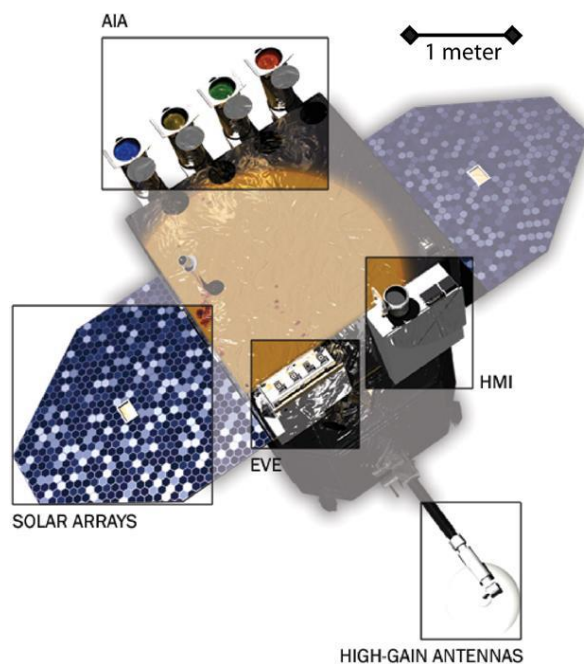
წარმოდგენილ სადისერტაციო ნაშრომში შევისწავლეთ მზის ტორნადოების წარმოშობა, დინამიკა და სტაბილურობა თანამედროვე კოსმოსური მისიებიდან მიღებული მონაცემების საფუძველზე. კომპლექსურად გავაანალიზეთ სხვადასხვა ტალღის სიგრძეში დაფიქსირებული მზის გამონასახები. რიგ შემთხვევებში ტორნადოებმა გამოავლინეს ბრუნვითი ხასიათი (Orozco Suárez et al. 2012; Wedemeyer et al. 2013; Su et al. 2014; Levens et al. 2015), რაც შესაძლოა მიუთითებდეს ამ ობიექტების არამდგრადობაზე. მზრუნავ პლაზმას შეუძლია დაგრიხოს და დაჭიმოს მაგნიტური ველი, რაც შესაძლოა გახდეს მზის ტორნადოებში არამდგრადი პროცესების აღმძვრელი მექანიზმი. არამდგრად ტორნადოებს შეუძლიათ გამოიწვიონ მასთან ასოცირებული პროტუბერანცის არამდგრადობა და საბოლოოდ კორონალური მასის ამოფრქვევა. აქედან გამომდინარე, მიმდინარე ნაშრომის კვლევის ერთ-ერთ მიზანს წარმოადგენს ტორნადოებისა და CME-ის ამოფრქვევებს შორის კავშირის დადგენა. ტორნადოს არსებობამ პროტუბერანცების ფეხებთან შესაძლოა გამოიწვიოს კორონალური მასის ამოფრქვევა, რაც საშუალებას მოგვცემს გამოვიყენოთ ეს ობიექტები კოსმოსური ამინდის

პროგნოზირებისთვის. CME-ის და მზის ანთებების დაწყების პროგნოზირება მზის და კოსმოსური ამინდის ერთ-ერთ მთავარ ამოცანას წარმოადგენს. მზის სისტემაში კორონალური მასის ამოფრქვევები მოქმედებენ დედამიწაზე და სხვა პლანეტებზე. მძლავრმა ამოფრქვევებმა შესაძლოა დიდი ზეგავლენა მოახდინოს ჩვენს გარემოზე და ტექნოლოგიებზე (Schwenn, 2006; Pulkkinen, 2007). შესაბამისად, CME-ის პროგნოზირებას დიდი მნიშვნელობა აქვს კაცობრიობის მომავალი მეცნიერულ-ტექნიკური პროგრესისთვის.

თავი 2. მეთოდოლოგია

2.1 მზის დინამიკის ობსერვატორია

სადისერტაციო კვლევის ფარგლებში დაკვირვებითი მასალა მივიღეთ მზის დინამიკის ობსერვატორიიდან (Solar Dynamics Observatory, SDO; Pesnell et al. 2012), რომელიც წარმოადგენს პირველ კოსმოსურ თანამგზავრს, გაშვებულს NASA-ს მიერ Living With a Star (LWS) პროგრამის ფარგლებში (<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>). აღნიშნული პროგრამა ახორციელებს სამეცნიერო კვლევებს იმ ასპექტში, რომელიც მიზნად ისახავს შეისწავლოს მზის აქტიურობის და ცვალებადობის გავლენა დედამიწაზე არსებულ სიცოცხლეზე. SDO-ს მთავარი ამოცანაა გამოიკვლიოს, თუ როგორ წარმოიშვება და ფორმირდება მზის მაგნიტური ველი, როგორ გარდაიქმნება შენახული მაგნიტური ენერგია და გამოთავისუფლდება ჰელიოსფეროში მზის ქარის, ენერგეტიკული ნაწილაკების და მზის სრული გამოსხივების სახით. მზის დინამიკის ობსერვატორიის სურათი მოყვანილია ნახ. 2.1-ზე.



ნახ. 2.1 მზის დინამიკის ობსერვატორია და მასზე მოთავსებული ინსტრუმენტები.

ზემოთ ხსენებულ კოსმოსურ ტელესკოპზე არჩევანი შევაჩერეთ იმ მარტივი მიზეზის გამო, რომ ის წარმოადგენს დღეისთვის ყველაზე კარგი გარჩევის და მონაცემებს შორის დროითი ინტერვალის მქონე მზის ტელესკოპს. შედარებისთვის, მას აქვს გამოსახულების რეზოლუცია ორჯერ უფრო მეტი ვიდრე STEREO-ს (Solar Terrestrial Relations Observatory), და ოთხჯერ უფრო დიდი ვიდრე SOHO-ს (The Solar and Heliospheric Observatory). სურათებს შორის დროითი ინტერვალიც განსხვავდება სხვა კოსმოსური მისიებისგან. SDO იღებს 1 გამონასახს ყოველი წამის განმავლობაში, მაშინ როდესაც STEREO იღებს 1 გამონასახს ყოველი 3 წუთის განმავლობაში, ხოლო SOHO იღებს 1 გამონასახს ყოველი 12 წუთის განმავლობაში.

SDO გაშვებულ იქნა 2010 წლის 11 თებერვალს ფლორიდიდან კენედის კოსმოსური ცენტრიდან გეოსინქრონულ ორბიტაზე, რაც საშუალებას აძლევს ობსერვატორიას უწყვეტი კავშირი ჰქონდეს დედამიწაზე მდებარე ერთ სადგურთან. SDO შედგება სამი ინსტრუმენტისგან:

- ატმოსფერული გამონასახების ნაკრები (Atmosphere Imaging Assembly, AIA; Lemen et al. 2012)
- უკიდურეს ულტრაიისფერი ცვალებადობის ექსპერიმენტი (Extreme ultraviolet Variability Experiment, EVE; Woods et al. 2012)
- ჰელიოსეისმური და მაგნიტური მიმღები ხელსაწყო (Helioseismic and Magnetic Imager, HMI; Schou et al. 2012)

AIA წარმოადგენს ოთხი ტელესკოპის ერთობლიობას, რომელიც იღებს მზის სრულ დისკოს 1" გაფართოებით (4096 x 4096 პიქსელზე) სამ ულტრაიისფერ (UV) და შვიდ უკიდურეს ულტრაიისფერ (EUV) ტალღის სიგრძეზე ყოველ 10 წამში. უკიდურესი ულტრაიისფერი სპექტრული ნაწილი წარმოდგენილია 7 კონცენტრირებული ტალღის სიგრძეში სხვადასხვა ფილტრით: 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) და Fe XVI (335 Å). შვიდივე უკიდურეს ულტრაიისფერ ტალღის სიგრძეს აქვს შესაბამისი ფორმირების ტემპერატურა და ამიტომ AIA აკვირდება მზის სხვადასხვა ფენას ერთდროულად. ეს საშუალებას გვაძლევს

დავაკვირდეთ მზის ტორნადოებს და მასთან ასოცირებულ პროტუბერანცებს სხვადასხვა ფენებში. აქამდე არსებულ ტელესკოპებისგან განსხვავებით, AIA-ს აქვს განსაკუთრებული მგრძნობიარობა, რომ დააკვირდეს მზის კიდის გარეთ მყოფ ობიექტებს. შესაბამისად, სადისერტაციო ნაშრომში მონაცემების ძირითადი ნაწილი სწორედ ამ ტელესკოპიდან იქნა მიღებული.

EVE ზომავს მზის უკიდურეს ულტრაიისფერ სპექტრულ გამოსხივებას დროითი მაღალი გარჩევადობით და სიზუსტით. EVE-ს მთავარ სამეცნიერო მიზნებს წარმოადგენს უკიდურესი ულტრაიისფერი სპექტრული გამოსხივების ცვალებადობის შესწავლა სხვადასხვა დროით შუალედში.

HMI აკვირდება ფოტოსფეროს მზის რხევების შესასწავლად და ასევე ზომავს პოლარიზაციას განსაზღვრულ სპექტრულ ხაზში, ფოტოსფერული მაგნიტური ველის სამივე კომპონენტის შესასწავლად. იგი ღებულობს 4 ძირითადი ტიპის მონაცემებს: დოპლეროგრამებს (მზის ზედაპირის სიჩქარეების რუკები), ფოტოსფეროს გამოსახულებებს უწყვეტ სპექტრში, ვექტორულ და მხედველობის ველის გასწვრივ მაგნიტოგრამებს (ფოტოსფერული მაგნიტური ველის რუკები).

ჩვენს მიერ AIA-დან მონაცემების მიღება და შემდგომი დამუშავება მოხდა SolarSoftWare-ის (SSW) საშუალებით, რომელიც წარმოადგენს სპეციალურად მზის ფიზიკისთვის შექმნილ პროგრამულ უზრუნველყოფას. იგი შედგება პროგრამული ბიბლიოთეკებისგან, მონაცემთა ბაზებისგან და სისტემური საშუალებებისგან, რაც საშუალებას იძლევა მოვახდინოთ მზის კოსმოსური მისიებიდან მიღებული მონაცემების ანალიზი. თავდაპირველად SSW შეიქმნა კონკრეტულად Yohkoh მისიისთვის, რომელიც 1991 წელს გაეშვა კოსმოსში, ხოლო შემდგომ დაემატა ახალი და მიმდინარე კოსმოსური თანამგზავრების მონაცემებიც. SSW დაფუძნებულია პროგრამირების ენაზე - Interactive Data Language (IDL), რომელიც თავის მხრივ წარმოადგენს სპეციალურად რიცხვით და ვიზუალურ მონაცემების დამუშავებისთვის შექმნილ ძლიერ პროგრამას. SSW-ს გამოყენებით ჩვენ შეგვიძლია გადმოვწეროთ სხვადასხვა კოსმოსური მისიიდან მზის მონაცემები, მოვახდინოთ მიღებულ მონაცემების შესწავლა, დროითი სერიების

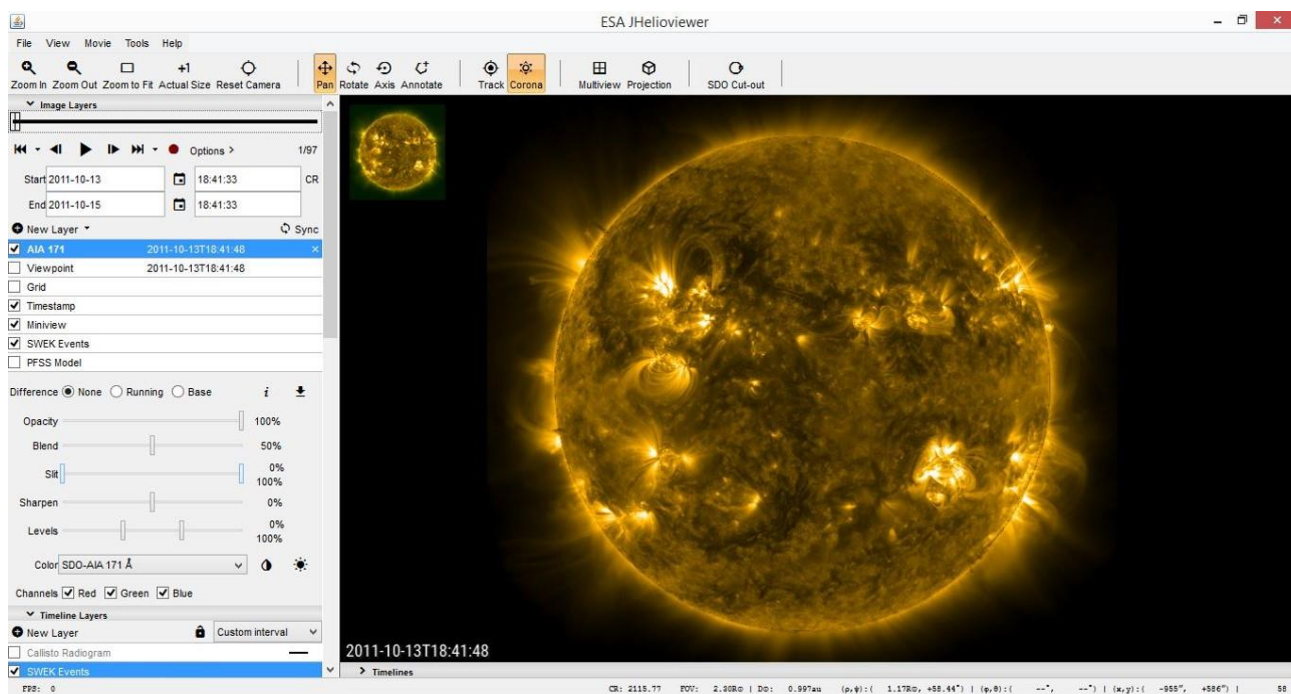
სტატისტიკური ანალიზი, გამოსახულებების დამუშავება და სხვა ჩვენთვის სასურველი პროცედურა.

SDO თავის მიღებულ მონაცემებს ინახავს FITS (Flexible Image Transport System) გაფართოების ფორმატში, რაც ზოგადად დამახასიათებელია ასტრონომიული მონაცემებისთვის. SSW პაკეტის გამოყენებით ჩვენ შეგვიძლია გადმოვწეროთ 1.0 დონის მონაცემები (Level_1.0 FITS), რომლებიც თავის მხრივ გაწმენდილია როგორც ხელსაწყოების გვერდითი ეფექტებისგან (ბნელი დენები), ასევე კოსმოსური სხივებისგან და გადანათებული პიქსელებისგან. თუმცა AIA-ს სხვადასხვა ფილტრების 1.0 დონის გამონასახებს გააჩნიათ მცირედ განსხვავებული სივრცული გარჩევა და მოძრაობის კუთხე, რაც რამდენიმე სპექტრულ ხაზში ერთდროული ანალიზის ჩატარების პრობლემას ქმნის. შესაბამისად, ჩვენ AIA-დან მიღებული პირველადი გამონასახები ავიყვანეთ SSW-ს სტანდარტული რუტინის საშუალებით 1.5 დონის მონაცემებად და შემდგომ დავიწყეთ მათი გამოკვლევა.

ტორნადოს რხევის დასაფიქსირებლად ჩვენ ავაგეთ დრო-მანძილის დიაგრამა (Time-Distance diagram) იგივე $x-t$ ანალიზი, რომელიც ხშირად გამოიყენება დინამიური პროცესების კვლევისას. მისი მეშვეობით შეგვიძლია დავადგინოთ ჩვენთვის სასურველი ობიექტის დროში ევოლუცია, ჩვენს მიერ არჩეული ღერძის გასწვრივ. იგი წარმოადგენს მარტივ დიაგრამას, რომლის აბსცისათა ღერძი ასახავს დროს, ხოლო ორდინატთა ღერძი შესაბამისად მანძილს. ტორნადოების დაკვირვებების ანალიზისას აღნიშნული მეთოდი შესაძლოა გამოვიყენოთ მასში არსებული რხევების აღმოსაჩენად. სადისერტაციო კვლევისას ჩვენც ავაგეთ დრო-მანძილის დიაგრამა ტორნადოს ღერძის მართობულად. ჩვენ გავაკეთეთ 6 ჭრილი მზის ზედაპირიდან სხვადასხვა სიმაღლეზე და დავალაგეთ დროის მიხედვით. მიღებულ დიაგრამაზე ნათლად გამოჩნდა ტორნადოს ღერძის რხევა. სხვადასხვა სიმაღლეზე დაკვირვებამ საშუალება მოგვცა გვემსჯელა, თუ რა ტიპის რხევას ვაკვირდებოდით.

2.2 JHelioviewer

მონაცემების შერჩევის და მათთან მუშაობის გამარტივების მიზნით შეიქმნა სისტემა: Heliophysics Events Knowledgebase (HEK), რომელიც წარმოადგენს მზეზე მომხდარი მოვლენების მონაცემთა სიას. HEK მომხმარებელს აძლევს საშუალებას მოძებნოს მისთვის სასურველი მოვლენა და ნახოს თუ როდის და სად მოხდა მზეზე. თუმცა, უნდა აღინიშნოს, რომ მზის ტორნადოები HEK-ის მოვლენების სიაში არ შედის, ვინაიდან ისინი შედარებით ახალ ობიექტებს წარმოადგენენ. შესაბამისად, ჩვენ მათი აღმოჩენა მზის ზედაპირზე ვიზუალური დათვალიერებით მოგვიწია. SDO-ს ერთი სრული დღის მონაცემები მოცულობით შეადგენს 1.4 ტერაბაიტს, შესაბამისად რთულია ყოველი დღის მონაცემების გადმოწერა, დათვალიერება და საინტერესო მოვლენების მოძიება. ამ პრობლემის მოსაგვარებლად შექმნილია პროგრამა სახელწოდებით - JHelioviewer (Müller et al. 2009, 2017), რომლის საშუალებით ჩვენ შეგვიძლია ჩატვირთოთ და დავათვალიეროთ SDO-ს და ასევე სხვა კოსმოსური მისიების ვიზუალური გამონასახები (<https://www.jhelioviewer.org/>). JHelioviewer წარმოადგენს Java/OpenGL-ზე დაფუძნებულ აპლიკაციას, რომელიც საშუალებას იძლევა მზის გამონასახები გაეშვას დროით სერიებად. მონაცემების ეფექტური დათვალიერებისთვის იგი იყენებს JPEG2000-ის სტანდარტულ შეკუმშულ სურათებს, რომლის მიახლოების შემთხვევაში გვთავაზობს მაღალი გარჩევადობის მონაცემებს. ჩვენც JHelioviewer-ის საშუალებით მოვძებნეთ მზის კიდეზე მდებარე ტორნადოს მსგავსი პროტუბერანცები და შევადგინეთ კატალოგი, რომელიც მოიცავს 2011 წელს ჩვენს მიერ დაფიქსირებულ ყველა ტორნადოს. ნახ. 2.2-ზე წარმოდგენილია JHelioviewer-ის ინტერფეისი, სადაც მარცხენა მხარეს მდებარეობს ბრძანებების პანელი, საიდანაც ხდება პროგრამაში სასურველი დროის, ფილტრის, ინტერვალის და განათებულობების ჩატვირთვა. ჩვენთვის სასურველი მონაცემების შეყვანის შემდგომ მარჯვნივ გამოდის მზის გამონასახი, რომელიც შეგვიძლია გავუშვათ ვიდეოს სახით, ან ვცვალოთ კადრები ერთი-მეორეს მიყოლებით.

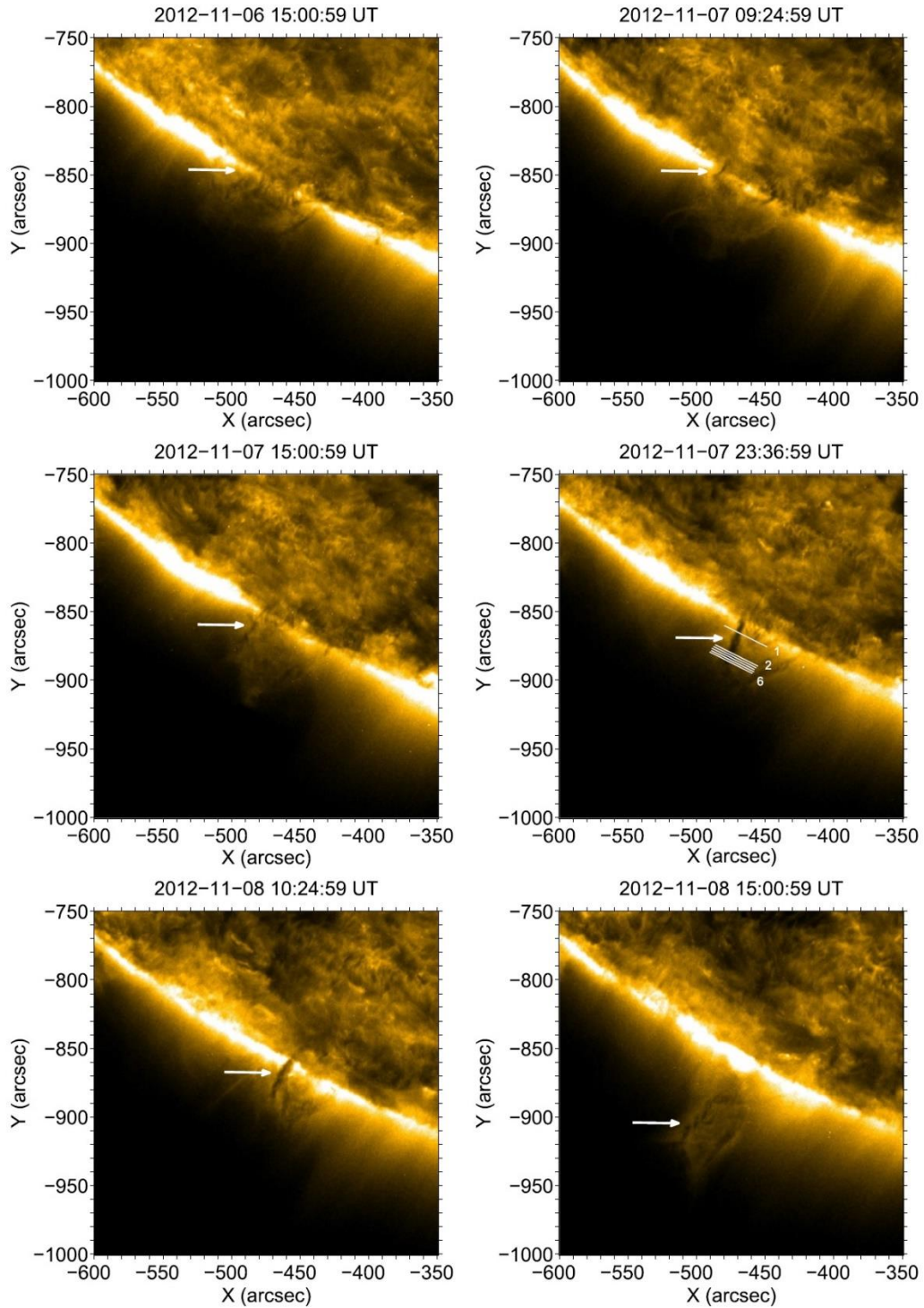


ნახ. 2.2 JHelioviewer-ის ინტერფეისი. მარცხენა მხარეს ბრძანებების პანელი, ხოლო მარჯვნივ გამოტანილია მზის გამონახაზი.

ზემოთ ხსენებულ კატალოგში შედიოდა ტორნადოები, რომლებმაც დაასრულეს სიცოცხლე ამოფრქვევით. ჩვენ ვისარგებლეთ LASCO CME catalog (Yashiro et al. 2004) კატალოგით, რათა დაგვედგინა ტორნადოების და მასთან ასოცირებული პროტუბერანცების კავშირი კორონალურ მასის ამოფრქვევებთან (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). LASCO CME catalog მოიცავს LASCO-ს ინსტრუმენტის C2 და C3 კორონოგრაფებით დაფიქსირებულ კორონალური მასის ამოფრქვევებს. მასში შესულია მოვლენების ძირითადი თვისებები, როგორიცაა: დაწყების დრო, ცენტრალური პოზიციის კუთხე, კუთხური სიგანე და სიმაღლე, როგორც დროის ფუნქცია. ინსტრუმენტი მოთავსებულია Solar and Heliospheric Observatory (SOHO; Domingo et al. 1995) კომოსურ მისიაზე, რომელიც გაეშვა 1995 წლის 2 დეკემბერს. LASCO-ს კორონოგრაფები იღებენ მზის კორონის სურათებს $1.1 R_{\odot}$ -დან $32 R_{\odot}$ -მდე. ჩვენ თითოეული ამოფრქვევადი ტორნადო გავაიგივეთ LASCO CME catalog-ში მოცემულ კორონალურ მასის ამოფრქვევასთან.

თავი 3. ტორნადოს წარმოშობა, ევოლუცია და დინამიკა

ტორნადოების წარმოშობის და დროითი ევოლუციის შესასწავლად შევარჩიეთ კონკრეტული ტორნადო, რომელიც დაიკვირვებოდა 2012 წელს 7 ნოემბრის 08:00 UT-დან 8 ნოემბრის 15:30 UT-მდე. დროითმა სერიებმა აჩვენეს, რომ ტორნადომ ჩამოყალიბება დაიწყო 7 ნოემბრის 08:00 UT-ზე მზის სამხრეთ-დასავლეთ კიდეზე და დაიკვირვებოდა დაახლოებით 30 საათის განმავლობაში. ტორნადო ასოცირებული იყო პროტუბერანტთან, რომელიც საბოლოოდ ამოიფრქვა, როგორც კორონალური მასის ამოფრქვევა. ვინაიდან, ტორნადოები კარგად დაიკვირვებიან 171 Å ტალღის სიგრძეზე, როგორც შავი სტრუქტურები, ჩვენ გამოვიყენეთ ეს სპექტრული ხაზი მათ შესასწავლად. ნახ. 3.1 აჩვენებს 171 Å სპექტრულ ხაზში ტორნადოს წარმოშობას და ევოლუციას მისი მთლიანი არსებობის განმავლობაში. ზედა-მარცხენა სურათზე ნაჩვენებია მზის კორონა 6 ნოემბრის 15:01 UT დროს, როდესაც ტორნადო ჯერ კიდევ არ არის ჩამოყალიბებული. თეთრი ისარი მიუთითებს ადგილს, სადაც ტორნადო გამოჩნდა მოგვიანებით. ზედა-მარჯვენა სურათი აჩვენებს ტორნადოს 7 ნოემბრის 09:25 UT დროს, როდესაც ტორნადო უკვე ჩამოყალიბების პროცესშია და დაიკვირვება წვრილი შავი ძაფების სახით. შუა-მარცხენა სურათი აჩვენებს მზის კიდეზე უკვე ზომამი მომატებულ ტორნადოს 7 ნოემბრის 15:01 UT დროს. ტორნადო უკვე მთლიანად ჩამოყალიბდა 7 ნოემბრის 23:37 UT-ზე და მიაღწია თავის მაქსიმალურ სიმაღლეს, რაც ნაჩვენებია შუა-მარჯვენა სურათზე. ქვედა-მარცხენა სურათი ასახავს ტორნადოს 8 ნოემბრის 10:25 UT, როდესაც ტორნადო რამდენიმე საათის განმავლობაში ინარჩუნებდა ამ სიმაღლეს. საბოლოოდ ტორნადომ 8 ნოემბრის 15:00 UT დროს განიცადა არამდგრადობა და ამოიფრქვა მასთან ასოცირებულ პროტუბერანტთან ერთად. ეს მოვლენა ასახულია ნახ. 3.1-ის ქვედა-მარჯვენა სურათზე.



ნახ. 3.1 ნახაზზე წარმოდგენილია SDO/AIA-ს 171 Å ტალღის სიგრძეზე დაკვირვებული ტორნადოს ჩამოყალიბება, ევოლუცია და ამოფრქვევა. თეთრი ისრებით ნაჩვენებია ტორნადოს მდებარეობები სხვადასხვა დროს მისი ევოლუციის განმავლობაში. უწყვეტი თეთრი ხაზი შუა-მარჯვენა სურათზე აჩვენებს ჭრილის მდებარეობებს, რომელიც გამოყენებულ იქნა დრო-მანძილის დიაგრამის ასაგებად.

ტორნადოს შესაძლო კავშირის დადგენა ფოტოსფეროსთან ვერ მოხერხდა მისი კიდესთან ახლოს მდებარეობის გამო. თუმცა, მეორეს მხრივ, ჩვენს მიერ გაკეთებულ ვიდეოში ცხადად ჩანს თუ როგორ ბრუნავს ტორნადო მთელი თავისი არსებობის განმავლობაში. ტორნადო განუწყვეტლივ იზრდებოდა სიმაღლეში თავისი ევოლუციის განმავლობაში. 7 ნოემბრის 18:00 UT-ზე, პირველი გამოჩენიდან 10 საათის შემდგომ, მან მიაღწია თავის მაქსიმალურ სიმაღლეს 50 000 კმ-ს. შესაბამისად, მისი სიმაღლეში ზრდის, ანუ ტანგენციალური სიჩქარე შეგვიძლია შევაფასოთ როგორც დაახლოებით 1.5 კმ/წმ. თავისი მაქსიმალური სიმაღლის მიღწევის შემდგომ მან შეინარჩუნა ეს ზომა შემდგომი 10 საათის განმავლობაში.

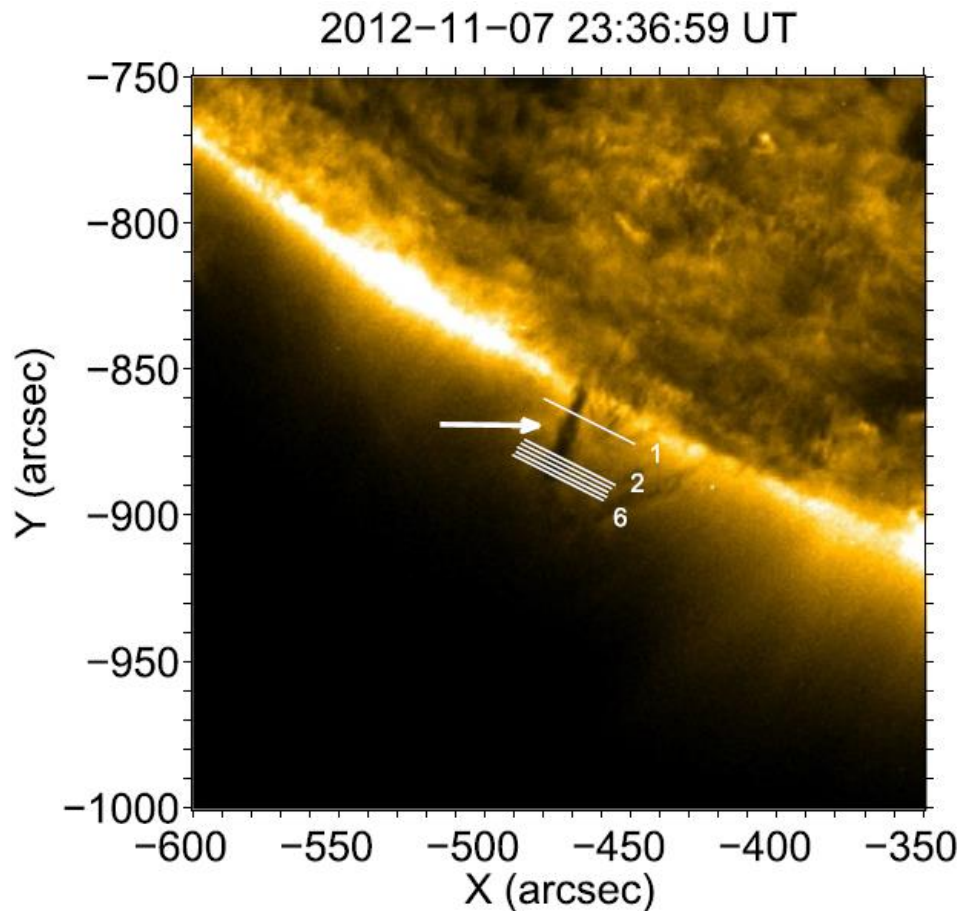
ტორნადოს სიგანე ასევე განუწყვეტლივ განიცდიდა ცვლილებას. ზოგჯერ ის იყოფოდა ორ ძაფად, მაგრამ შემდგომ კვლავ ერთდებოდა. ტორნადოს სისქე ფეხებთან (საყრდენებთან) დაიკვირვებოდა უფრო ვიწროდ, ვიდრე მის თავთან. სიგანის მსგავსი დამოკიდებულება სიმაღლეზე, როგორც ჩანს დამახასიათებელ თვისებას წარმოადგენს ტორნადოსთვის (Su et al. 2012, Wedemeyer-Böhm et al. 2013).

3.1 ტორნადოს რხევები

ტორნადოს რხევების დეტალურად შესწავლის მიზნით ჩვენ ავაგეთ დრო-მანძილის დიაგრამა ($x-t$ ანალიზი) მზის კიდიდან 6 სხვადასხვა სიმაღლეზე. ექვსივე ჭრილის მდებარეობა ნაჩვენებია ნახ. 3.2-ზე თეთრი უწყვეტი ხაზის სახით. პირველი ჭრილი მდებარეობს მზის კიდიდან დაახლოებით 14 000 კმ-ზე, ხოლო მე-6 ჭრილი დაახლოებით 44 000 კმ-ზე. მეორედან მეექვსე ჭრილებს შორის დაშორებები არის 2 900 კილომეტრი.

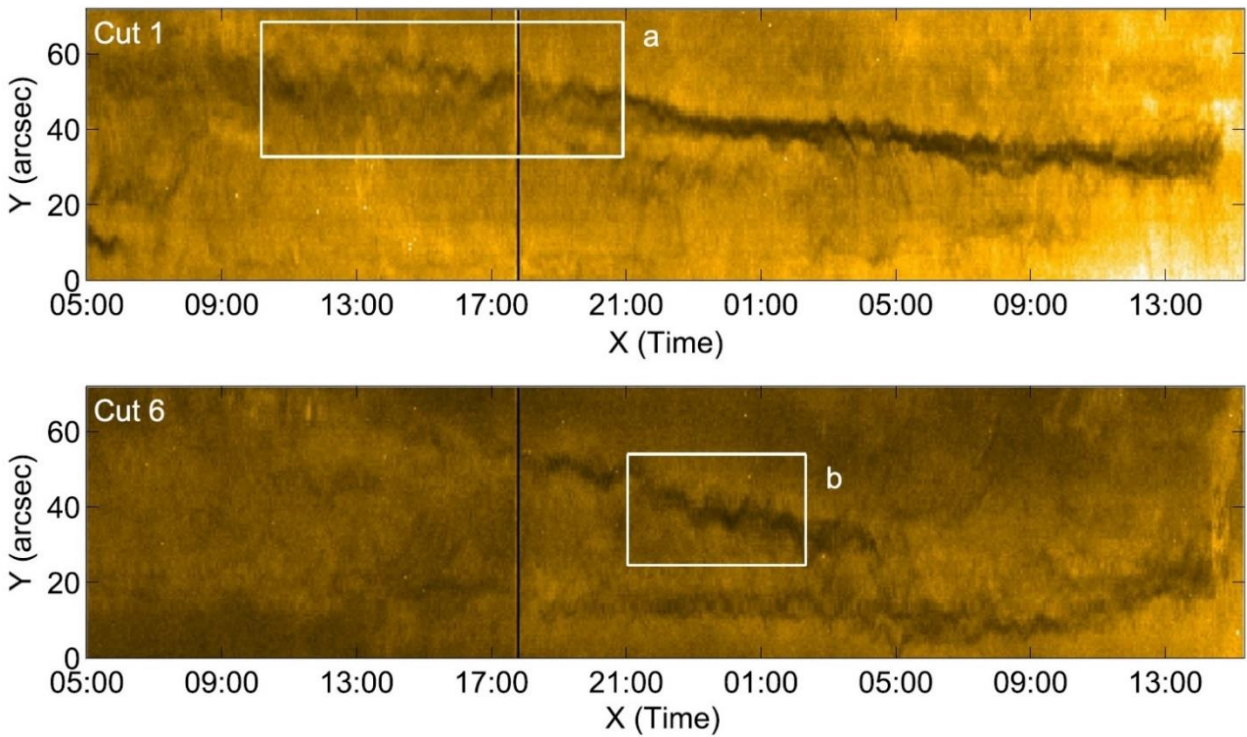
ნახ. 3.3-ზე ზედა სურათზე ნაჩვენებია დრო-მანძილის დიაგრამის პირველი ჭრილი, ხოლო ქვედა პანელზე მეექვსე ჭრილი. $x-t$ ანალიზი ჩატარდა ტორნადოს მთლიანი არსებობის განმავლობაში, 7 ნოემბრის 05:00 UT-დან 8 ნოემბრის 15:00 UT-მდე.

ქვედა პანელზე კარგად ჩანს თუ როდის გამოჩნდა ტორნადო მე-6 ჭრილის (44 000 კმ) სიმაღლეზე 7 ნოემბრის 17:00 UT-ზე. ნახ. 3.3-ზე ნათლად ჩანს ტორნადოს ღერძის კვაზი-პერიოდული განივი გადაადგილება თავისი არსებობის სხვადასხვა დროით შუალედში. ჩვენ ავირჩიეთ და შევისწავლეთ რხევის ორი მოვლენა, რომლებიც მონიშნულია თეთრი მართკუთხედებით ნახ. 3.3-ზე.

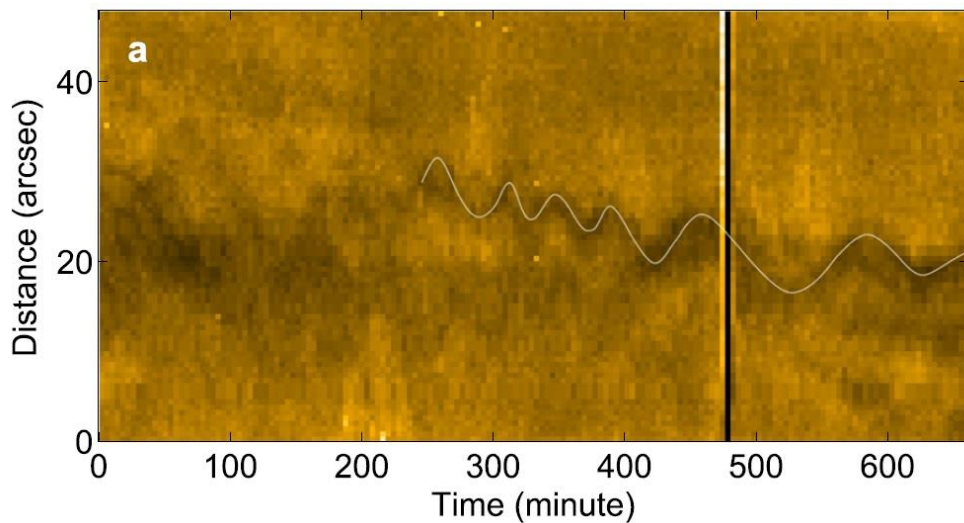


ნახ. 3.2 თეთრი ისრით ნაჩვენებია ტორნადო, ხოლო უწყვეტი თეთრი ხაზები ასახავენ დრო-მანძილის დიაგრამისთვის ასაგები ჭრილის მდებარეობებს.

ნახ. 3.4-ზე ნაჩვენებია ნახ. 3.3-ის ზედა სურათზე მონიშნული არე გადიდებული სახით. კვაზი-პერიოდული რხევა იწყება 7 ნოემბრის 14:00 UT სთ-ზე, როდესაც ტორნადო უკვე ჩამოყალიბებული იყო და გაგრძელდა 7 საათის განმავლობაში. რხევის პერიოდი და ამპლიტუდა თანდათანობით იზრდებოდა დროში, მაგრამ შემდგომ საერთოდ გაქრა. დასაწყისში პერიოდი დაახლოებით 40 წუთი იყო, ხოლო საბოლოოდ 100 წუთამდე გაიზარდა.

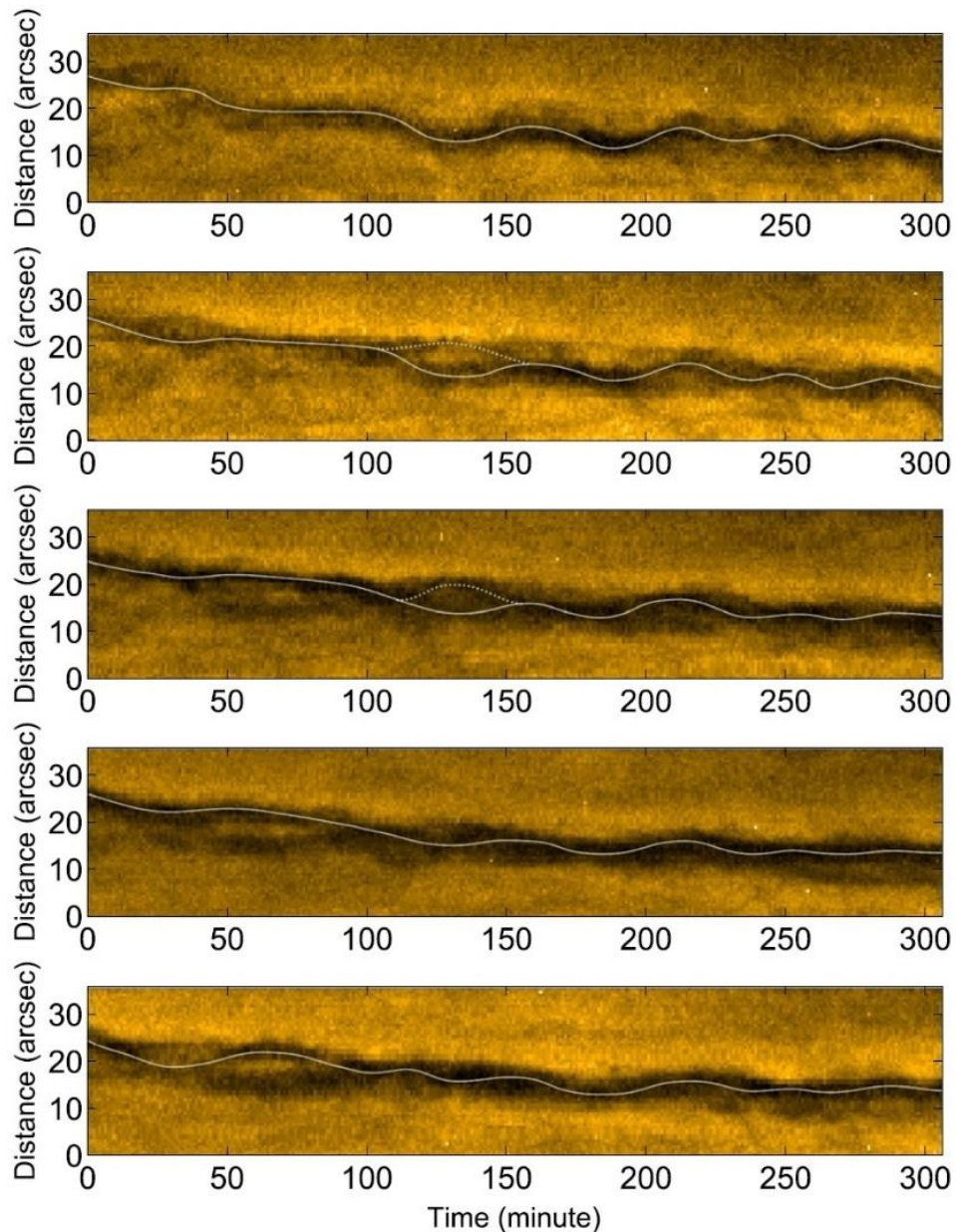


ნახ. 3.3 ნახაზზე ნაჩვენებია დრო-მანძილის დიაგრამა აგებული მზის ზედაპირიდან ორ სხვადასხვა სიმაღლეზე. შესაბამისი ჭრილები წარმოდგენილია ნახ. 3.2-ზე. საწყისი დრო შეესაბამება 2012 წლის 7 ნოემბერს. თეთრი მართკუთხედები აჩვენებს რხევის ორ სხვადასხვა მოვლენას, რომელიც უფრო დეტალურად ნაჩვენებია ნახ. 3.4 და ნახ. 3.5-ზე.



ნახ. 3.4 ტორნადოს ღერძის რხევა ნაჩვენებია ჭრილი 1-ის მიხედვით, რომელიც მდებარეობს მზის ზედაპირიდან 14 000 კმ-ზე. თეთრი მრუდი მიყვება ტორნადოს ღერძის დინამიკას.

ნახ. 3.3-ის ქვედა სურათზე მონიშნული არე ნაჩვენებია ნახ. 3.5-ის ზედა პანელზე, ხოლო შესაბამისად ქვედა პანელები ასახავენ ნახ. 3.2-ზე ნაჩვენებ 2-6 კრილებს. ტორნადოს ღერძის კვაზი-პერიოდული განივი წანაცვლება დაიწყო 7 ნოემბრის 21:00 UT-ზე და გაგრძელდა 8 ნოემბრის 02:00 UT-მდე. რხევის საშუალო პერიოდი იყო დაახლოებით 50 წუთი.



ნახ. 3.5 დრო-მანძილის დიაგრამა აგებული ნახ. 3.2-ზე ნაჩვენები 2-6 კრილის მიხედვით. ქვედა სურათი ასახავს კრილ 2-ს და შესაბამისად ზედა სურათი კრილ 6-ს. დროის ათვლა იწყება 2012 წლის 7 ნოემბრის 21:00 UT.

ტორნადოს ღერძის კვაზი-პერიოდული რხევა შესაძლებელია აიხსნას სამი სხვადასხვა მექანიზმით: ტორნადოს მაგნიტოჰიდროდინამიკური კინკ რხევებით (MHD kink oscillations), ტორნადოს ორი ძაფის ბრუნვით საერთო ღერძის გარშემო და დაგრეხილი მაგნიტური ტორნადოს სიმაღლეში გადაადგილებით თავისი გაფართოების ფაზაში.

დაკვირვებული რხევის ბუნებრივ ახსნას წარმოადგენს ტორნადოს ღერძის რეალური განივი გადაადგილება. ნახ. 3.5-ზე ჩანს, რომ ტორნადოს ღერძის გადაადგილება სხვადასხვა სიმაღლეზე ერთ ფაზაში იმყოფება, რაც ჩვენს შემთხვევაში მდგარი ტალღის რხევაზე მიუთითებს. ნახ. 3.5-ზე ასევე ცხადად დაიკვირვება, რომ რხევის ამპლიტუდა იზრდება სიმაღლესთან ერთად, როდესაც ტორნადოს ფეხებთან არანაირი თვალსაჩინო რხევა არ ფიქსირდება. ეს შესაძლოა აჩვენებს მთლიანი ტორნადოს მაგნიტოჰიდროდინამიკური კინკ ტალღის ფუნდამენტური ჰარმონიკის რხევას, როდესაც ერთი ბოლო ჩაჭერილია ფოტოსფეროში და მეორე ბოლო თავისუფალია კორონაში. ამ შემთხვევაში ფუნდამენტური ჰარმონიკის ტალღის სიგრძე ოთხჯერ გრძელია თვითონ ტორნადოს სიგრძეზე, რაც გვაძლევს სიდიდეს $4 \times 50\,000\text{ კმ} = 200\,000\text{ კმ}$. ზოგადად კინკ ტალღა წარმოადგენს განივ რხევას, როდესაც მოძრაობა ხდება მაგნიტური მილის ღერძის პერპენდიკულარულად. მისი ამსახველი სქემატური სურათი წარმოდგენილია ნახ. 3.6-ზე. ტალღაში რხევა ხდება განივად, თუმცა გავრცელება ხდება მაგნიტური ველის გასწვრივ. კინკ ტალღის ფაზური სიჩქარის ზოგადი ფორმულა არის:

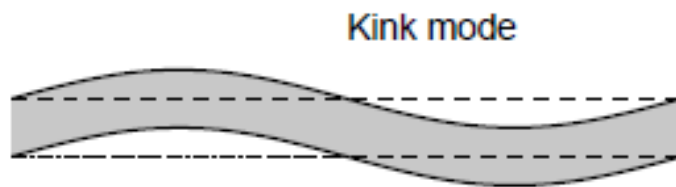
$$C_k = \sqrt{\frac{\rho_0 V_A^2 + \rho_e V_{Ae}^2}{\rho_0 + \rho_e}}$$

სადაც C_k წარმოადგენს კინკ ტალღის ფაზურ სიჩქარეს ანუ კინკ სიჩქარეს, ρ_0 და ρ_e არის პლაზმის სიმკვრივე მაგნიტურ მილში და მის გარეთ შესაბამისად, ხოლო V_A არის ალვენის სიჩქარე მილში და V_{Ae} - ალვენის სიჩქარე მილის გარეთ. რადგანაც ტორნადოს რხევის პერიოდია 50 წუთი ანუ 3 000 წამი, ჩვენ შეგვიძლია გამოვითვალოთ რხევის ფაზური სიჩქარე, როგორც $C_k \sim 70\text{ კმ/წმ}$. შესაბამისად, ალვენის სიჩქარე ტორნადოს შიგნით იქნება $V_A \sim C_k/\sqrt{2} \approx 50\text{ კმ/წმ}$. პროტუბერანცის პლაზმაში საშუალო სიმკვრივის - $5 \times 10^{-14}\text{ გ სმ}^{-3}$

(Labrosse et al. 2010) და ალვენის სიჩქარის (Alfvén velocity) ცნობილი ფორმულის გამოყენებით:

$$V_A = \frac{B_0}{\sqrt{4\pi\rho_0}}$$

შეგვიძლია უხეშად შევაფასოთ მაგნიტური ველის სიძლიერე, როგორც ~ 4 გაუსი. ფორმულაში V_A წარმოადგენს ალვენის სიჩქარეს, B_0 - მაგნიტური ველის სიძლიერეს, ხოლო ρ_0 გარემოს სიმკვრივეს. ჩვენს მიერ მიღებული მაგნიტური ველის სიძლიერე შესაბამისობაშია წყნარ პროტუბერანცებში სხვა ავტორების მიერ ადრე შეფასებულ სიდიდესთან (Mackay et al. 2010).



ნახ 3.6 კინკ ტალღის ამსახველი სქემატური სურათი (Aschwanden, 2004).

მეორეს მხრივ, ტორნადოს ძაფების ბრუნვა საერთო ღერძის გარშემო შეიძლება ქმნიდეს განივი რხევის შთაბეჭდილებას. ნახ. 3.5-ზე ჩანს თუ როგორ იყოფა ზოგჯერ ტორნადო ორმაგ სტრუქტურად, რაც შესაძლოა გამოწვეული იყოს ძაფების ბრუნვის გამო (Su et al. 2012). მაგალითისთვის, ნახ. 3.5-ზე 60-დან 70-მდე წუთის ინტერვალში (ქვედა სამ სურათში) და 120-დან 150-მდე წუთის ინტერვალში (ზემოდან მეორე და მესამე სურათში) ჩანს, თუ როგორ იყოფა ტორნადო ორ ძაფად, რომლებიც მოგვიანებით შეერთდნენ. ამ შემთხვევაში ბრუნვის პერიოდი შევაფასეთ, როგორც ~ 90 წუთი, საიდანაც ძაფების ბრუნვის სიჩქარე მიიღება ~ 6 კმ/წმ. პრინციპში, ორივე პროცესი წინააღმდეგობაში არ მოდის ერთმანეთთან, შესაბამისად ჩვენ შეგვიძლია ვივარაუდოთ, რომ ტორნადო ბრუნავს და ირხევა ერთდროულად.

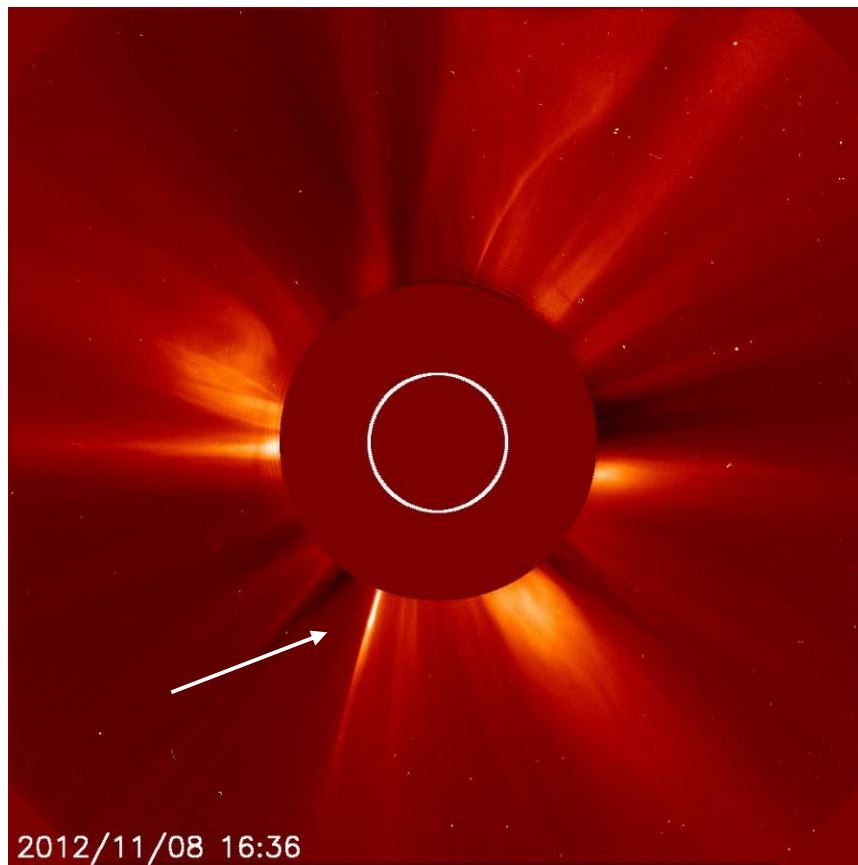
დაგრეხილი ტორნადოს მაღლა ასვლის ეტაპსაც შესაძლოა გამოეწვია ტორნადოს ღერძის განივი გადაადგილება (Panesar et al. 2013; Panasenco et al. 2014). თუმცა, მეორე რხევა ამ მექანიზმით ძნელად აიხსნება, რადგან ტორნადო ამ რხევის პერიოდში არ

გადაადგილდებოდა სიმდლის მიხედვით. მაგრამ, ეს მექანიზმი შესაძლოა გამოდგეს პირველი რხევისთვის (იხ. ნახ. 3.4), ვინაიდან ამ ინტერვალში ტორნადო გადაადგილდებოდა სიმაღლეში. მართლაც, განივი რხევა შეწყდა ტორნადოს სიმაღლეში ზრდის დამთავრებისთანავე. რხევის პერიოდის მატება შესაძლოა მიუთითებდეს ტორნადოს ბოლო ეტაპზე სიმაღლეში ზრდის სიჩქარის კლებაზე.

3.2 ტორნადოს როლი მასთან ასოცირებული პროტუბერანცის დესტაბილიზაციაში

2012 წლის 8 ნოემბრის 15:00 UT დროს ტორნადო გახდა არამდგრადი და საბოლოოდ ამოიფრქვა, მასთან ასოცირებულ პროტუბერანცთან ერთად, როგორც CME. კორონალური მასის ამოფრქვევა LASCO CME catalog-ში (Yashiro et al. 2004) დაფიქსირებულია 15:36 UT-ზე, რის დროსაც მისი საშუალო სიჩქარე იყო 720 კმ/წმ. CME გამოჩნდა მზის სამხრეთ-დასავლეთ კიდეზე ჩრდილოეთიდან საათის საწინააღმდეგო მიმართულებით 160° -ით. გამოტყორცნილი პლაზმის ნაკადის სიგანე დაიკვირვებოდა ძალიან ვიწრო კუთხით - 24° -ით. CME-ის სურათი დაფიქსირებული LASCO/C2 კორონოგრაფის მიერ მოყვანილია ნახ. 3.7-ზე.

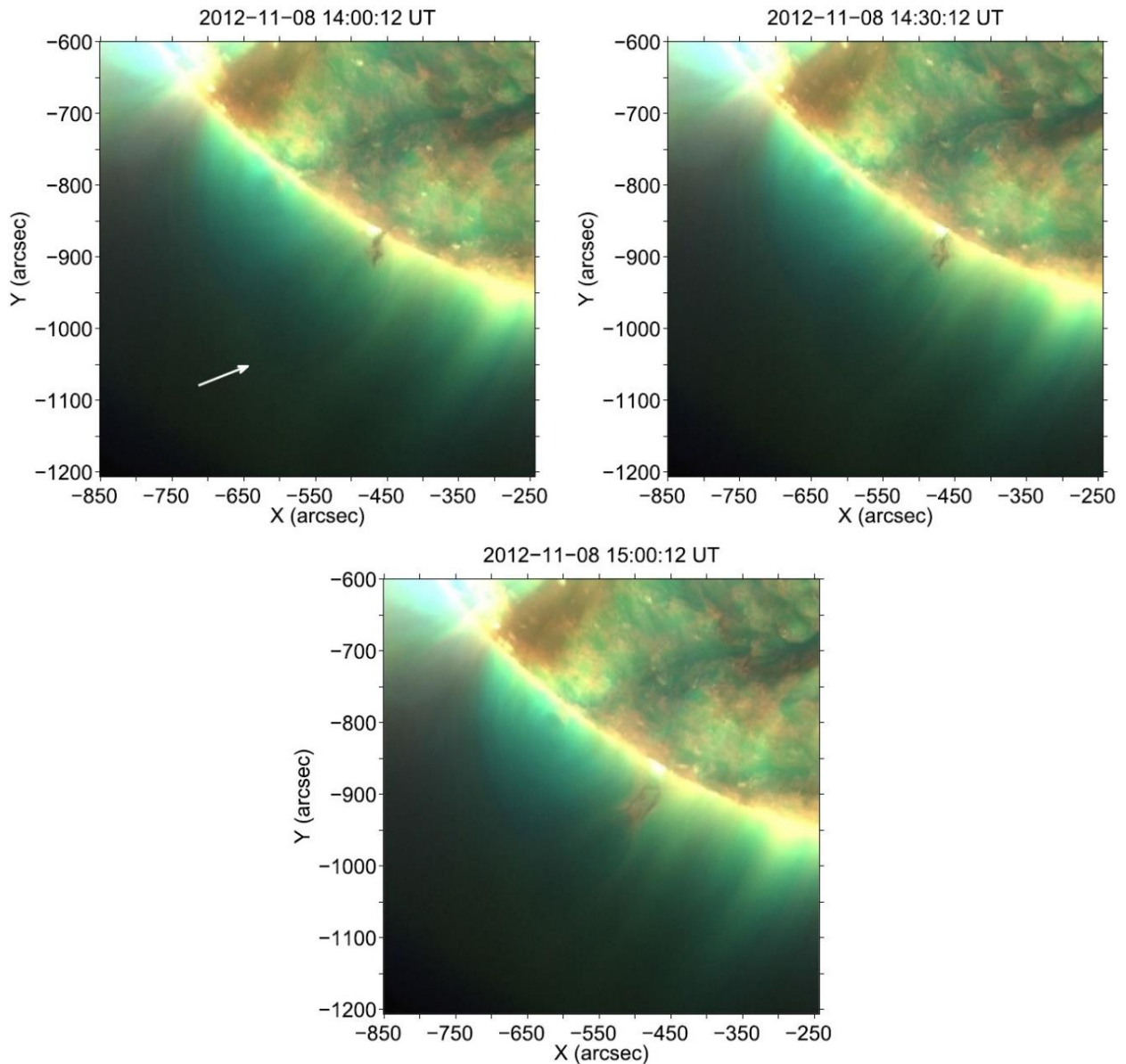
AIA-ს მაღალ ტემპერატურულ სპექტრულ ხაზებში ტორნადოს თავზე დაიკვირვებოდა კორონალური ღრმული. ნახ. 3.8 აჩვენებს კორონალური ღრმულის დროში ევოლუციას, რომელიც მიღებულია AIA-ს 171, 211 და 193 Å ფილტრებით. ღრმულმა გაფართოება დაიწყო დაახლოებით 13:00 UT-ზე და შეუჩერებლად შორდებოდა მზის კიდე. ეს პროცესი გრძელდებოდა დაახლოებით ერთი საათი, რის დროსაც ტორნადოც მიყვებოდა კორონალურ ღრმულს. ზოგადად კორონალური ღრმულის გაფართოება ასევე დაკვირვებულია სხვა ავტორების მიერ და მათ შეაფასეს გაფართოების სიჩქარე, როგორც ~ 2.5 კმ/წმ (Li et al. 2012; Panesar et al. 2013). პროტუბერანცები კორონალური ღრმულით შესაძლოა არამდგრადობას განიცდიდნენ მაგნიტური გარღვევის მოდელის თანახმად (Magnetic breakout model; Antiochos et al. 1999; Aulanier et al. 2000; Maia et al. 2003; Shen et al. 2012).



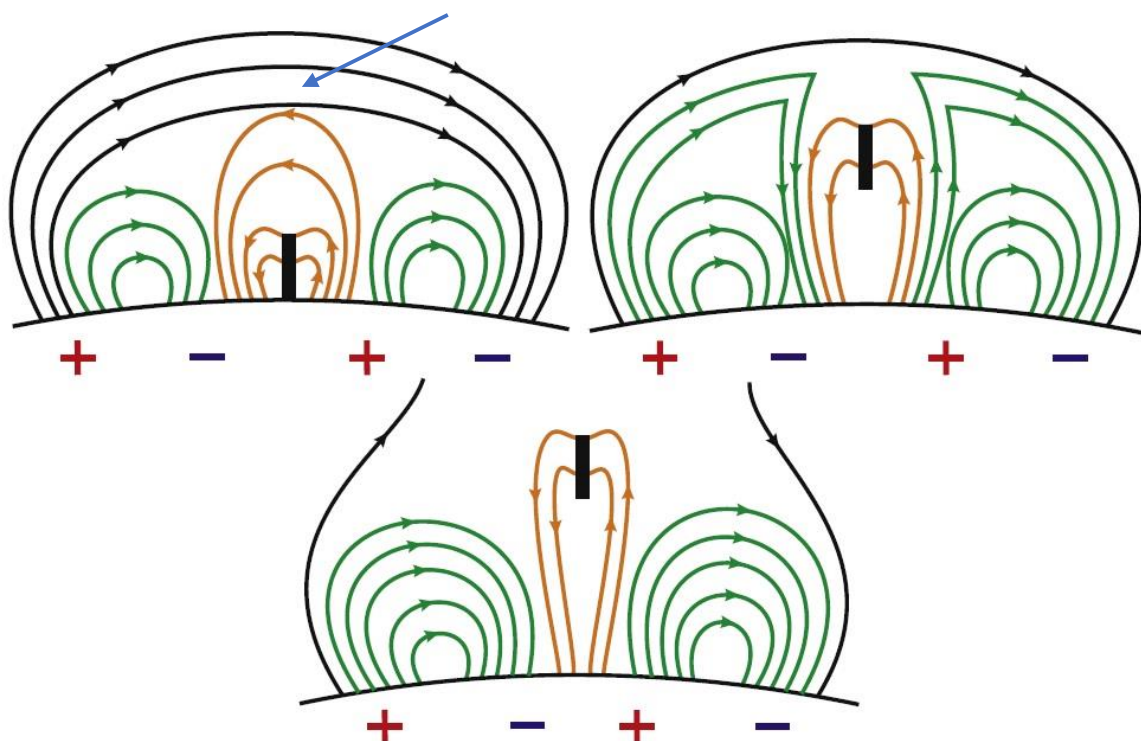
ნახ. 3.7 LASCO/C2-ის მიერ დაკვირვებული CME-ს ამოფრქვევის ეტაპი. თეთრი ისრით ნაჩვენებია გამოტყორცნილი ნაკადი, ხოლო თეთრი რგოლით მზის დისკის მდებარეობა.

მაგნიტური გარღვევის მოდელის სქემატური სურათი წარმოდგენილია ნახ. 3.9-ზე. ჩვენ ვვარაუდობთ, რომ კორონალური ღრმული და ასევე ტორნადო ასოცირებულ პროტუბერანტთან ერთად მდებარეობდა ორ მარყუჟს შორის. ნახ. 3.8-ზე ნათლად ჩანს მარყუჟების სისტემა კორონალური ღრმულის მარცხენა მხარეს. თუმცა, კორონალური ღრმულის მეორე მხარეს მარყუჟების სისტემა არ დაიკვირვება, რაც შესაძლებელია გამოწვეული იყოს მხედველობის კუთხის განსხვავებული მდებარეობით. მაგნიტური გარღვევის მოდელის თანახმად, მაგნიტური გადაერთება ხდება ნულოვან წერტილთან (Null point) ახლოს, რომელიც ყალიბდება კორონალური ღრმულის გაფართოების შედეგად. მაგნიტური გადაერთება ათავისუფლებს შემოსაზღვრულ მაგნიტურ ძაღწირებს და ტორნადო პროტუბერანტთან ერთად ამოიფრქვევა, როგორც კორონალური მასის ამოფრქვევა. შესაბამის ვიდეოში ნათლად ჩანს, თუ როგორ იზრდება კორონალური ღრმული ზემოთ და იხსნება მაგნიტური ძაღწირები. AIA-ს სხვადასხვა

ფილტრების დეტალურმა შესწავლამ არ აჩვენა მაგნიტური გადაერთების შედეგად გამოწვეული რაიმე სახის ნათება, რაც შესაძლოა გამოწვეული იყოს Sweet-parker model-ით, რომლის თანახმადაც მაგნიტური ძაღწირების განთავისუფლება ხდება უწყვეტად სწრაფი ენერგიის გამოთავისუფლების გარეშე, და შესაბამისად ჩვენ მას ვერ დავაფიქსირებდით AIA-ს რომელიმე სპექტრულ ხაზში.

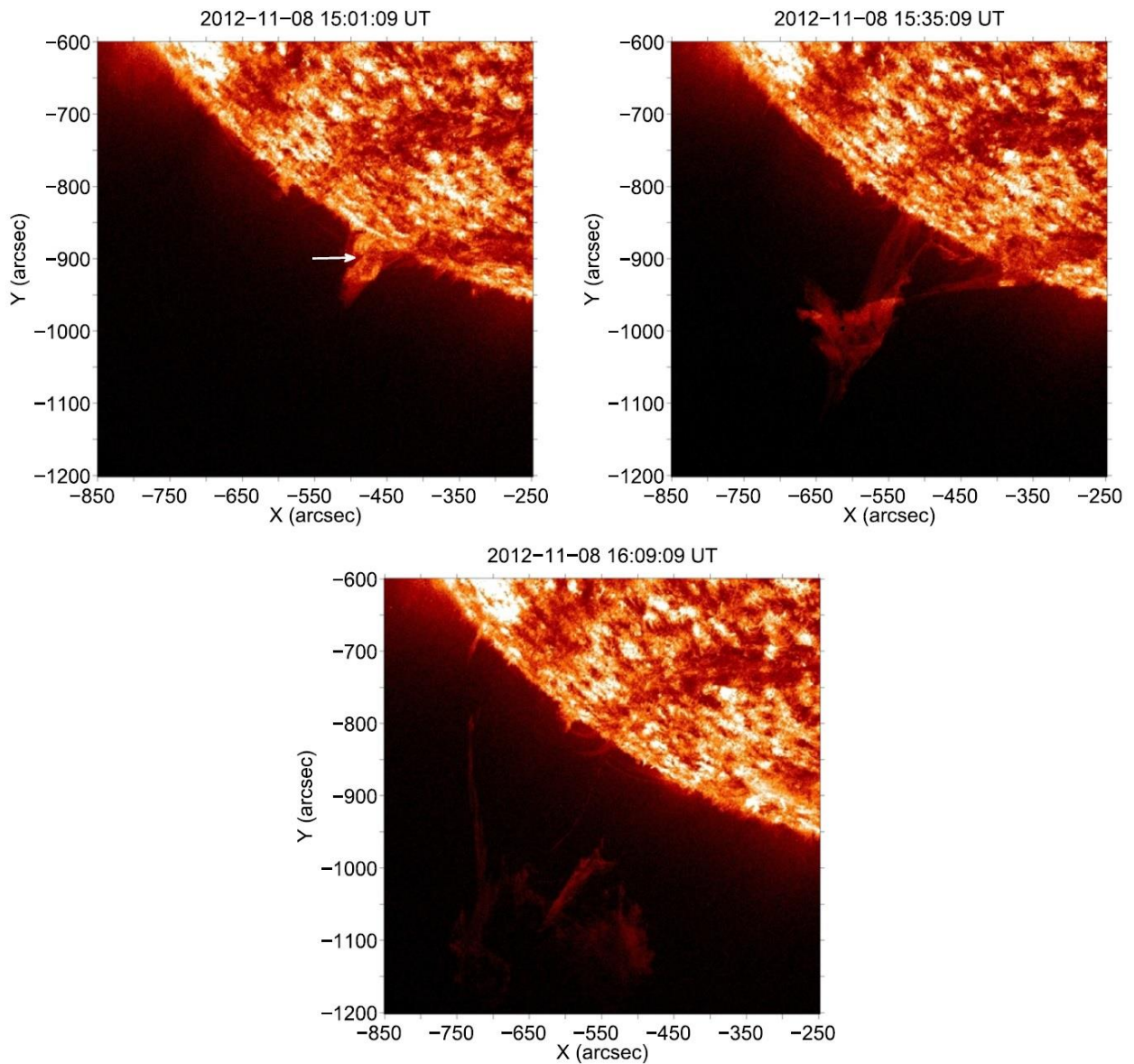


ნახ. 3.8 კომპოზიციური სურათი, რომელიც მიღებულია AIA-ს 171, 211 და 193 Å სპექტრული ხაზების ერთმანეთზე დადების შედეგად. თეთრი ისარი მიუთითებს კორონალური ღრმულის ზედა საზღვარს.



ნახ. 3.9 მაგნიტური გარღვევის მოდელის სქემატური სურათი. + და - მიუთითებს მაგნიტური ველის პოლარობებს. შავი მართკუთხედი აჩვენებს ტორნადოს, ხოლო ლურჯი ისრით ნაჩვენებია ნულოვანი წერტილის მდებარეობა.

კორონალური მასის ამოფრქვევის შემდგომ გარკვეული ნივთიერება დაეშვა უკან მზის ზედაპირზე. შესაბამისი სურათები მოყვანილია ნახ 3.10-ზე $304 \text{ \AA}$ სპექტრულ ხაზში. ნივთიერების დაბლა დაშვებისას გამოიკვეთა მაგნიტური სტრუქტურის ფორმა, რომელიც ჰგავს კორონალური ღრმულის მარჯვენა მხარეს მდებარე მარყუჟის სისტემას. ზემოთ ხსენებული მარყუჟის სისტემა არ დაიკვირვება მაღალ ტემპერატურულ სპექტრულ ხაზებში, თუმცა ის მნიშვნელოვანია მაგნიტური გარღვევის მოდელისთვის (Antiochos et al. 1999).



ნახ. 3.10 პროტუბერანცის ამოფრქვევის ფაზა დაკვირვებული 304 Å სპექტრულ ხაზში. თეთრი ისარი აჩვენებს ტორნადოს მდებარეობას.

3.3 მოკლე დასკვნა

ჩვენს მიერ შესწავლილ იქნა 2012 წლის 7-8 ნოემბერს დაფიქსირებული მზის ტორნადო SDO/AIA-ს მაღალი გარჩევის ფილტრების საშუალებით. ჩატარებულმა x-t ანალიზმა გამოავლინა ტორნადოს ღერძის ორი რხევა მისი არსებობის განმავლობაში

სხვადასხვა სიმაღლეზე. პირველი რხევა შესაძლოა გამოეწვია დაგრეხილი ტორნადოს სიმაღლეში გადაადგილებას. მეორე რხევა, რომლის საშუალო პერიოდი იყო 50 წუთი ძალიან წააგავდა კორონაში დამახასიათებელ კინკ რხევას. ტორნადოს სიგრძით და რხევის პერიოდით შევაფასეთ ალვენის სიჩქარე, როგორც 50 კმ/წმ, საიდანაც მივიღეთ მაგნიტური ველის სიდიდე ტორნადოს შიგნით 4 გაუსი.

ტორნადოს და მასთან ასოცირებული პროტუბერანცის ევოლუციის საბოლოო ეტაპზე დავაკვირდით მაგნიტურ გადაერთებას, რომელიც მოხდა Sweet-Parker model-ის მიხედვით. ტორნადოს არამდგრადობამ გამოიწვია მის თავზე მდებარე კორონალური ღრმულის გაფართოება, რასაც მოყვა კორონალური მასის ამოფრქვევა. დაკვირვებული მაგნიტური ძალწირების სტრუქტურა მიგვანიშნებს, რომ გადაერთება მოხდა ტორნადოს თავზე, რაც ზუსტად აღიწერება მაგნიტური გარღვევის მოდელის მიხედვით. კვლევის შედეგად ირკვევა, რომ ტორნადოები შესაძლოა გახდნენ არამდგრადი პროცესების აღმძვრელები თავის მასპინძელ პროტუბერანცში, რასაც შეიძლება მოყვეს მისი ამოფრქვევა როგორც CME.

თავი 4. ტორნადოების კავშირი CME-ებთან

ჩვენს მიერ ჩატარებული კვლევებიდან, რომელიც წინა თავში დეტალურად აღწერილია ირკვევა, რომ ტორნადოები მნიშვნელოვან როლს ასრულებენ მასთან ასოცირებული პროტუბერანცის არამდგრადობაში, რაც ასევე დაკვირვებულია სხვა ავტორების მიერ (Su et al. 2012; Wedemeyer-Böhm et al. 2013). ტორნადოები თითქმის ყოველთვის დაიკვირვებიან პროტუბერანცის საყრდენებთან და სავარაუდოდ დიდი წილი უკავიათ მის დაგრეხვაში და მასით მომარაგებაში. ამგვარ მოვლენებს შეუძლიათ პროტუბერანცში არამდგრადი პროცესები გამოიწვიონ. არამდგრად პროტუბერანცებს ახასიათებთ ამოფრქვევები, რომელიც ვლინდება ანთებებით და კორონალური მასის ამოფრქვევებით. შესაბამისად, ჩვენ შემდეგ ამოცანას წარმოადგენს კავშირის დადგენა ტორნადოებს და მასთან არსებული პროტუბერანცების არამდგრადობებს შორის, ასევე მათი კავშირი CME-ებთან.

ტორნადოების CME-ებთან კავშირის დასადგენათ საჭირო იყო დაკვირვებოდიტ ტორნადოებს ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში და შეგვესწავლა ისინი სტატისტიკურად. დაკვირვება განხორციელდა SDO/AIA-თი და მოიცავდა პერიოდს 2011 წლის 1 იანვრიდან 31 დეკემბრის ჩათვლით. ჩვენს მიზანს წარმოადგენდა დაგვეფიქსირებინა პროტუბერანცთან ასოცირებული ყველა ტორნადო და შეგვესწავლა მათი ევოლუცია ინდივიდუალურად. ვინაიდან ტორნადოები არ შედიან HEK-ში, შესაბამისად იძულებულები ვიყავით დაკვირვებოდიტ მათ შეუიარაღებელი თვალით, რომ დაგვეფიქსირებინა ტორნადოები მზის კიდეზე. ამისთვის ჩვენ გამოვიყენეთ პროგრამა სახელწოდებით „JHelioviewer“ (Müller et al. 2009), რომელიც წარმოადგენს მზის ფიზიკის მონაცემებზე დაფუძნებულ ვიზუალურ პროგრამულ უზრუნველყოფას. პროგრამა საშუალებას გვაძლევს დავაკვირდეთ მზეს ჩვენს მიერ შერჩეულ ფილტრში, განსაზღვრული პერიოდით და დროითი ინტერვალით. 2011 წლის განმავლობაში დაკვირვებული თითოეული ტორნადოსთვის ჩვენ განვსაზღვრეთ საწყისი

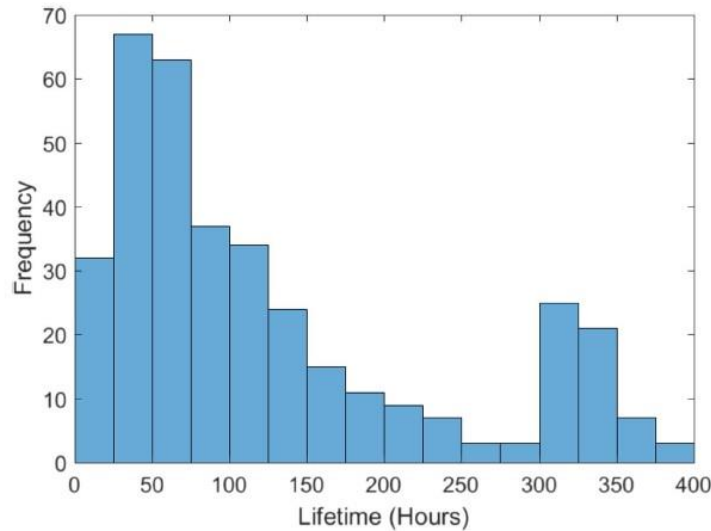
კოორდინატები და სიცოცხლის ხანგრძლივობა. სიცოცხლის ხანგრძლივობად ჩვენ განვიხილავთ ტორნადოს გამოჩენიდან მის გაუჩინარებამდე პერიოდს. ამისთვის ჩვენ გამოვიყენეთ AIA-ს 171 Å სპექტრული ხაზი, სადაც სხვა ფილტრებთან შედარებით ტორნადოები უკეთ დაიკვირვებიან. ვინაიდან პროტუბერანცები და მასთან ასოცირებული ტორნადოები წარმოადგენენ დიდი სიცოცხლის ხანგრძლივობის მქონე მოვლენებს, დაკვირვების დროითი ინტერვალი ჩვენ ავიღეთ 2 საათი. თითოეული ტორნადოს ევოლუციის საბოლოო ეტაპის განსაზღვრის მერე გადმოვწერეთ 171, 193 და 304 Å ფილტრების 1.0 დონის (Level_1) მქონე მონაცემები და მოვახდინეთ მათი აყვანა შესაბამის 1.5 დონის (Level_1.5) მონაცემებად. 1.5 დონის მონაცემებში შესრულებულია შემდეგი გაწმენდითი სამუშაოები: ცუდი პიქსელების მოშორება, ხმაურის მოშორება, ანომალიების მოშორება და მასშტაბის შესწორება. მონაცემებს კალიბრაცია და ანალიზი ჩატარდა SSW პაკეტის სტანდარტული ბრძანებებით.

ზოგადად, ტორნადოები მაღალ ტემპერატურულ კორონალურ სპექტრულ ხაზებში დაიკვირვებიან მზის კიდეზე, როგორც მუქი სტრუქტურები. მათი იდენტიფიკაცია გართულებულია როდესაც ისინი მზის ბრუნვის გამო გადადიან მზის კიდიდან დისკის მიმართულებით. ტორნადოსთან ასოცირებული პროტუბერანცი მზის დისკზე დაიკვირვება ანალოგიურად მუქი ბოჭკოების სახით, რაც ართულებს ტორნადოების მათგან განსხვავებას. აგრეთვე, ტორნადოები წარმოადგენენ ვერტიკალურ სტრუქტურებს, შესაბამისად მათი დაფიქსირება მზის დისკზე პროექციის გამო გართულებულია. დასავლეთ კიდეზე მყოფ ყველა ტორნადოს ჩვენ მივყევით, სანამ ისინი გადავიდოდნენ მზის დისკზე და რიგ შემთხვევებში, მათი დაკვირვება შეუძლებელი იყო. აღმოსავლეთ კიდეზე მდებარე ტორნადოები მზის ბრუნვის გამო გადადიოდნენ თვალთახედვის არედან და მათი დამზერა ვეღარ მოხერხდა.

ჩვენს მიერ დაფიქსირებული და შესწავლილი ყველა ტორნადოს ინფორმაცია: საწყისი კოორდინატები, საწყისი და საბოლოო დრო, სიცოცხლის ხანგრძლივობა და საბოლოო ეტაპი (თუ როგორ დაამთავრეს თავიანთი არსებობა) მოცემულია დანართში კატალოგის სახით. ერთ წლიანი პერიოდის განმავლობაში ჩვენ დავაფიქსირეთ 361 ტორნადო. ტორნადოები ზოგჯერ დაიკვირვებიან როგორც ცალკე მდგომი

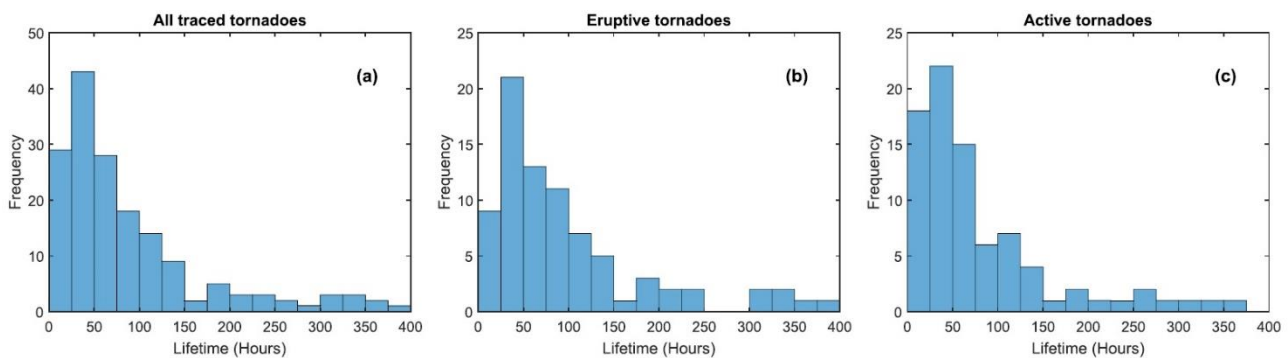
სტრუქტურები, თუმცა ხშირად ისინი ერთიანდებიან ჯგუფის სახით. ისინი ასევე ასოცირებულები არიან „ბუჩქის მსგავს პროტუბერანცებთან“ (Hedgerow prominences; Orozco Suárez et al. 2012). ჩვენს მიერ დაკვირვებული ტორნადოებიდან 177 იყო ტორნადოთა ჯგუფი, რომლებიც მოიცავენ ორ და მეტ ტორნადოს. თითოეული ჯგუფი ჩვენს კატალოგში შეტანილია, როგორც ერთი მოვლენა, რადგან ისინი წარმოადგენენ ერთი პროტუბერანცის სხვადასხვა ფეხებს/საყრდენებს. ზოგჯერ ტორნადოებთან ასოცირებული არიან კორონალური ღრმულები (Li et al. 2012; Panesar et al. 2013; Wedemeyer-Böhm et al. 2013; Mghebrishvili et al. 2015), რომლებიც დაიკვირვებიან პროტუბერანცის თავზე მუქ წრიულ ან ნახევრად-წრიულ რეგიონებად. ჩვენ დავაფიქსირეთ 113 ასეთი შემთხვევა, როდესაც კორონალური ღრმული მდებარეობდა ტორნადოს და მასთან ასოცირებული პროტუბერანცის თავზე.

ყველა დაკვირვებული ტორნადოს სიცოცხლის ხანგრძლივობა მერყეობდა 7 საათიდან 398 საათამდე ფარგლებში. ბუნებრივია, ჩვენ ვერ დავაკვირდით ყველა ტორნადოს მათი წარმოშობიდან საბოლოო ეტაპამდე. ზოგიერთი ტორნადო მზის დისკიდან გადავიდა და დაიშალა ჩვენი თვალსაწიერიდან, ზოგიერთი უკვე წარმოშობილი შემოვიდა დასავლეთ კიდიდან და შესაბამისად ჩვენ არ გვაქვს ინფორმაცია მათი წარმოშობის დროის შესახებ. ჩვენს მიერ დაკვირვებული ყველა მოვლენის საშუალო სიცოცხლის ხანგრძლივობა გამოვიდა 126 საათი, რომელიც უფრო გრძელია ვიდრე Wedemeyer-Böhm et al. (2013)-ის მიერ შეფასებული 35 საათი. ტორნადოთა რაოდენობა, რომელთა სიცოცხლის ხანგრძლივობა მეტი იყო 250 საათზე, შეადგინა 63 (17%), 150 საათზე ნაკლების იყო - 260 (72%) და მხოლოდ 38 (11%) ტორნადოს ჰქონდა სიცოცხლის ხანგრძლივობა 150-250 საათის შუალედში. შესაბამისი ჰისტოგრამა ნაჩვენებია ნახ. 4.1-ზე, სადაც ნათლად დაიკვირვება პიკი 25-75 საათის შუალედში და ასევე მცირე პიკი 300-350 საათის შუალედში. ჩვენთვის უცნობია აქვს თუ არა ამ პიკებს რაიმე რეალური ფიზიკური ახსნა, თუმცა უნდა აღინიშნოს, რომ თითქმის ყველა დიდ სიცოცხლის ხანგრძლივობის მქონე ტორნადოს მოჰყვა კორონალური მასის ამოფრქვევა.



ნახ. 4.1 2011 წლის განმავლობაში დაკვირვებული ყველა ტორნადოს სიცოცხლის ხანგრძლივობის განაწილება.

ყველა იმ ტორნადოს სიცოცხლის ხანგრძლივობამ, რომლებსაც ჩვენ გავყევით მათი წარმოშობიდან საბოლოო ეტაპამდე, შეადგინა საშუალოდ 88 საათი. რაც უფრო ახლოა Wedemeyer-Böhm et al. (2013)-ის მიერ მიღებულ შედეგთან, თუმცა თითქმის ორჯერ მეტია. ჩვენს მიერ ბოლომდე მიყოლილი ყველა ტორნადოს სიცოცხლის ხანგრძლივობის განაწილება ნაჩვენებია ნახ. 4.2-ის (a) პანელზე, (b) და (c) პანელები ასახავენ ამოფრქვევადი და აქტიური ტორნადოების სიცოცხლის ხანგრძლივობას.



ნახ. 4.2 სიცოცხლის ხანგრძლივობის განაწილება: (a) სიცოცხლის ბოლო ეტაპამდე დაკვირვებული ტორნადოები, (b) ამოფრქვევადი ტორნადოები და (c) აქტიური ტორნადოები.

დაკვირვებითი მონაცემების დეტალური ანალიზის შედეგად ტორნადოები დავყავით რამოდენიმე კატეგორიად. ამ კატეგორიებში არ განიხილება ტორნადოები, რომელთა საბოლოო ეტაპს ვერ დავაკვირდით. ზოგჯერ რთულია შეისწავლო ტორნადოს ევოლუცია, რომლებიც მზის დასავლეთ კიდიდან დისკზე გადადის. ჩვენ შემთხვევაში, მსგავსი მოვლენის გამო, ვერ გავყევით 35 ტორნადოს. ცხადია, ჩვენ ასევე ვერ დავაკვირდით ტორნადოებს, რომლებიც აღმოსავლეთ კიდიდან მზის ჩვენთვის უხილავ მხარეზე გადავიდნენ. ასეთი 160 შემთხვევა დაფიქსირდა. საბოლოოდ, ყველა დაკვირვებული მოვლენიდან 195 ტორნადო გამოვრიცხეთ შემდგომი კვლევებიდან. შედეგად, მთლიანი წლის განმავლობაში დავაკვირდით თუ როგორ დაამთავრა თავიანთი არსებობა 166 ტორნადომ. დაკვირვებული ტორნადოები შესაძლოა კლასიფიცირდეს სამ კატეგორიად: ამოფრქვევადი, აქტიური და მილევადი ტორნადოები (იხ. ცხრილი 3.). სამივე კატეგორიას სათითაოდ განვიხილავთ.

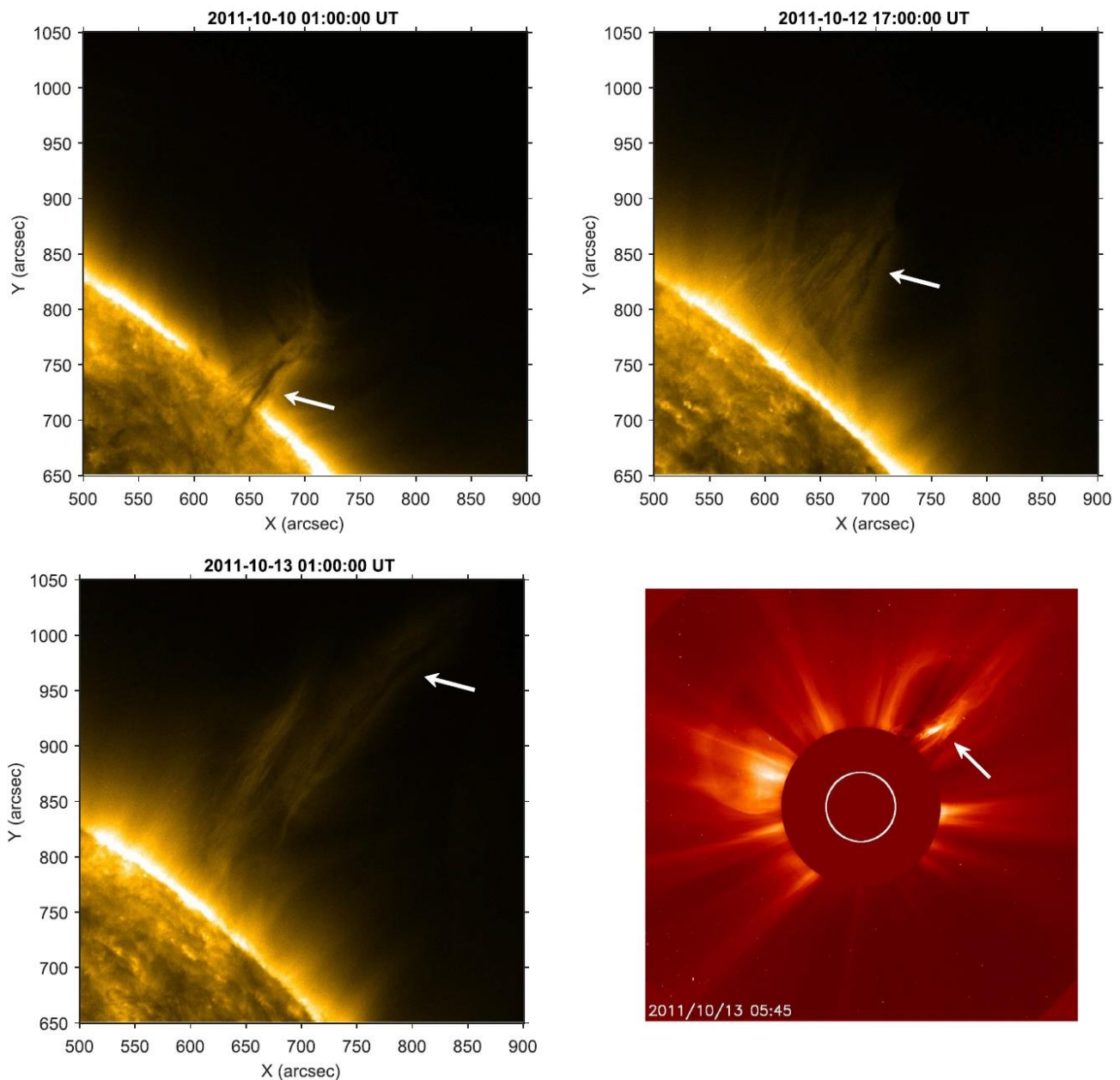
ცხრილი 3. 2011 წლის განმავლობაში დაკვირვებული ტორნადოების კლასიფიკაცია.

კატეგორია	რაოდენობა
ამოფრქვევადი ტორნადოები	80
აქტიური ტორნადოები	83
მილევადი ტორნადოები	3

4.1. ამოფრქვევადი ტორნადოები

ამოფრქვევად ტორნადოებში შედის ტორნადოები, რომლებიც საბოლოო ეტაპზე გახდნენ არამდგრადები და ამოიფრქვნენ. თავის მხრივ, ამ ამოფრქვევებმა წარმოქმნეს დესტაბილიზაცია ტორნადოსთან ასოცირებულ პროტუბერანცებში, რომლებიც საბოლოოდ ამოიფრქვნენ, როგორც კორონალური მასის ამოფრქვევა. ჩვენ დავაკვირდით 80 ასეთ ტორნადოს. ყველა მათგანისთვის შესაბამისი კორონალური მასის ამოფრქვევები იდენტიფიცირებული იქნა LASCO CME catalog-ში.

ერთ-ერთი ამოფრქვევადი ტორნადოს ევოლუცია და საბოლოო ეტაპი $171 \text{ \AA}$ სპექტრულ ხაზში ნაჩვენებია ნახ. 4.3-ზე. ტორნადო ჩამოყალიბდა 2011 წლის 3 ოქტომბრის 17:00 UT დროს, რის შემდეგაც არსებობდა 10 დღის განმავლობაში და საბოლოოდ 13 ოქტომბრის 01:00 UT-ზე ამოიფრქვა. ტორნადომ მზის კიდიდან ასვლა და დაშორება დაიწყო, რასაც საბოლოოდ ამოფრქვევა მოყვა თავის ასოცირებულ პროტუბერანცთან ერთად. მსგავსი ევოლუცია და ხასიათი დამახასიათებელია ყველა ამოფრქვევადი ტორნადოსთვის. LASCO CME catalog-ში კორონალური მასის ამოფრქვევის პირველი გამოჩენა დაფიქსირებულია C2 კორონოგრაფზე 13 ოქტომბრის 02:03:24 UT დროს, 216 კმ/წმ საშუალო სიჩქარით. აღნიშნულ CME-ს კუთხური სიგანე ქონდა 125° , ხოლო ცენტრალური პოზიციის კუთხე ჩრდილო-აღმოსავლეთ კიდეზე იყო 45° (იხ. ქვედა-მარჯვენა პანელი ნახ. 4.3-ზე).

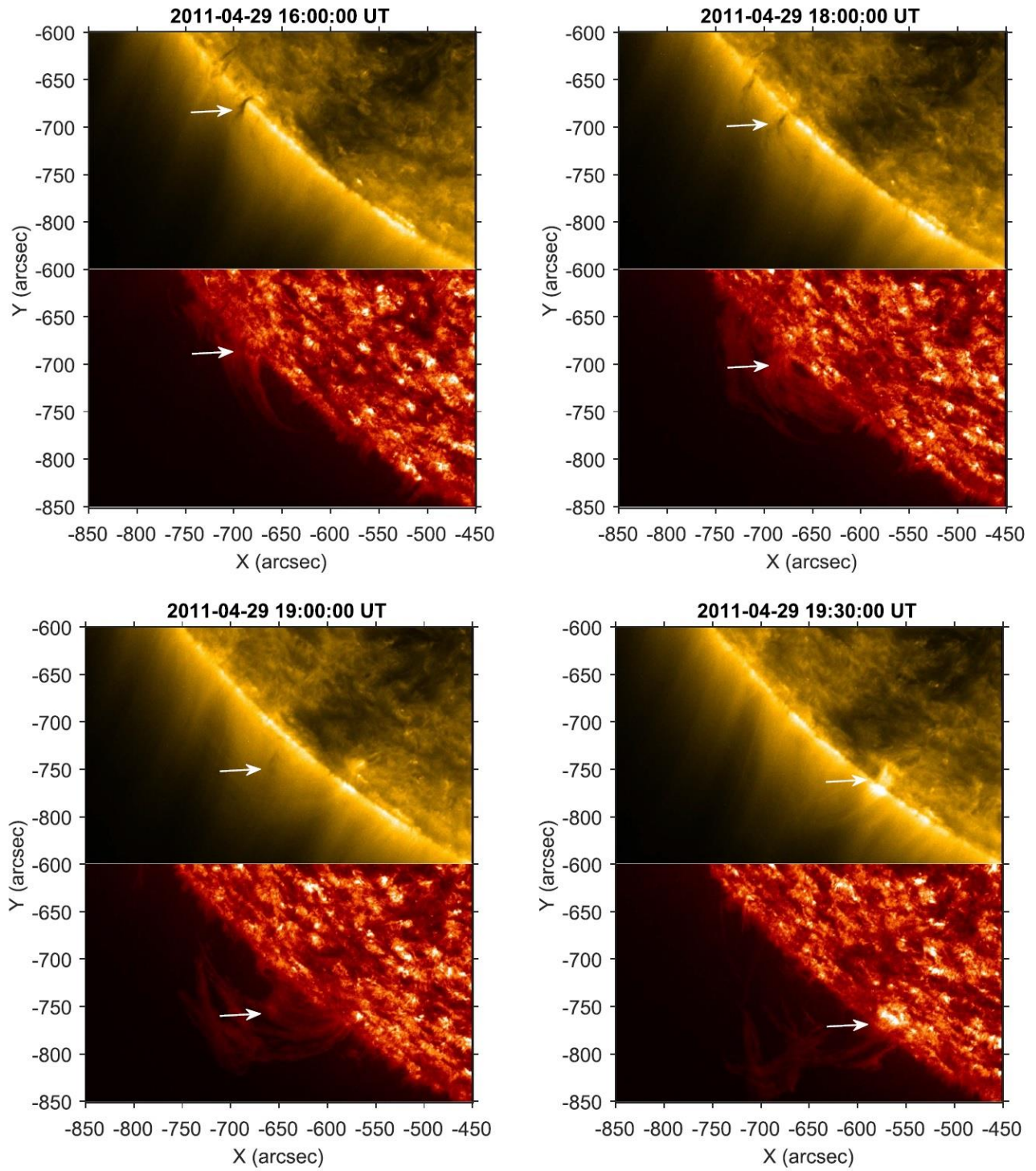


ნახ. 4.3 ერთ-ერთი ამოფრქვევადი ტორნადოს ევოლუცია და ამოფრქვევის ფაზა დაფიქსირებული SDO/AIA 171 Å ტალღის სიგრძეში. თეთრი ისარი მიუთითებს ტორნადოს ღერძის მდებარეობას ევოლუციის სხვადასხვა დროს. ქვედა-მარჯვენა პანელი აჩვენებს LASCO/C2-ის მიერ მიღებულ CME-ს გამონახვას. ზედა-მარცხენა პანელი გადაღებულია 2011 წლის 10 ნოემბერს 01:00 UT დროს, ზედა-მარჯვენა - 12 ნოემბერს 17:00 UT, ქვედა-მარცხენა პანელი 13 ნოემბერს 01:00 UT, ხოლო ქვედა-მარჯვენა პანელზე დაფიქსირებულია CME-ს ამოფრქვევის ფაზა 13 ნოემბრის 05:45 UT დროს. თეთრი რგოლი აჩვენებს მზის დისკის მდებარეობას.

4.2. აქტიური ტორნადოები

მეორე კატეგორიაში შედიან ტორნადოები, რომლებმაც თავიანთი არსებობის ბოლო ეტაპზე განიცადეს რაიმე სახის აქტივობა. ზოგიერთი მათგანი Event Catalog-ში ასოცირებული იყო აქტიურ პროტუბერანცებთან. ზოგიერთმა მათგანმა წარმოქმნა არშემდგარი კორონალური მასის ამოფრქვევა (Failed CME), როდესაც ამოფრქვევა არ შედგა და პლაზმა უკან დაეშვა მზის ზედაპირზე. ტორნადოების ნაწილი ასოცირებული იყო *წყნარ* პროტუბერანცებთან (Quiescent prominences), მაგრამ მათაც განიცადეს სხვადასხვა სახის აქტივობა, როგორიც არის გარდამავალი დინებები (Transition flows) დაკავშირებული მასპინძელ მოვლენებთან. ამ კატეგორიაში შემავალი ტორნადოები ხშირად ახდენენ ზეგავლენას გარემოზე.

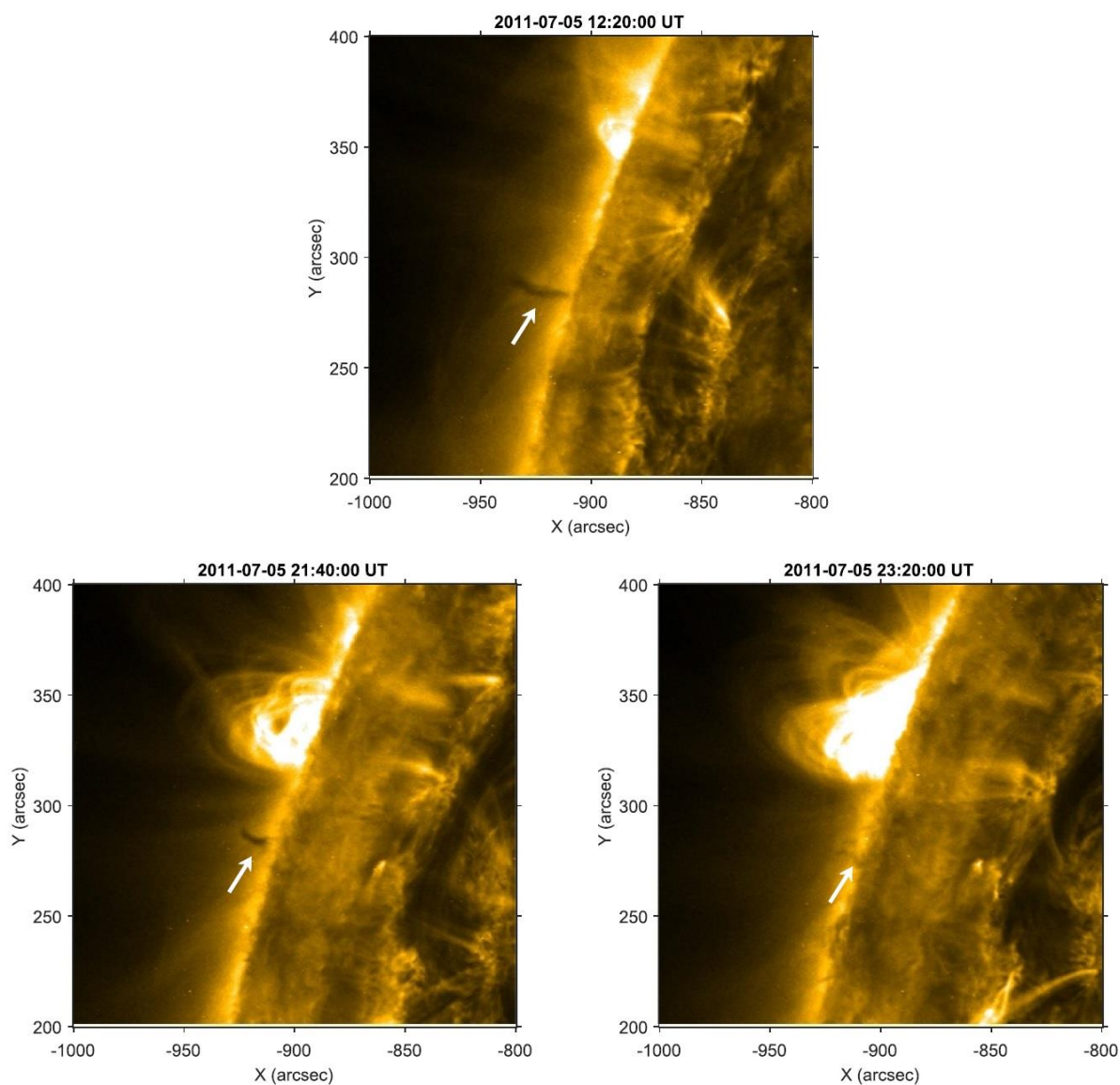
ნახ. 4.4-ზე ნაჩვენებია აქტიური ტორნადოების ერთ-ერთი მაგალითი. ამ შემთხვევაში დავაკვირდით რამდენიმე აქტიურ ტორნადოს 171 და 304 Å სპექტრულ ხაზებში. 171 Å ფილტრში ჩვენ ვხედავთ ტორნადოთა ჯგუფს, რომელიც შედგებოდა ორი მეზობელი სტრუქტურისგან (იხ. ნახ. 4.4-ის ზედა-მარცხენა პანელი). ტორნადო გააქტიურდა 29 აპრილს დაახლოებით 18:00 UT-ზე, რის დროსაც ნელა დაიწყო მალლა ასვლა (იხ. ზედა-მარჯვენა პანელი). ტორნადო საბოლოოდ გადაადგილდა მარყუქის მეორე მხარეს და გაქრა ზედაპირთან ახლოს. მეორე მხრივ, 304 Å ფილტრში კარგად ჩანს თუ როგორ გადაადგილდა მეორე მხარეს არსებული განათებული პლაზმა, რამაც გამოიწვია მზის ზედაპირთან ახლოს ნათება. შესაბამისად, აქტიური ტორნადოები ზოგადად თავიანთ მასპინძელ პროტუბერანცებში იწვევენ დესტაბილიზაციას და უბიძგებენ სხვადასხვა სახის აქტიურობისკენ, როგორიცაა: მიკროანთებები და/ან არშემდგარი კორონალური მასის ამოფრქვევები. მთლიანი დაკვირვებული 166 მოვლენიდან 83 კლასიფიცირდა, როგორც აქტიური ტორნადო.



ნახ. 4.4 აქტიური ტორნადოს ერთ-ერთი მაგალითი დაკვირვებული SDO/AIA 171 (ზედა ყვითელი პანელები) და 304 Å (ქვედა წითელი პანელები) სპექტრულ ხაზებში. თეთრი ისარი მიუთითებს ტორნადოს მდებარეობას.

4.3 მილევადი ტორნადოები

მესამე კატეგორია მოიცავს ტორნადოებს, რომლებიც თანდათანობით შემცირდნენ ზომაში და გაქრნენ რაიმე ცხადი სახის აქტივობის გარეშე. ჩვენს შემთხვევაში მთლიანი წლის განმავლობაში დავაკვირდით მხოლოდ სამ ასეთი სახის მოვლენას. ნახ. 4.5-ზე ნაჩვენებია ერთ-ერთი მილევადი ტორნადოს ევოლუცია 2011 წლის 05 ივლისის 05:00 – 23:00 UT განმავლობაში. 171 Å სპექტრულ ხაზში დაკვირვებულ გამონასახზე ნათლად ჩანს თუ როგორ დაპატარავდა ზომაში ტორნადო და საბოლოოდ გაქრა. რაიმე სახის აქტივობა არც ტორნადოსთან ასოცირებულ პროტუბერანცში არ დაფიქსირებულა, რომელსაც დავაკვირდით AIA-ს 304 Å სპექტრულ ხაზში. აღსანიშნავია, რომ ტორნადოს გაქრობის შემდგომ გამოჩნდა გადანათება მასთან ახლოს მდებარე აქტიურ რეგიონში (ჩრდილო-აღმოსავლეთით). ჩვენ ვერც ვამტკიცებთ და ვერც ვუარყოფთ კავშირს ტორნადოსა და აქტიური რეგიონის ნათებას შორის. ამიტომაც ვუწოდებთ მათ მილევად ტორნადოებს. ამ კატეგორიაში შემავალი ტორნადოების (166 ტორნადოდან მხოლოდ 3) მცირე რაოდენობა, ბადებს ტორნადოს გაქრობის ეჭვებს რაიმე სახის აქტიურობის გარეშე. შესაძლოა, ჩვენ არ შეგვიძლია ტორნადოს აქტივობის დაფიქსირება სივრცული გარჩევადობის ან რაიმე სხვა სახის მიზეზის გამო.



ნახ. 4.5 გამონასახებზე ნაჩვენებია მილევადი ტორნადოს საბოლოო ეტაპი. დაკვირვებები მიღებულია SDO/AIA-ს $171 \text{ \AA}$ ტალღის სიგრძეზე. თეთრი ისარით ნაჩვენებია ტორნადოს ღერძის ადგილმდებარეობა.

თავი 5. შედეგების ინტერპრეტაცია/დისკუსია

მზის ტორნადოს წარმოშობის, ევოლუციის და დინამიკის შესასწავლად, პირველად ჩვენ ავირჩიეთ ერთი კონკრეტული მოვლენა, რომელსაც დავაკვირდით დეტალურად. ჩვენ შევისწავლეთ 2012 წლის 7-8 ნოემბერს დაფიქსირებული მზის ტორნადო SDO/AIA-ს მაღალი გარჩევადობის 171, 193, 211 და 304 Å ფილტრებში დაკვირვებული მონაცემების საშუალებით. თავდაპირველად ტორნადო გამოჩნდა 7 ნოემბრის 08:00 UT დროს და დაახლოებით 30 საათის შემდგომ ამოიფრქვა, როგორც CME. LASCO CME catalog-ში ეს დრო დაფიქსირებულია, როგორც 2012 წლის 8 ნოემბრის 15:36 UT. პირველი გამოჩენის შემდგომ ტორნადო თანდათანობით სიმაღლეში გაიზარდა ~ 1.5 კმ/წმ სიჩქარით. ეს სიდიდე გაცილებით ნაკლებია კორონის მახასიათებელ ალვენის და/ან ბგერითი სიჩქარეებისთვის და უფრო შეეფერება Panesar et al. (2013)-ის მიერ შეფასებულ გაფართოების სიჩქარეს.

დრო-მანძილის დიაგრამამ აჩვენა ტორნადოს ღერძის ორი კვაზი-პერიოდული რხევა მისი არსებობის განმავლობაში. პირველ რხევას დავაკვირდით ტორნადოს ევოლუციის ადრეულ ფაზაში, როდესაც ის სიმაღლეში იზრდებოდა. რხევა 7 საათის განმავლობაში გრძელდებოდა. რხევის პერიოდი საწყის ეტაპზე შეადგენდა 40 წუთს, ხოლო ბოლოს მიაღწია 100 წუთამდე. ეს რხევა შესაძლოა გამოეწვია დაგრეხილი ტორნადოს ზემოთ მოძრაობას. რაც შეეხება მეორე დაკვირვებული რხევას, ამ დროს ტორნადოს სიმაღლეში ზრდა უკვე დამთავრებული ჰქონდა და შესაბამისად ეს მექანიზმი ამ მოვლენას სავარაუდოდ ვერ აღწერს. მეორე რხევა გრძელდებოდა 5 საათის განმავლობაში, 50 წუთიანი საშუალო პერიოდით. ტორნადოს ღერძის სხვადასხვა სიმაღლეზე ერთნაირ ფაზაში ირხეოდა, ხოლო რხევის ამპლიტუდა სიმაღლის მიხედვით იზრდებოდა. შესაბამისად შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ტორნადოს ერთი ბოლო დაფიქსირებული იყო ფოტოსფეროში, ხოლო მეორე ღია ბოლო ირხეოდა კორონაში. ეს რხევა შესაძლოა გამოწვეული იყო ან ტორნადოს მდგარი კინკ რხევით, ან მისი შემადგენელი ორი ძაფის ბრუნვით საერთო ღერძის გარშემო. თუ ტორნადოს რხევა

გამოწვეული იყო კინკ რხევით, მაშინ დაკვირვებული ტორნადოს სიგრძით და რხევის პერიოდით შეგვიძლია შევაფასოთ ალვენის სიჩქარე, როგორც 50 კმ/წმ, თუკი რხევას განვიხილავთ როგორც ფუნდამენტურ ჰარმონიკას. მიღებული ალვენის სიჩქარით და პროტუბერანცებისთვის დამახასიათებელი სიმკვრივის გამოყენებით შევაფასეთ ტორნადოს მაგნიტური ველის სიდიდე, როგორც 4 გაუსი. თუკი რხევას განვიხილავთ როგორც პირველ ჰარმონიკას, მაშინ ალვენის სიჩქარე მიიღება 25 კმ/წმ, ხოლო მაგნიტური ველის სიდიდე 2 გაუსი.

მეორეს მხრივ, თუ რხევა გამოწვეულია ტორნადოს ორი ძაფის ბრუნვით საერთო ღერძის გარშემო, მაშინ ბრუნვის სიჩქარე შევაფასეთ როგორც ~ 6 კმ/წმ (ამ შემთხვევაში ბრუნვა არ განიხილება კლასიკური გაგებით, როდესაც ტორნადო ბრუნავს მყარი სხეულის მსგავსად). 171 Å ფილტრში გადაღებულმა დროითმა სერიებმა ნათლად აჩვენეს ტორნადოს ბრუნვა, რაც შესაძლოა გამოწვეულია Panasenco et al. (2014)-ის მიერ შემოთავაზებული „ბრუნვის ილუზიით“, როდესაც ტორნადოს ღერძის რხევა ან დაგრეხილი ტორნადოს სიმაღლეში გადაადგილება ქმნის ბრუნვითი მოძრაობის ილუზიას. თუმცა, სხვადასხვა ავტორების მიერ სპექტროსკოპული დაკვირვებებით მიღებული დოპლერის ლურჯი და წითელი წანაცვლება რიგ შემთხვევებში ადასტურებს ტორნადოების ბრუნვას (Orozco Suarez et al. 2012; Wedemeyer-Böhm et al. 2013; Su et al. 2014; Levens et al. 2015). ტორნადოს ბრუნვა შესაძლოა იყოფოდეს კინკ ტალღების $m = 1$ და $m = -1$ მოდებად, სადაც m წარმოადგენს აზიმუტალურ ტალღურ რიცხვს. ამ მოდებს გააჩნიათ განსხვავებული სიხშირეები, რომლებსაც შეუძლიათ ტორნადოს ორ ძაფად გაყოფა, რაც დაკვირვებულ იქნა ჩვენს შემთხვევაში.

საბოლოოდ, 8 ნოემბრის 15:00 UT-ზე ტორნადო გახდა არამდგრადი, რასაც მოჰყვა ტორნადოს თავზე არსებული კორონალური ღრმულის გაფართოება და საბოლოოდ კორონალური მასის ამოფრქვევა. მაგნიტური გარღვევის მოდელით (Antiochos et al. 1999) კარგად აიხსნება პროტუბერანცის და მის ზემოთ მდებარე კორონალური ღრმულის ევოლუცია. ამ მოდელის თანახმად, ზემოთ ასულმა კორონალურმა ღრმულმა შექმნა მაგნიტური ძალწირების ისეთი სტრუქტურა, სადაც მოხდა მაგნიტური გადაერთება. გადაერთებამ გაათავისუფლა შემოსაზღვრული მაგნიტური ძალწირები და გამოწვია

CME. ვინაიდან კორონული ღრმულის თავზე არ დაფიქსირდა რაიმე სიკაშკაშე, მაგნიტური გადაერთება უნდა მომხდარიყო Sweet-Parker model-ით, რომელსაც არ ახასიათებს ენერგიის სწრაფი გამოთავისუფლება.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, დაკვირვებული ტორნადოს ღერძის მეორე რხევა თუ გამოწვეული იყო კინკ ტალღებით, მაშინ მაგნიტური ველის სიძლიერე უნდა ყოფილიყო 4-5 გაუსი. ბრუნვას შეუძლია მაგნიტური ძალწირების დაგრეხვა ტორნადოს შიგნით. თუმცა, აზიმუტალური კომპონენტი არ შეიძლება იყოს ღერძულ კომპონენტზე ძლიერი, რადგანაც მაგნიტური მილი გახდება არამდგრადი კინკ არამდგრადობის მიმართ, როდესაც გრეხვა გადაცდება გარკვეულ ზღვრულ სიდიდეს. არამდგრადობის კრიტერიუმი მარტივი ერთგვაროვანი სტატიკური მილისთვის არის $B_\phi > 2B_z$, სადაც B_ϕ არის მაგნიტური ველის აზიმუტალური კომპონენტი, ხოლო B_z - ღერძული კომპონენტი (Lundquist. 1951; Zaqarashvili et al. 2010, 2014). შესაბამისად, მაგნიტური ველის აზიმუტალური კომპონენტი ტორნადოს შიგნით არ შეიძლება იყოს 10 გაუსზე მეტი. შესაძლოა ითქვას, რომ მაგნიტური ველი თანდათანობით დაიგრიხა ტორნადოს ბრუნვის გამო, სანამ არ გახდა არამდგრადი კინკ არამდგრადობის შედეგად. შემდგომ ტორნადომ შეაშფოთა პროტუბერანცი, რასაც მოჰყვა მისი ზემოთ ასვლა და მაგნიტური გამოთავისუფლების მოდელის მეშვეობით მაგნიტური გადაერთება, რამაც გამოიწვია CME.

ცხელ კორონულ ხაზებში ტორნადოები დაიკვირვებიან შავი სტრუქტურების სახით, და როგორც წესი ასოცირებულები არიან პროტუბერანცის ფეხებთან. შესაბამისად, მათი დინამიკა მჭიდროდ დაკავშირებულია თვითონ პროტუბერანცების ევოლუციასთან. ტორნადოს ბრუნვა ამჟამად ჯერ კიდევ განხილვის საგანია. ბოლო დროს მაგნიტური ველის გაზომვებმა აჩვენა, რომ ველის დახრა პროტუბერანცების ფეხებთან ძირითადად ჰორიზონტალურია, ანუ პარალელურია მზის კიდის მიმართ (Schmieder et al. 2015; Levens et al. 2016a, 2016b, 2017). თუმცა, მაგნიტური ველის სტრუქტურის სხვა შესაძლო კონფიგურაციებიც შესაძლებელია არსებობდეს. დაკვირვებები თვალსაჩინოდ აჩვენებენ მაგნიტური ველის დაგრეხვას ტორნადოს შიგნით, რადგანაც ისინი დაიკვირვებიან ვერტიკალურად წაგრძელებული სტრუქტურის მსგავსად. Martínez

González et al. (2016) დააფიქსირეს სპირალური მაგნიტური ველის სტრუქტურა ტორნადოს მსგავს პროტუბერანცის ფეხებთან. შესაბამისად, ტორნადოები უფრო ხშირად ჰგავს დაგრეხილი მილის ნაკადებს. დაგრეხილ, არაპოტენციურ მაგნიტურ კონფიგურაციას შეუძლია სათანადოდ შეინახოს თავისუფალი მაგნიტური ენერგია, რაც წარმოადგენს მთავარ მარაგს CME-თვის და ამოფრქვევებისთვის (Priest and Forbes. 2002). უფრო მეტიც, ჰორიზონტალური მაგნიტური ველის მქონე აქტიური რეგიონები წარმოშობენ ძლიერ ანთებებს (Kusano et al. 2012). გაზომვებით დგინდება, რომ მაგნიტური ველის სიძლიერე ტორნადოს შიგნით არის დაახლოებით 15 გაუსი, თუმცა ზოგიერთ ადგილებში აღწევს 40-60 გაუსამდე (Levens et al. 2016b). დაგრეხილი მილი ხშირად განიცდის მაგნიტურ არამდგრადობას (მაგალითად, კინკ არამდგრადობას), როდესაც დაგრეხვა მიაღწევს გარკვეულ კრიტიკულ ზღვარს (Lundquist. 1951; Kuridze et al. 2013; Zaqarashvili et al. 2014). შესაბამისად, ტორნადოები შესაძლოა გახდნენ არამდგრადები გაზრდილი მაგნიტური ველის დაჭიმულობის გამო. ამ შემთხვევაში, მათ შეუძლიათ გამოიწვიონ არამდგრადობა დიდი მასშტაბებით თავის მასპინძელ პროტუბერანცში, რასაც შეუძლია მოჰყვეს CME (Wedemeyer-Böhm et al. 2013). მეორეს მხრივ, ტორნადოები შესაძლოა გახდნენ არამდგრადები Kelvin-Helmholtz instability-ით (Zaqarashvili et al. 2010, 2015), რასაც შესაძლოა მოჰყვეს სტრუქტურის გაცხელება და საბოლოოდ გაქრობა.

ტორნადოს მსგავს პროტუბერანცებში სტაბილურობის თვისებების შესასწავლად ჩვენ გამოვიყენეთ 2011 წლის SDO/AIA-ს მონაცემები. მთელი წლის განმავლობაში $171 \text{ \AA}$ სპექტრულ ხაზში გამოჩენილი ყველა ტორნადო შევისწავლეთ დეტალურად. შედეგად, დავაკვირდით 361 მოვლენას, რომელიც მოიცავს როგორც ინდივიდუალურ ტორნადოებს, ასევე ტორნადოთა ჯგუფებს. თუმცა, ჩვენ ვერ მივყევით ყველა მათგანს სიცოცხლის ბოლომდე, რადგან ზოგიერთი მათგანი მიეფარებოდა მზის აღმოსავლეთ კიდიდან თვალსაწიერს მზის ბრუნვის გამო, ხოლო ზოგიერთი მათგანი დასავლეთ კიდიდან შემოდიოდა მზის დისკზე და პროექციის გამო მათი იდენტიფიცირება გართულებული იყო. საბოლოოდ, ჩვენ ავარჩიეთ 166 ტორნადო, რომელთაც მივყევით სათითაოდ მათი არსებობის ბოლომდე. საგულდაგულოდ შევისწავლეთ თითოეული ტორნადო, განსაკუთრებით მათი საბოლოო ეტაპი. ჩვენ შევქმენით კატალოგი შერჩეული

166 ტორნადოს მიხედვით, რომელიც მოყვანილია დანართის სახით. კატალოგი მოიცავს საწყის და საბოლოო დროს, საწყის მზის კოორდინატებს, თუ რა ტიპის ტორნადოს ვაკვირდებოდით და სიცოცხლის ხანგრძლივობას. საბოლოო ეტაპის გათვალისწინებით, ტორნადოები დავყავით სამ კატეგორიად. *ამოფრქვევადი ტორნადოები*, რომელთაც განიცადეს მასშტაბური არამდგრადობა, რასაც მოჰყვა მასთან ასოცირებული პროტუბერანცების კორონალური მასის ამოფრქვევა. ყველა CME გავაიგივეთ LASCO CME catalog-ში და მათი დაფიქსირებული დროები მოყვანილია ჩვენს კატალოგში. *აქტიური ტორნადოები*, რომლებიც განიცდიდნენ სხვადასხვა სახის აქტიურობას, როგორცაა არშემდგარი CME და/ან პლაზმის ნაკადების გადასვლები. ასევე ამ კატეგორიის ტორნადოები ზოგიერთ შემთხვევაში აღძრავენ მიკრო ანთებებს. მესამე კატეგორიას წარმოადგენენ *მიღვევადი ტორნადოები*, რომლებიც ზოგადად არ აჩვენებენ არანაირი სახის აქტივობას და ისე ამთავრებენ თავიანთ სიცოცხლეს.

ყველა დაკვირვებული ტორნადო ჩვენს შემთხვევაში ასოცირებული იყო პროტუბერანცებთან. ჩვენ არ შეგვისწავლია პროტუბერანცები ტორნადოების გარეშე, თუმცა HEK-ის მიხედვით 2011 წელს დაფიქსირდა 7529 პროტუბერანცი. სავარაუდოდ, მზის კიდეზე მათი მესამედი მაინც გამოჩნდებოდა, რაც ნიშნავს, რომ მთლიანი წლის განმავლობაში დაახლოებით 2500 პროტუბერანცი უნდა დაფიქსირებულიყო მზის კიდეზე. Wang et al. (2010) ასევე დაადგინა, რომ მზის აქტიურობის მინიმალურ ფაზაში, მზის კიდეზე სულ მცირე 10 პროტუბერანცი მაინც ჩანს ერთი დღის განმავლობაში. ჩვენს შემთხვევაში 2011 წელს დავაფიქსირეთ 361 ტორნადო, რის მიხედვითაც შეგვიძლია უხეშად შევაფასოთ, რომ პროტუბერანცების 10 – 15 %-ს ჰყავს ტორნადო.

166 ამორჩეული ტორნადოდან, 80 (48%) იყო *ამოფრქვევადი*, რომლებსაც მოჰყვა კორონალური მასის ამოფრქვევა, 83 (50%) იყო *აქტიური* და მხოლოდ 3 (2%) წარმოადგენდა *მიღვევად* ტორნადოს, ანუ რომლებიც გაქრნენ რაიმე სახის აქტივობის გარეშე. აქედან შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ თითქმის ყველა ტორნადოს მსგავსი პროტუბერანცი აჩვენებს რაიმე სახის აქტიურობას, იქნება ეს ამოფრქვევა, არშემდგარი ამოფრქვევა თუ შინაგანი არამდგრადობა. მეორეს მხრივ, ტორნადოს მსგავსი პროტუბერანცების თითქმის ნახევარი ამოიფრქვა როგორც CME. ეს წარმოადგენს ძალიან

საინტერესო სტატისტიკურ შედეგს, რომელმაც შეიძლება მნიშვნელოვანი როლი ითამაშოს კოსმოსური ამინდის წინასწარმეტყველებაში. თუ ტორნადოს მსგავსი სტრუქტურა შევნიშნეთ პროტუბერანცის ფეხებთან, ჩვენ შეგვიძლია 50% ალბათობით ვთქვათ, რომ ის ამოიფრქვევა როგორც კორონალური მასის ამოფრქვევა. ამოფრქვევადი ტორნადოების საშუალო სიცოცხლის ხანგრძლივობა მერყეობდა 25-დან 75 საათამდე, რაც იმას ნიშნავს, რომ CME-ს აღბერას უნდა ველოდოთ ტორნადოს მსგავსი პროტუბერანცის ფორმირებიდან 1-3 დღის შემდგომ.

უნდა აღინიშნოს, რომ მიღებული შედეგები წარმოადგენს სიახლეს და მსგავსი ტიპის სამუშაოები მზის ტორნადოებზე არ ჩატარებულა სხვა ავტორების მიერ. მიღებული შედეგი ძალიან მნიშვნელოვანია კოსმოსური ამინდის პროგნოზირებისთვის. კორონალური მასის ამოფრქვევების წინასწარმეტყველება გვაძლევს დამატებით დროს, მის წინააღმდეგ ზომების მისაღებად, რათა თავიდან აცილებულ იქნეს იმ ტექნიკური თუ მატერიალური რესურსის მწყობრიდან გამოსვლა, რაც შეუძლია გამოიწვიოს დედამიწისკენ წამოსულმა მაღალ ენერგეტიკულმა ნაწილაკებმა. ჩატარებული კვლევა და მიღებული შედეგები ძალიან მნიშვნელოვანია, როგორც მზის ფიზიკისთვის, ასევე კოსმოსური ამინდის პროგნოზისათვის.

დასკვნა

- შესწავლილ იქნა 2012 წლის 7-8 ნოემბერს დაფიქსირებული მზის ტორნადო SDO/AIA-ს მაღალი გარჩევის 171, 193, 211 და 304 Å ფილტრების საშუალებით, რომელიც დაიკვირვებოდა 30 საათის განმავლობაში და მისი მაქსიმალური სიმაღლე შეადგენდა 50 000 კმ-ს.
- გამოვლენილ იქნა ტორნადოს ღერძის ორი კვაზი-პერიოდული რხევა მისი არსებობის განმავლობაში სხვადასხვა სიმაღლეზე. რხევა წარმოადგენდა მდგარ ტალღას და მისი პერიოდი იყო 50 წუთი.
- ტორნადოს შიგნით ალვენის სიჩქარე შევაფასეთ როგორც 50 კმ/წმ, ხოლო მაგნიტური ველის სიძლიერე 4 გაუსი.
- ტორნადოს საბოლოო ეტაპზე დაკვირვებულ იქნა არამდგრადობა, რასაც მოჰყვა მაგნიტური გადაერთება გამოწვეული მაგნიტური გარღვევის მოდელით და საბოლოოდ ტორნადოს ამოფრქვევა CME-ის სახით.
- დისერტაციაში პირველად არის ჩატარებული სტატისტიკური ანალიზი მზის ტორნადოებზე. დაკვირვება მოიცავდა ერთი მთლიანი წლის პერიოდს, რის დროსაც გამოვლინდა 361 ტორნადო და ტორნადოთა ჯგუფები.
- დეტალურად შესწავლილი 166 ტორნადოდან, 80 (48%) წარმოადგენდა *ამოფრქვევად* ტორნადოს, 83 (50%) - *აქტიურ* ტორნადოს და მხოლოდ 3 (2%) - *მიღევად* ტორნადოს.
- გამოვლენილ იქნა, რომ თითქმის ყველა ტორნადოს მსგავსი პროტუბერანცი განიცდის რაიმე სახის აქტივობას, რასაც შეიძლება მოჰყვეს ამოფრქვევა, არშემდგარი ამოფრქვევა ან შინაგანი არამდგრადობა.
- ჩვენს მიერ შესწავლილი ტორნადოების შედეგად დადგინდა, რომ ტორნადოს მსგავსი პროტუბერანცების თითქმის ნახევარი ამოიფრქვევა როგორც CME.
- მიღებული შედეგებით შესაძლებელია, რომ ტორნადოები გამოვიყენოთ CME-ს პროგნოზირებისთვის, რაც კოსმოსური ამინდის ერთ-ერთ მთავარ ამოცანას წარმოადგენს.

სამომავლო განვითარება

სამომავლოდ დაგეგმილია სადისერტაციო ნაშრომის ფარგლებში ჩატარებული კვლევა განვითარდეს ორივე მიმართულებით, როგორც ცალკეული ტორნადოს შესწავლით, ასევე სტატისტიკური ანალიზის მეშვეობით. კონკრეტული მოვლენის შესწავლა მოხდება ჩვენს ხელთ არსებული ლა პალმაზე (ესპანეთი) მდებარე შვედური 1 მეტრიანი მზის ტელესკოპით (Swedish 1-m Solar Telescope - SST; Scharmer et al. 2003) მიღებული სპექტრული მონაცემების მეშვეობით. სპექტრული დაკვირვებები საშუალებას მოგვცემენ უფრო დეტალურად შევისწავლოთ ტორნადოს ბრუნვითი ხასიათი.

ტორნადოების კავშირის დასადგენად CME-ებთან გამოვიყენეთ SDO/AIA-ს მონაცემები, რომელიც მდებარეობს გეოსინქრონულ ორბიტაზე და მზეს მხოლოდ ერთი მიმართულებით უყურებს. ჩვენს მიერ დაკვირვებული 361 ტორნადო/ტორნადოთა ჯგუფიდან 195 გამოირიცხა შემდგომი კვლევებიდან, რადგანაც მათი საბოლოო ეტაპის დაკვირვება ვერ მოხერხდა მათი მზის კიდიდან გადასვლის გამო. სრული სურათის დასადგენად საჭიროა მზეს დავაკვირდეთ სხვადასხვა კუთხიდან. შესაბამისად, შემდგომ კვლევებში დაგეგმილია SDO-სთან ერთად დაკვირვებები მოხდეს STEREO-დანაც (Solar Terrestrial Relations Observatory), რომლის ორი ტელესკოპი - A და B მზეს უყურებენ განსხვავებული კუთხიდან. ამგვარი დაკვირვება მოგვცემს მზის მთლიანი ზედაპირის დაკვირვებებს.

ბიბლიოგრაფია

- Antiochos, S. K., DeVore, C. R., and Klimchuk, J. A. 1999, A Model for Solar Coronal Mass Ejections, *The Astrophysical Journal*, 510, 485
- Arregui, I., Oliver, R., and Ballester, J. L. 2012, Prominence Oscillations, *LRSP*, 9, 2
- Aschwanden, M. J., 2004, Physics of the Solar Corona. An Introduction, *Praxis Publishing LTD, Chichester, UK and Springer*
- Attie, R., Innes, D. E., and Potts, H. E. 2009, Evidence of photospheric vortex flows at supergranular junctions observed by FG/SOT (Hinode), *Astronomy & Astrophysics*, 493, 13
- Aulanier, G., DeLuca, E. E., Antiochos, S. K., McMullen, R. A., and Golub, L. 2000, The Topology and Evolution of the Bastille Day Flare, *The Astrophysical Journal*, 540, 1126
- Berger, T. E., Shine, R. A., Slater, G. L., Tarbell, T. D., Title, A. M., Okamoto, T. J., Ichimoto, K., Katsukawa, Y., Suematsu, Y., Tsuneta, S., Lites, B. W., and Shimizu, T., 2008, Hinode SOT Observations of Solar Quiescent Prominence Dynamics, *The Astrophysical Journal Letters*, 676, 89
- Bonet, J. A., Márquez, I., Sánchez Almeida, J., Cavello, I., and Domingo, V. 2008, Convectively Driven Vortex Flows in the Sun, *The Astrophysical Journal*, 687, 131
- Bonet, J. A., Márquez, I., Sánchez Almeida, J., Palacios, J., Martinez Pillet, V., Solanki, S. K., del Toro Iniesta, J. C., Domingo, V., Berkefeld, T., Schmidt, W., Gandorfer, A., Barthol, P., and Knölker, M., 2010, SUNRISE/IMaX Observations of Convectively Driven Vortex Flows in the Sun, *The Astrophysical Journal*, 723, 139
- Brandt, P. N., Scharmer, G. B., Ferguson, S., Shine, R. A., and Tarbell, T. D. 1988, Vortex flow in the solar photosphere, *Nature*, 335, 238
- Chen, P.F., Innes, D.E. and Solanki, S.K., 2008, “SOHO/SUMER observations of prominence oscillation before eruption”, *Astronomy and Astrophysics*, 484, 487
- Chen, j., Howard, R. A., Brueckner, G. E., Santoro, R., Krall, J., Paswaters, S. E., St. Cyr, O. C., Schwenn, R., Lamy, P., and Simnett, G. M., 1997, Evidence of an Erupting Magnetic Flux Rope: LASCO Coronal Mass Ejection of 1997 April 13, *The Astrophysical Journal*, 490, 191
- Chen, P. F., 2011, Coronal Mass Ejections: Models and Their Observational Basis, *Living Reviews in Solar Physics*, 8, 92

- Dere, K. P., Brueckner, G. E., Howard, R. A., Michels, D. J., and Delaboudiniere, J. P. 1999, LASCO and EIT Observations of Helical Structure in Coronal Mass Ejections, *The Astrophysical Journal*, 516, 465
- Domingo, V., Fleck, B., and Poland, A. I. 1995, The SOHO Mission: An Overview, *Solar Physics*, 162, 1,
- Foukal, P.V., 2004, *Solar Astrophysics*, Wiley-VCH, Weinheim, 2nd rev. edn.
- Gopalswamy, N., Lara, A., Yashiro, S., Nunes, S. and Howard, R.A., 2003, “Coronal mass ejection activity during solar cycle 23”, in *Solar Variability as an Input to the Earth’s Environment, International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium, 23 – 28 June 2003*, Tatranska Lomnica, Slovak Republic, (Ed.) Wilson, A., vol. SP-535 of ESA Special Publication, pp. 403–414, ESA Publications Division, Noordwijk.
- Harvey, J. W., 1969, Magnetic Fields Associated with Solar Active-Region Prominences, Ph.D. thesis, University of Colorado at Boulder, Boulder, CO.
- Illing, R. M. E., and Hundhausen, A. J. 1985, Observation of a coronal transient from 1.2 to 6 solar radii, *Journal of Geophysical Research*, 90, 275
- Isobe, H., and Tripathi, D. 2006, Large amplitude oscillation of a polar crown filament in the pre-eruption phase, *Astronomy & Astrophysics*, 449, 17
- Isobe, H., Tripathi, D., Asai, A., and Jain, R. 2007, Large-Amplitude Oscillation of an Erupting Filament as Seen in EUV, H_{α} , and Microwave Observations, *Solar Physics*, 246, 89
- Janssen, M., 1869, “The Total Solar Eclipse of August 1868. Part II.”, *Astron. Reg.*, 7, 131–133.
- Jing, J., Lee, J., Spirock, T. J., Xu, Y., Wang, H., and Choe, G. S., 2003, Periodic Motion along a Solar Filament Initiated by a Subflare, *The Astrophysical Journal*, 584, 103
- Jing, J., Yurchyshyn, V.B., Yang, G., Xu, Y. and Wang, H., 2004, “On the Relation between Filament Eruptions, Flares, and Coronal Mass Ejections”, *The Astrophysical Journal*, 614, 1054
- Kuridze, D., Mathioudakis, M., Kowalski, A. F., Keys, P. H., Jess, D. B., Balasubramaniam, K. S., and Keenan, F. P., 2013, Failed filament eruption inside a coronal mass ejection in active region 11121, *Astronomy & Astrophysics*, 552, A55
- Kusano, K., Bamba, Y., Yamamoto, T. T., Iida, Y., Toriumi, S., and Asai, A., 2012, Magnetic Field Structures Triggering Solar Flares and Coronal Mass Ejections, *The Astrophysical Journal*, 760, 31
- Labrosse, N., Heinzel, P., Vial, J.-C., Kucera, T., Parenti, S., Gunár, S., Schmieder, B., and Kilper, G., 2010, Physics of Solar Prominences: I-Spectral Diagnostics and Non-LTE Modelling, *Space Science Reviews*, 151, 243
- Leighton, R. B., Noyes, R. W., and Simon, G. W., 1962, Velocity Fields in the Solar Atmosphere. I. Preliminary Report, *Astrophysical Journal*, 135, 474

- Lemen, J. R., Title, A. M., Akin, D. J., Boerner, P. F., Chou, C., Drake, J. E., Duncan, D. W., Edwards, C. G., Friedlaender, F. M., Heyman, G. F., Hurlburt, N. E., Katz, N. L., Kushnrm G. D., Levay, M., Lindgren, R. W., Mathur, D. P., McFeaters, E. L., Mitchell, S., Rehse, R. A., Schrijver, C. J., Springer, L. A., Stern, R. A., Tarbell, T. D., Wuelser, J., Wolfson, C. J., Yanari, C., Bookbinder, J. A., Cheimets, P. N., Caldwell, D., Deluca, E. E., Gates, R., Golub, L., Park, S., Podgorski, W. A., Bush, R. L., Scherrer, P. H., Gummin, M. A., Smith, P., Auken, G., Jerram, P., Pool, P., Soufli, R., Windt, D. L., Beardsley, S., Clapp, M., Lang, J., and Waltham, N., 2012, The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO), *Solar Physics*, 275, 17
- Levens, P. J., Labrosse, N., Fletcher, L., and Schmieder, B. 2015, A solar tornado observed by EIS. Plasma diagnostics, *Astronomy & Astrophysics*, 582, A27
- Levens, P. J., Labrosse, N., Schmieder, B., López Ariste, A., and Fletcher, L. 2017, Comparing UV/EUV line parameters and magnetic field in a quiescent prominence with tornadoes, *Astronomy & Astrophysics*, 607, A16
- Levens, P. J., Schmieder, B., Labrosse, N., and López Ariste, A. 2016a, Structure of Prominence Legs: Plasma and Magnetic Field, *The Astrophysical Journal*, 818, 31
- Levens, P. J., Schmieder, B., López Ariste, A., Labrosse, N., Dalmasse, K., and Gelly, B., 2016b, Magnetic Field in Atypical Prominence Structures: Bubble, Tornado, and Eruption, *The Astrophysical Journal*, 826, 164
- Li, X., Morgan, H., Leonard, D., and Jeska, L. 2012, A Solar Tornado Observed by AIA/SDO: Rotational Flow and Evolution of Magnetic Helicity in a Prominence and Cavity, *The Astrophysical Journal Letters*, 752, L22
- Lin, Y., Engvold, O., Rouppe van der Voort, L. H. M., and van Noort, M. 2007, Evidence of Traveling Waves in Filament Threads, *Solar Physics*, 246, 65
- Lin, Y., Engvold, O., Rouppe van der Voort, L. H. M., Wiik, J. E., and Berger, T. E. 2005, Thin Threads of Solar Filaments, *Solar Physics*, 226, 239
- Lin, Y., Soler, R., Engvold, O., Ballester, J. L., Langangen, Ø., Oliver, R., and Rouppe van der Voort, L. H. M., 2009, Swaying Threads of a Solar Filament, *The Astrophysical Journal*, 704, 870
- Lin, Y., Martin, S. F., and Engvold, O., 2008, Filament Substructures and their Interrelation, *Subsurface and Atmospheric Influences on Solar Activity*, Proceedings of a workshop held at the NSO/Sac, Sunspot, New Mexico, USA, 16-20 April 2007, (Eds) Howe, R., Komm, R. W., Balasubramaniam, K. S., Petrie, G. J. D., ASP Conference Series, 383, 235-242
- Lundquist, S. 1951, On the Stability of Magneto-Hydrostatic Fields, *PhRv*, 83, 307
- Mackay, D. H., Karpen, J. T., Ballester, J. L., Schmieder, B., and Aulanier, G. 2010, Physics of Solar Prominences: II-Magnetic Structure and Dynamics, *Space Science Reviews*, 151, 333

- Maia, D., Aulanier, G., Wang, S. J., Pick, M., Malherbe, J. –M., and Delaboudinière, J. –P., 2003, Interpretation of a complex CME event: Coupling of scales in multiple flux systems, *Astronomy & Astrophysics*, 405, 313
- Martínez González, M. J., Asensio Ramos, A., Arregui, I., Collados, M., Beck, C., and de La Cruz Rodríguez, J., 2016, On the Magnetism and Dynamics of Prominence Legs Hosting Tornadoes, *The Astrophysical Journal*, 825, 119
- Mghebrishvili, I., Zaqarashvili, T. V., Kukhianidze, V., Ramishvili, G., Shergelashvili, B., Veronig A., and Poedts, S., 2015, Dynamics of a Solar Prominence Tornado Observed by SDO/AIA on 2012 November 7-8, *The Astrophysical Journal*, 810, 89
- Mghebrishvili, I., Zaqarashvili, T. V., Kukhianidze, V., Kuridze, D., Tsiklauri, D., Shergelashvili, B. M., and Poedts, S., 2018, Association between Tornadoes and Instability of Hosting Prominences, *The Astrophysical Journal*, 861, 112
- Mitalas, R., and Sills, K. R., 1992, On the photon diffusion time scale for the sun, *Astrophysical Journal*, 401, 759
- Müller, D., Dimitoglou, G., Caplins, B., Amadigwe, D. E., Garcia Ortiz, J. P., Wamsler, B., Alexanderian, A., Hughitt, V. K., and Ireland, J., 2009, JHelioviewer – Visualizing large sets of solar images using JPEG 2000, *Computing in Science & Engineering*, 11, 38
- Müller, D., Nicula, B., Felix, S., Verstringe, F., Bourgoignie, B., Csillaghy, A., Berghmans, D., Jiggins, P., Carcía-Ortiz, J. P., Ireland, J., Zahniy, S., and Fleck, B. 2017, Jhelioviewer. Time-dependent 3D visualization of solar and heliospheric data, *Astronomy & Astrophysics*, 606, A10
- Okamoto, T. J., Nakai, H., Keiyama, A., Keiyama, A., Narukage, N., Ueno, S., Kitai, R., Kurokawa, H., and Shibata, K., 2004, Filament Oscillations and Moreton Waves Associated with EIT Waves, *The Astrophysical Journal*, 608, 1124
- Oliver, R., and Ballester, J. L. 2002, Oscillations in Quiescent Solar Prominences Observations and Theory (Invited Review), *Solar Physics*, 206, 45
- Orozco Suárez, D., Asensio Ramos, A., and Trujillo Bueno, J. 2012, Evidence for Rotational Motions in the Feet of a Quiescent Solar Prominence, *The Astrophysical Journal Letters*, 761, L25
- Panasenco, O., Martin, S. F., and Velli, M. 2014, Apparent Solar Tornado-Like Prominences, *Solar Physics*, 289, 603
- Panesar, N. K., Innes, D. E., Tiwari, S. K., and Low, B. C. 2013, A solar tornado triggered by Flares?, *Astronomy & Astrophysics*, 549, A105
- Parenti, S. and Vial, J. (2007). Prominence and Quiet-Sun plasma parameters derived from FUV spectral emission. *Astron. Astrophys.* 469, 1109-1115
- Parker, E. N. 1955, *Apj*, 122, 293

- Pesnell, W. D., Thompson, B. J., and Chamberlin, P. C. 2012, The Solar Dynamics Observatory (SDO), *Solar Physics*, 275, 3
- Pettit, E. 1925, The forms and motions of the solar prominences, *Publications of the Yerkes Observatory*, 3, 4
- Pettit, E. 1932, *Contributions from the Mount Wilson Observatory/Carnegie Institution of Washington*, 451, 1
- Pettit, E. 1941, *Publicarions of the ASP*, 53, 289
- Pettit, E. 1946, *Publications of the ASP*, 58, 150
- Pettit, E. 1950, The Evidence for Tornado Prominences, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 62, 144
- Priest, E. R., 1989, *Structure and Dynamics of Quiescent Solar Prominences*. (Kluwer, Dordrecht).
- Priest, E. R., and Forbes, T. G., 2002, The magnetic nature of solar flares, *The Astronomy and Astrophysics Review*, 10, 313
- Priest, E., 2014, *Magnetohydrodynamics of the Sun*, *Cambridge, UK: Cambridge University Press*.
- Pulkkinen, T., 2007, Space Weather: terrestrial Perspective, *Living Reviews in Solar Physics*, Vol. 4, 1
- Ramsey, H. E., and Smith, S. F. 1966, Flare-initiated filament oscillations, *Astronomical Journal*, 71, 197
- Roberts, W. O., 1945, *ApJ*, 101, 136
- Scharmer, G. B., Bjelksjo, K., Korhonen, T. K., Lindberg, B., and Petterson, B., 2003, The 1-meter Swedish solar telescope, *Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics*, *Proc. SPIE* 4853, 341
- Schmieder, B., López Ariste, A., Levens, P., Labrosse, N., and Dalmasse, K. 2015, in *IAU Symp. 305, Polarimetry: The Sun to Stars and to Stellar Systems*, ed. K. N. Nagendra et al. (Cambridge: Cambridge Univ. Press), 275
- Schmieder, B., Mein, P., Mein, N., Levens, P. J., Labrosse, N., and Ofman, L., 2017, H_{α} Doppler shifts in a tornado in the solar corona, *Astronomy & Astrophysics*, 597, 109
- Schou, J., Scherrer, P. H., Bush, R. I., Kosovichev, A. G., Bogart, R. S., Hoeksema, J. T., Liu, Y., Duvall, T. L., Zhao, J., Title, A. M., Schrijver, C. J., Tarbell, T. D., and Tomczyk, S., 2012, Design and Ground Calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO), *Solar Physics*, 275, 229
- Schwenn, R., 2006, Space Weather: The Solar Perspective, *Living Reviews in Solar Physics*, Vol. 3, 2
- Secchi, A., 1870, *Le Soleil*, Gauthier-Villars, Paris.

- Shen, Y., Liu, Y., and Su, J. 2012, Sympathetic Partial and Full Filament Eruptions Observed in One Solar Breakout Event, *The Astrophysical Journal*, 750, 12
- Stein, R. F., and Nordlund, A. 1998, Simulations of Solar Granulation. I. General Properties, *The Astrophysical Journal*, 499, 914
- Steiner, O., Franz, M., Bello González, N., Nutto, Ch., Rezaei, R., Martinez Pillet, V., Bonet Navarro, J. A., del Toro Iniesta, J. C., Domingo, V., Solanki, S. K., Knölker, M., Schmidt, W., Barthol, P., and Gandorfer, A., 2010, Detection of Vortex Tubes in Solar Granulation from Observations with SUNRISE, *The Astrophysical Journal Letters*, 723, L180
- Su, Y., Gömöry, P., Veronig, A., Temmer, M., Wang, T., Vanninathan, K., Gan, W., and Li, Y., 2014, Solar Magnetized Tornadoes: Rotational Motion in a Tornado-like Prominence, *The Astrophysical Journal Letters*, 785, L2
- Su, Y., Wang, T., Veronig, A., Temmer, M., and Gan, W. 2012, Solar Magnetized “Tornadoes:” Relation to Filaments, *The Astrophysical Journal Letters*, 756, L41
- Tandberg-Hanssen, E. (1995). *The Nature of Solar Prominences*. (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Holland).
- Vršnak, B., Veronig, A. M., Thalmann, J. K., and Žic, T. 2007, Large amplitude oscillatory motion along a solar filament, *Astronomy & Astrophysics*, 471, 295
- Wang, Y., Cao, H., Chen, J., Zhang, T., Yu, S., Zheng, H., Shen, C., Zhang, J., and Wang, S., Solar Limb Prominence Cather and Tracker (SLIPCAT): An Automated System and its Preliminary Statistical Results, *The Astrophysical Journal*, 217, 973
- Wedemeyer-Böhm, S., and Rouppe van der Voort, L. 2009, Small-scale swirl events in the quiet Sun chromosphere, *Astronomy & Astrophysics*, 507, 9
- Wedemeyer-Böhm, S., Scullion, E., Rouppe van der Voort, L., Bosnjak, A., and Antolin, P. 2013, Are Giant Tornadoes the Legs of Solar Prominences?, *The Astrophysical Journal*, 774, 123
- Wedemeyer-Böhm, S., Scullion, E., Steiner, O., Rouppe van der Voort, L., de La Cruz Rodriguez, J., Fedun, V., and Erdélyi, R., 2012, Magnetic tornadoes as energy channels into the solar corona, *Nature*, 486, 505
- White, S. M., 2007, *AsJPH*, 16, 189
- Woods, T. N., Eparvier, F. G., Hock, R., Jones, A. R., Woodraska, D., Judge, D., Didkovsky, L., Lean, J., Mariska, J., Warren, H., McMullin, D., Chamberlin, P., Berthiaume, G., Bailey, S., Fuller-Rowell, T., Sojka, J., Tobiska, W. K., and Viereck, R., 2012, Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE) on the Solar Dynamics Observatory (SDO): Overview of Science Objectives, Instrument Design, Data Products, and Model Developments, *Solar Physics*, 275, 115
- Yashiro, S., Gopalswamy, N., Michalek, G., St. Cyr, O. C., Plunkett, S. P., Rich, N. B., and Howard, R. A., 2004, A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 109, A7

- Zaqarashvili, T. V., Díaz, A. D., Oliver, R., and Ballester, J. L. 2010, Instability of twisted tubes with axial mass flows, *Astronomy & Astrophysics*, 516, A84
- Zaqarashvili, T. V., Vörös, Z., Narita, Y., and Bruno, R. 2014, Twisted Magnetic Flux Tubes in the solar Wind, *The Astrophysical Journal Letters*, 783, L19
- Zaqarashvili, T. V., Zhelyazkov, I., and Ofman, L. 2015, Stability of Rotating Magnetized Jets in the Solar Atmosphere. I. Kelvin-Helmholtz Instability, *The Astrophysical Journal*, 813, 123
- Zöllner, F. 1869, *Astronomische Nachrichten*, 74, 269

დანართი

დანართის სახით წარმოდგენილია 2011 წელს დაკვირვებული ტორნადოების კატალოგი. კატალოგში შესულია მხოლოდ ის ტორნადოები რომელთა სიცოცხლის საბოლოო ეტაპს დავაკვირდით. კატალოგი მოიცავს საწყის დროს, საბოლოო დროს, საწყისი X და Y კოორდინატს, ტორნადოს ტიპს, T - სიცოცხლის ხანგრძლივობას და CME-ს გამოჩენის დროს აღებული LASCO CME catalog-დან.

საწყისი დრო	საბოლოო დრო	X	Y	ტიპი	T	CME-ს გამოჩენის დრო
31.12.2010 05:00	02.01.2011 15:00	524	-829	CME	58	2011 Jan 2 15:24:05
27.12.2010 13:00	01.01.2011 14:30	-425	775	Active	126	-----
30.12.2010 08:00	01.01.2011 14:00	-332	870	Active	54	-----
01.01.2011 13:00	02.01.2011 05:00	528	-674	CME	16	2011 Jan 2 15:24:05
29.12.2010 18:00	02.01.2011 23:00	548	806	Active	101	-----
17.01.2011 14:00	18.01.2011 03:00	362	861	Extinct	13	-----
17.01.2011 13:00	22.01.2011 21:00	300	560	CME	128	2011 Jan 23 0:48:05
19.01.2011 04:00	20.01.2011 15:00	-897	354	Extinct	35	-----
17.01.2011 20:00	20.01.2011 16:00	465	836	CME	68	2011 Jan 20 18:48:06
20.01.2011 20:00	22.01.2011 12:00	632	729	CME	40	2011 Jan 22 13:36:06
30.01.2011 05:00	03.02.2011 17:00	-865	422	Active	108	-----
05.02.2011 16:00	08.02.2011 19:00	-791	532	CME	75	2011 Feb 9 0:12:06
07.02.2011 13:00	08.02.2011 19:00	-503	822	CME	30	2011 Feb 9 0:12:06
06.02.2011 21:00	07.02.2011 04:00	-664	705	Active	7	-----
25.01.2011 07:00	28.01.2011 03:00	-870	-416	CME	68	2011 Jan 28 5:00:07
05.02.2011 10:00	10.02.2011 21:00	-762	-584	CME	131	2011 Feb 11 1:36:05
09.02.2011 21:00	10.02.2011 11:00	-775	-568	Active	14	-----
11.02.2011 07:00	11.02.2011 22:00	-765	-583	Active	15	-----
29.01.2011 13:00	31.01.2011 03:00	548	-786	Active	38	-----
24.01.2011 13:00	25.01.2011 03:00	723	-515	Active	14	-----
21.02.2011 09:00	25.02.2011 06:00	-767	569	CME	93	2011 Feb 25 6:12:06
24.02.2011 05:00	25.02.2011 06:00	-505	793	CME	25	2011 Feb 25 6:12:06
27.02.2011 05:00	28.02.2011 08:00	-548	804	Extinct	27	-----
17.02.2011 17:00	25.02.2011 19:00	-438	858	CME	194	2011 Feb 25 20:24:06
11.02.2011 01:00	17.02.2011 11:00	-530	-800	Active	154	-----
20.02.2011 07:00	01.03.2011 23:00	-925	-206	CME	232	2011 Mar 2 2:24:07
20.02.2011 07:00	01.03.2011 23:00	-874	-382	CME	232	2011 Mar 2 2:24:07
04.03.2011 07:00	05.03.2011 19:00	-885	370	CME	36	2011 Mar 5 20:54:05
08.03.2011 21:00	20.03.2011 03:00	-882	328	Active	270	-----
11.03.2011 19:00	13.03.2011 19:00	-693	649	Active	48	-----
10.03.2011 13:00	12.03.2011 17:00	-947	-61	CME	52	2011 Mar 12 17:12:05
12.03.2011 08:00	14.03.2011 02:00	-697	663	Extinct	42	-----
15.03.2011 17:00	18.03.2011 03:00	-95	902	Active	58	-----
01.03.2011 22:00	03.03.2011 02:00	724	589	Active	28	-----
05.03.2011 11:00	06.03.2011 13:00	-669	-681	CME	26	2011 Mar 6 5:12:06

09.03.2011 07:00	10.03.2011 03:00	-840	-441	Active	20	-----
14.03.2011 03:00	19.03.2011 21:00	-544	-781	CME	138	2011 Mar 19 21:24:11
01.03.2011 21:00	05.03.2011 05:00	788	-513	Active	80	-----
15.03.2011 01:00	17.03.2011 23:00	-858	412	Extinct	70	-----
19.03.2011 19:00	21.03.2011 23:00	-631	697	Active	52	-----
19.03.2011 17:00	27.03.2011 21:00	-433	840	Active	196	-----
25.03.2011 11:00	29.03.2011 19:00	-559	760	CME	104	2011 Mar 29 20:36:07
22.03.2011 13:00	24.03.2011 15:00	-481	812	Active	50	-----
23.03.2011 03:00	24.03.2011 03:00	-670	-676	CME	24	2011 Mar 24 4:36:07
27.03.2011 15:00	09.04.2011 11:00	-665	-674	Active	308	-----
11.03.2011 17:00	19.03.2011 11:00	57	-343	CME	186	2011 Mar 19 12:12:06
30.03.2011 17:00	06.04.2011 14:00	-390	882	Extinct	141	-----
04.04.2011 12:00	05.04.2011 21:00	-949	160	Extinct	33	-----
08.04.2011 05:00	09.04.2011 00:00	-960	-48	Extinct	19	-----
05.04.2011 07:00	06.04.2011 23:00	-637	723	Active	40	-----
02.04.2011 02:00	02.04.2011 15:00	614	742	Active	13	-----
04.04.2011 05:00	12.04.2011 11:00	-72	790	Active	198	-----
10.04.2011 21:00	15.04.2011 03:00	368	844	CME	102	2011 Apr 15 13:36:05
30.03.2011 19:00	11.04.2011 23:00	-929	234	Active	292	-----
04.04.2011 03:00	17.04.2011 15:00	-734	-590	CME	324	2011 Apr 17 19:36:05
10.04.2011 03:00	14.04.2011 23:00	-752	-583	Active	116	-----
11.04.2011 13:00	13.04.2011 07:00	696	-669	CME	42	2011 Apr 13 16:48:05
17.04.2011 15:00	20.04.2011 21:00	-941	-70	Active	78	-----
19.04.2011 05:00	19.04.2011 22:00	-808	471	Active	17	-----
17.04.2011 05:00	20.04.2011 15:00	-701	659	CME	82	2011 Apr 20 5:12:07
15.04.2011 10:00	17.04.2011 07:00	-501	821	CME	45	2011 Apr 17 11:48:06
19.04.2011 11:00	21.04.2011 07:00	-429	841	Active	44	-----
27.04.2011 07:00	29.04.2011 07:00	667	636	Active	48	-----
24.04.2011 23:00	26.04.2011 23:00	-659	-670	CME	48	2011 Apr 27 7:48:06
27.04.2011 15:00	29.04.2011 19:00	-679	-637	Active	52	-----
21.04.2011 11:00	25.04.2011 09:00	-459	-818	Active	94	-----
29.04.2011 23:00	02.05.2011 07:00	662	-687	CME	56	2011 May 2 7:36:07
11.05.2011 19:00	12.05.2011 19:00	-906	256	Active	24	-----
13.05.2011 03:00	14.05.2011 11:00	-765	535	Extinct	32	-----
03.05.2011 19:00	05.05.2011 11:00	-643	693	Active	40	-----
09.05.2011 01:00	09.05.2011 23:00	-645	669	Active	22	-----
27.04.2011 15:00	02.05.2011 17:00	202	779	Active	122	-----
03.05.2011 17:00	04.05.2011 15:00	-895	-315	Active	22	-----
08.05.2011 05:00	13.05.2011 17:00	-19	-467	Active	132	-----
19.05.2011 21:00	25.05.2011 11:00	-781	511	Active	134	-----
27.05.2011 01:00	10.06.2011 07:00	-718	599	CME	342	2011 Jun 10 13:25:46
15.05.2011 19:00	18.05.2011 19:00	-456	824	CME	72	2011 May 18 21:24:09
19.05.2011 07:00	19.05.2011 23:00	-595	723	CME	16	2011 May 20 3:12:09
30.05.2011 07:00	31.05.2011 11:00	-564	753	CME	28	2011 May 31 14:12:06
18.05.2011 17:00	21.05.2011 15:00	742	552	Active	70	-----

16.05.2011 05:00	18.05.2011 04:00	786	434	CME	47	2011 May 18 6:24:06
23.05.2011 17:00	25.05.2011 21:00	-932	-68	Active	52	-----
25.05.2011 01:00	27.05.2011 23:00	-898	-266	Active	70	-----
30.05.2011 17:00	12.06.2011 15:00	-931	79	CME	310	2011 Jun 12 14:48:06
29.05.2011 11:00	01.06.2011 07:00	-755	-547	Active	68	-----
25.05.2011 11:00	26.05.2011 07:00	-487	-803	CME	20	2011 May 26 4:36:05
15.05.2011 19:00	17.05.2011 21:00	843	-267	Active	50	-----
09.06.2011 06:00	14.06.2011 05:00	-960	78	CME	119	2011 Jun 14 6:12:05
31.05.2011 03:00	05.06.2011 05:00	-802	476	CME	122	2011 Jun 5 3:44:23
13.06.2011 07:00	21.06.2011 03:00	-794	494	CME	188	2011 Jun 21 3:16:10
14.06.2011 11:00	23.06.2011 23:00	-629	694	Extinct	228	-----
12.06.2011 03:00	12.06.2011 17:00	566	753	Active	15	-----
14.06.2011 09:00	14.06.2011 19:00	809	489	CME	10	2011 Jun 14 18:36:05
05.06.2011 09:00	06.06.2011 07:00	-876	-316	Active	22	-----
03.06.2011 21:00	05.06.2011 11:00	-800	-484	CME	38	2011 Jun 5 16:59:57
02.06.2011 03:00	05.06.2011 11:00	-668	-653	CME	80	2011 Jun 5 16:59:57
10.06.2011 15:00	12.06.2011 07:00	815	-263	Active	40	-----
13.06.2011 15:00	15.06.2011 11:00	698	-335	CME	44	2011 Jun 15 13:36:21
21.05.2011 05:00	06.06.2011 03:00	-759	-544	CME	382	2011 Jun 6 7:30:04
21.05.2011 19:00	06.06.2011 09:00	-637	-685	CME	374	2011 Jun 6 7:30:04
12.06.2011 11:00	15.06.2011 17:00	500	-675	CME	78	2011 Jun 15 13:36:21
19.06.2011 05:00	23.06.2011 12:00	-900	264	Active	103	-----
19.06.2011 12:00	23.06.2011 12:00	-814	516	Active	96	-----
25.06.2011 03:00	28.06.2011 21:00	-646	674	Active	90	-----
15.06.2011 22:00	17.06.2011 11:00	646	658	CME	37	2011 Jun 17 11:00:05
16.06.2011 19:00	17.06.2011 17:00	-771	-530	Active	22	-----
19.06.2011 19:00	21.06.2011 09:00	-653	-665	CME	38	2011 Jun 21 8:48:05
05.07.2011 05:00	05.07.2011 23:00	-900	290	Extinct	18	-----
08.07.2011 09:00	10.07.2011 07:00	-675	665	CME	46	2011 Jul 10 12:00:05
13.07.2011 17:00	17.07.2011 05:00	-667	670	CME	84	2011 Jul 17 6:12:05
11.07.2011 05:00	13.07.2011 21:00	-581	-735	Active	64	-----
07.07.2011 05:00	09.07.2011 11:00	505	-742	Active	54	-----
17.07.2011 17:00	19.07.2011 22:00	-436	843	Extinct	47	-----
31.07.2011 22:00	01.08.2011 17:00	-923	220	Active	19	-----
07.08.2011 05:00	11.08.2011 15:00	-660	681	Active	106	-----
12.08.2011 19:00	17.08.2011 03:00	-415	852	CME	104	2011 Aug 17 4:00:06
14.08.2011 19:00	16.08.2011 07:00	-715	624	CME	36	2011 Aug 16 10:12:06
10.08.2011 17:00	14.08.2011 14:00	140	-787	Active	93	-----
22.08.2011 11:00	31.08.2011 09:00	-681	664	Active	214	-----
17.08.2011 18:00	19.08.2011 03:00	-587	752	Extinct	9	-----
18.08.2011 11:00	20.08.2011 23:00	-343	885	CME	60	2011 Aug 21 1:36:20
25.08.2011 07:00	30.08.2011 11:00	471	456	Active	124	-----
30.08.2011 15:00	02.09.2011 07:00	-782	-542	CME	64	2011 Sep 2 0:36:06
12.09.2011 23:00	14.09.2011 11:00	-954	-30	Active	36	-----
31.08.2011 13:00	10.09.2011 03:00	-840	420	CME	206	2011 Sep 10 3:12:09

02.09.2011 23:00	04.09.2011 03:00	-840	466	Active	28	-----
13.09.2011 13:00	14.09.2011 13:00	-676	679	CME	24	2011 Sep 14 12:24:06
10.09.2011 03:00	13.09.2011 13:00	-480	828	CME	82	2011 Sep 13 16:12:05
14.09.2011 03:00	15.09.2011 15:00	-546	-788	Active	36	-----
02.09.2011 05:00	06.09.2011 07:00	500	-748	CME	98	2011 Sep 6 5:36:06
10.09.2011 11:00	12.09.2011 13:00	606	-737	Active	50	-----
17.09.2011 01:00	19.09.2011 06:00	-950	110	Active	53	-----
03.10.2011 17:00	13.10.2011 01:00	157	667	CME	224	2011 Oct 13 02:03:24
03.10.2011 05:00	04.10.2011 13:00	-810	-519	Active	32	-----
08.10.2011 00:00	08.10.2011 18:00	-802	-522	Active	18	-----
04.10.2011 05:00	05.10.2011 11:00	-645	-708	CME	30	2011 Oct 5 9:12:09
05.10.2011 05:00	06.10.2011 03:00	633	-695	CME	22	2011 Oct 6 5:24:06
18.10.2011 03:00	22.10.2011 17:00	4	812	CME	110	2011 Oct 22 17:48:05
24.10.2011 07:00	25.10.2011 05:00	-958	-122	CME	22	2011 Oct 25 6:24:05
21.10.2011 11:00	24.10.2011 21:00	-881	-403	CME	82	2011 Oct 24 20:36:07
03.11.2011 17:00	05.11.2011 03:00	-968	45	Active	34	-----
15.11.2011 15:00	26.11.2011 09:00	-970	14	Active	258	-----
08.11.2011 09:00	22.11.2011 19:00	-885	401	CME	346	2011 Nov 22 20:57:31
11.11.2011 13:00	14.11.2011 11:00	-651	717	CME	70	2011 Nov 14 15:48:06
29.10.2011 05:00	04.11.2011 21:00	-13	718	CME	160	2011 Nov 5 0:36:05
04.11.2011 07:00	05.11.2011 03:00	769	-567	CME	20	2011 Nov 5 4:00:05
26.11.2011 01:00	28.11.2011 07:00	-822	525	CME	54	2011 Nov 28 6:36:05
28.11.2011 13:00	29.11.2011 21:00	752	616	Active	32	-----
24.11.2011 09:00	27.11.2011 17:00	498	251	CME	80	2011 Nov 27 20:00:07
17.11.2011 19:00	20.11.2011 15:00	733	216	CME	68	2011 Nov 20 14:12:05
05.12.2011 07:00	05.12.2011 19:00	-948	222	Active	12	-----
05.12.2011 23:00	11.12.2011 07:00	-894	384	CME	128	2011 Dec 11 10:12:06
29.11.2011 23:00	04.12.2011 03:00	-796	543	CME	100	2011 Dec 4 6:00:05
14.12.2011 05:00	18.12.2011 07:00	-730	644	CME	98	2011 Dec 18 17:48:05
04.12.2011 03:00	09.12.2011 23:00	-578	777	CME	140	2011 Dec 10 7:24:06
15.12.2011 01:00	18.12.2011 11:00	-438	870	Extinct	82	-----
29.11.2011 09:00	02.12.2011 11:00	355	883	CME	74	2011 Dec 2 17:24:05
02.12.2011 05:00	03.12.2011 15:00	-819	-526	CME	34	2011 Dec 3 16:36:06
15.12.2011 01:00	16.12.2011 09:00	-812	-544	Active	32	-----
10.12.2011 13:00	24.12.2011 11:00	-506	-831	Active	334	-----
22.12.2011 11:00	23.12.2011 23:00	-821	519	CME	36	2011 Dec 23 20:48:07
26.12.2011 11:00	28.12.2011 13:00	378	611	CME	50	2011 Dec 28 16:12:06
31.12.2011 11:00	15.01.2012 03:00	-914	-344	Active	352	-----
17.12.2011 01:00	18.12.2011 07:00	-837	-499	CME	30	2011 Dec 19 1:25:52
31.12.2011 15:00	01.01.2012 19:00	-650	-730	Active	28	-----
15.12.2011 15:00	16.12.2011 17:00	839	-477	CME	26	2011 Dec 16 20:48:05