

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი
ფიზიკის დეპარტამენტი, ასტროფიზიკის კათედრა

დავით ხუციშვილი

„მზის სპიკულებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების
მრავალმასშტაბიანი დინამიკის შესწავლა“

სადისერტაციო ნაშრომი შესრულებულია ფიზიკის დოქტორის

აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სამეცნიერო ხელმძღვანელები:

ნანა შათაშვილი

ოსუ ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა
ფაკულტეტის ფიზიკის დეპარტამენტის პროფესორი,
ფიზ-მათ. მეცნ. დოქტორი

ვაჟა ყულიჯანიშვილი

ილიას სახელმწიფო უნივერსიტეტის -
ე. ხარაძის აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის მკვლევარი,
ფიზ-მათ. მეცნ. დოქტორი

თბილისი 2018

Ivane Javakhishvili Tbilisi State University

Faculty of Exact and Natural Sciences
Department of Physics, Chair of Astrophysics

David Khutsishvili

"Study of the Multi-Scale Dynamics of Physical Processes in Solar Spicules"

The thesis work is performed to obtain a PhD academic degree in Physics

Scientific Supervisors:

Nana Shatashvili,

Doctor of Phys-Math Sciences,
Professor, Department of Physics,
Faculty of Exact and Natural Sciences

Vazha Kulijanishvili

Doctor of Phys-Math Sciences,
Ilia State University-
E. Kharadze Abastumani Astrophysical Observatory

Tbilisi 2018

ა ბ ს ტ რ ა ქ ტ ი

მზეზე მიმდინარე ფიზიკური პროცესებისა და მათ შორის ურთიერთკავშირის შესწავლას დღეისათვის მეტად მნიშვნელოვანი როლი ენიჭება. მნიშვნელოვანია მზის ნატიფი სტრუქტურის დინამიკის იმ ფიზიკურ პროცესებთან კავშირის გამოვლენა, რომელიც მიმდინარეობს მზის ატმოსფეროს ქვედა და ზედა ფენებში. ქრომოსფერო საკმაოდ არაერთგვაროვანი, ნაწილობრივ იონიზირებული ფენაა, რომლის სტრუქტურული დეტალები კარგად დაიკვირვება როგორც წყალბადის, ჰელიუმის და იონიზირებული კალციუმის, ასევე მთელ რიგ მეტალურ სპექტრულ ხაზებში. ქრომოსფეროს ნატიფი სტრუქტურის ერთ-ერთ ძირითად ელემენტს წარმოადგენს სპიკულები. სწორედ სპიკულებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების მრავალმასშტაბიანი დინამიკის შესწავლა გახლავთ მოცემული ნაშრომის ძირითადი ამოცანა.

ქრომოსფეროს ძირითადი მასა სპიკულებშია თავმოყრილი, რომლებიც დომინირებენ ქრომოსფეროსა და კორონას შორის. სპიკულები იწოდებიან I და II ტიპის სპიკულებად შესაბამისად კლასიკური და თანამედროვე დაკვირვების ტექნიკისა. მიუხედავად მრავალი კვლევებისა, სპიკულებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების დამაჯერებელი ახსნა ჯერ კიდევ არ არსებობს. მზის ატმოსფეროში მიმდინარე პროცესების ახსნის ერთ-ერთ ძირითად პრობლემას წარმოადგენს კორონის გაცხელების მექანიზმის შესწავლა; ბოლო კვლევებით მიიჩნევა რომ გაცხელების ერთ-ერთ მნიშვნელოვან წყაროს წარმოადგენს ქრომოსფერული სპიკულები, კერძოდ მასში გავრცელებული მაგნიტოჰიდროდინამიკური ტალღები (MHD) და მათ მიერ ენერჯის ტრანსფორმაცია, ქვედა ფენებიდან ზედა ფენებისაკენ.

ამ მიმართულებით ბოლო ათეული წლის განმავლობაში ჩამოყალიბდა რთული თეორიული მოდელები, რომლებიც ელოდებიან ახალ დაკვირვებით მონაცემებს, რათა მზეზე მიმდინარე ფიზიკური პროცესები უფრო თვალნათლივ აღიწეროს. ამ პრობლემის გადასაჭრელად აუცილებელია დაკვირვების და კვლევის განახლებული/თანამედროვე მეთოდოლოგია.

წარმოდგენილ ნაშრომში კვლევები განხორციელებულია დაკვირვების განახლებული / თანამედროვე მეთოდოლოგიით: მიღებულია დაკვირვებითი მასალა აბსოლუტური ასტროფიზიკური ობსერვატორიის დიდ დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფებით მზის ატმოსფეროს, როგორც ერთი და იგივე, ასევე სხვადასხვა სიმაღლეზე მუხტკავშირიანი A Apogee CCD U9000 (პიკსელების რაოდენობა 3056 x 3056; პიკსელების ზომა 12 x 12 მიკრონი; გამოსახულების ზომა 36.7 x 36.7mm; გამოსახულების დიაგონალი 51.9 მმ;) სინათლის მიმღების გამოყენებით დროის ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში; დამზერითი მასალის გასაზომად, გამოყენებულ იქნა ობსერვატორიაში დაწერილი სახეცვლილება ერთ-ერთი

AlmaP359 კომპიუტერული პროგრამების მოდულისა, რაც გრაფიკული წესით, როგორც დოპლერის და ტანგენციალური სიჩქარეების, ასევე ნახევარსიგანეების განსაზღვრის საშუალებას იძლევა. გაზომვის შედეგად მიღებული ანათვლები იწერება შესაბამის ASCII ფაილში, რაც საშუალებას გვაძლევს ცნობილი მეთოდებით გამოვითვალოთ დოპლერის და ტანგენციალური სიჩქარეები, ნახევარსიგანეები, რხევები და სხვა; დამზერითი მასალის დასამუშავებლად/ანალიზისათვის ფურიეს მეთოდის მაგივრად გამოვიყენეთ ე. წ. "ლომბის პერიოდოგრამების მეთოდი" (Press et al. 1992). ეს მეთოდი განსაკუთრებით კარგია არათანაბარი ინტერვალების მქონე პერიოდულობის შესწავლისას, რაც ჩვენ შემთხვევას/დაკვირვებებს კარგად მიესადაგება.

აბასთუმნის ასტროფიზიკურ ობსერვატორიაში 53 სმ დიდ დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის დახმარებით 1980-1982 წლებში პირველად (ამ ტიპის დაკვირვებები დღესაც არ არის მიღებული) მიღებული იქნა წყალბადის H α და ჰელიუმის D₃-სპიკულების სპექტროგრამები ქრომოსფეროს სხვადასხვა სიმაღლეზე დროის ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში. ასეთი უნიკალური და მდიდარი დაკვირვებითი მასალა ჩვენს მიერ დამუშავებული იქნა თანამედროვე მეთოდებით, რამაც მოგვცა დაზუსტებული დაკვირვებითი შედეგები: H α და D₃-სპიკულების მოძრაობების ტრაექტორიები შეკუმშულია იმ ღერძის მიმართ, სადაც გადაზომილია დოპლერის სიჩქარეები; უმრავლეს შემთხვევაში ერთ ჯგუფში გაერთიანებული სპიკულების დოპლერის სიჩქარეები დაახლოებით ერთნაირად იცვლება, ხოლო ტანგენციალური სიჩქარეები არა. დოპლერის და ტანგენციალურ სიჩქარეებს შორის არ არის რაიმე დამახასიათებელი კავშირი. ტანგენციალური სიჩქარეების დროში ცვლილების შუალედი მცირეა, ვიდრე დოპლერის სიჩქარეებისა; H α და D₃-სპიკულების საშუალო ინტენსივობა და ნახევარსიგანეები იცვლება/მცირდება უმნიშვნელოდ მზის კიდიდან სიმაღლის ზრდის მიხედვით;

აბასთუმნის ასტროფიზიკურ ობსერვატორიის დიდ დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის დახმარებით ახალი (2014 წ., 24,25-09-2012 წ., და 17,18,19.10.2012 წ.) დაკვირვებითი მასალის თანამედროვე მეთოდებით დამუშავების შემდეგ მიღებულ იქნა დაზუსტებული და ახალი დაკვირვებითი შედეგები: ნაპოვნი იქნა დოპლერის სიჩქარეების რხევითი პერიოდების ოთხი ჯგუფი: 167 – 358 წმ (საშუალოდ 263), 114 – 156 წმ (საშუალოდ 135), 81 – 108 წმ (საშუალოდ 95) და 50 – 76 წმ (საშუალოდ 63); H α სპიკულების დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების რხევები ძირითადად ანტიკორელაციაშია ან ფაზაში წანაცვლებულები არიან და იშვიათ შემთხვევაში არიან კორელაციაში; რხევის პერიოდები ძირითადად მეტია 3 წუთზე (> 180 წმ); პერიოდები განაწილებულია 4 – 9 წუთიან (240-540 წმ) შუალედში; H α სპიკულების დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეები განიცდიან კვაზიპერიოდულ ცვლილებებს, პერიოდებით 120 – 700 წმ შუალედში და ამპლიტუდებით 10 – 20 კმ/წმ და 0.30 – 0.75 Å , შესაბამისად.

დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანების დროის მიხედვით ცვლილების ასიმეტრია (ანტიკორელაცია) ჩვენს მიერ პირველად არის დაფიქსირებული.

ასეთი უნიკალური დამზერითი მასალიდან ჩვენს მიერ მიღებულმა დაკვირვებითმა შედეგებმა საშუალება მოგვცა დაგვეზუსტებინა სპიკულებზე კვლევების შედეგად მიღებული ფიზიკური პარამეტრები, მათი მრავალმასშტაბიანი დინამიკა და მიგველო ახალი ფიზიკური მახასიათებლები, რამაც შეიძლება შეიტანოს გარკვეული წვლილი მზის ატმოსფეროს ქვედა და ზედა ფენებში მიმდინარე პროცესების კვლევაში, მზის კორონის გაცხელების მექანიზმის დაზუსტებაში.

ABSTRACT

The study of various physical processes and their cross-interaction taking place in the solar atmosphere are paid an important role in the present solar physics. It is very important to reveal the connection of the solar fine structure dynamics with the physical processes developing in the lower and upper layers of the solar atmosphere. The solar chromosphere is rather inhomogeneous, partially ionized layer, the structural details of which are well observed in hydrogen, helium, ionized calcium and other metallic spectral lines. The spicules are the main elements of the chromospheric fine structure. The study of multi-scale dynamics of physical processes inside the spicules is the main goal of the current thesis.

The main volume of the chromospheric plasma is concentrated in the spicules, which are dominating features between chromosphere and corona. The spicules are classified into types I and II according to the classical and modern observational techniques. Despite of numerous studies dedicated to the spicules, the convincing explanation of physical processes inside these structures, still doesn't exist. One of the main problems to explain the physical processes in the solar atmosphere is the study of corona heating mechanism. According to recent studies, the main sources of such heating are the chromospheric spicules and particularly magnetohydrodynamic (MHD) waves propagating inside the spicules transferring energy from lower to upper layers.

In this respect, during the last decade there were proposed many complex theoretical models, which are waiting for a new observational data to clearly describe the physical processes developing in the Sun. To solve this problem, it is necessary to have modern innovative methods of observation and research.

The studies presented in this contribution were carried out using modern innovative observational methods: the long period time series observational data of the solar atmosphere on the same as well as different chromospheric layers were obtained using the large non-eclipsing coronagraph of the Abastumani Astrophysical Observatory equipped with Apogee CCD U9000 (pixel array: 3056x3056; pixel size: 12x12 mkm; image size: 36.7x36.7 mm; image diagonal: 51.9 mm). The observational data were processed with software program AImaP359 developed in the Abastumani Astrophysical Observatory and specially adopted for the needs of our investigations. The software allows to measure both Doppler and tangential velocities as well as FWHM of a spectral line.

The results of measurements are exported in ASCII format for further processing using other statistical software packages to study the variations of Doppler and tangential velocities, FWHMs and their periodicities. To analyze such variations and find possible periodicities we used the Lomb periodograms (Press et al. 1992). This method is specially developed for the unevenly distributed time series and perfectly fits our observational data.

During the years 1980-1982 in the Abastumani Astrophysical Observatory there were first time ever obtained the long-term spectrogram series of hydrogen H α and helium D $_3$ spicules for different heights in the chromosphere using 53 cm large non-eclipsing coronagraph. Such an unique and rich observational material were processed using modern methods, which allows us to obtain revised observational results: the motion trajectories of H α and D $_3$ spicules are squeezed along the axes with Doppler velocities. In the most cases the Doppler velocities of the spicules unified in a same group vary equally, but their tangential velocity variations are different. There is no common connection between the Doppler and tangential velocities. The period of temporal changes of tangential velocities is smaller than for the Doppler velocities. The mean intensities and FWHM of the H α and D $_3$ spicules slightly decrease by the distance from the solar limb.

We also processed a new observational data obtained during 24-25/09/2012, 17-19/10/2012 and 2014 in the Abastumani Astrophysical Observatory using the large non-eclipsing coronagraph and got the following results: we found 4 groups of Doppler velocity variations - 167 – 358 s (average 263 s), 114 – 156 s (average 135 s), 81 – 108 s (average 95 s) and 50 – 76 s (average 63 s); the Doppler velocity and FWHM variations of H α spicules are mainly in anti-correlation or are shifted in phase and are rarely in correlation; the variation periods are mainly over 3 min (> 180 s); the most periods are between 4-9 min (240-540 s); the Doppler velocity and FWHM variations of H α spicules have quasiperiodic nature with periods between 120-700 s interval, amplitudes between 10-20 km/s and FWHM between 0.30 – 0.75 Å.

The asymmetry (anti-correlation) of variations in the Doppler velocity and FWHM of H α spicules is found by us first time ever.

The observational results obtained with such unique observational materials allow us to revise physical parameters of the spicules, their multi-scale dynamics and to get new physical characteristics which could certainly contribute into the investigations of the physical processes developing in the lower and upper solar atmosphere layers and to define the mechanism of the solar corona heating.

სარჩევი

თავი I. შესავალი და ლიტერატურის მიმოხილვა (მზის ქრომოსფეროს სპიკულების ფიზიკური პარამეტრები)	2
§ 1.1 ქრომოსფერული სპიკულების სიცოცხლის ხანგრძლივობა, ზომები, რაოდენობა, ტემპერატურა, სიმკვრივე	2
§1.2 ქრომოსფერული სპიკულების დოპლერის/ტანგენციალური სიჩქარეები, რხევები, ტალღები, ბრუნვა, ინტესივობა, ექვივალენტური და ნახევარ სიგანეები	7
§1.3. ქრომოსფერული სპიკულების კლასიფიკაცია	13
§ 1.4. ქრომოსფერული სპიკულების მოდელები	20
§ 1.5. სპიკულები - მზის კორონის გაცხელების მექანიზმი.....	33
თავი 2. დაკვირვებითი მასალის მიღება-დამუშავების თანამედროვე მეთოდთა.....	38
§ 2.1 აბსოლუტური ასტროფიზიკური ობსერვატორიის დიდი 53 სმ-იანი დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის აღწერა.....	38
§2.2 დამზერითი მასალის მიღების თანამედროვე მეთოდის აღწერა დიდი დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის დახმარებით	44
§2.3 დიდი დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის დახმარებით მიღებული დამზერითი მასალის დამუშავების თანამედროვე მეთოდის აღწერა	51
თავი 3. მზის სპიკულების დინამიკა.....	54
§ 3.1. ქრომოსფეროს სპიკულების მოძრაობის ტრაექტორიები, ინტესივობები, ნახევარსიგანეები	54
§ 3.2. ქრომოსფერული სპიკულების დოპლერის სიჩქარეების კვაზიპერიოდული ცვალებადობა, რხევები	63
§ 3.3. ქრომოსფერული სპიკულების დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების დროში ცვლილება, ასიმეტრია	71
თავი 4. მზის სპიკულებზე დაკვირვებების შედეგად მიღებული ფიზიკური პარამეტრების ანალიზი და შედეგები	96
§ 4. 1. მზის სპიკულების დაკვირვებითი შედეგები/დისკუსია	96
თავი 5. ძირითადი შედეგები	102
ლიტერატურა.....	106

თავი I. შესავალი და ლიტერატურის მიმოხილვა (მზის ქრომოსფეროს სპიკულების ფიზიკური პარამეტრები)

§ 1.1 ქრომოსფერული სპიკულების სიცოცხლის ხანგრძლივობა, ზომები, რაოდენობა, ტემპერატურა, სიმკვრივე

მზე უახლოესი ვარსკვლავია, მისი გამოსხივება წარმოადგენს დედამიწის ენერჯისა და სიცოცხლის წყაროს. მზის, როგორც ვარსკვლავის, გამოსხივების სიმძლავრე საკმარისად მდგრადია, იგი დაახლოებით 4×10^{33} ერგის რიგისაა. მის ატმოსფეროში დაიკვირვება სწრაფად მიმდინარე პროცესები, რომლებიც მზის აქტივობად იწოდებიან. მზის ცვალებადობა გამოიხატება მასში მიმდინარე მოვლენების ცვალებადობაში. მზეზე მიმდინარე ფიზიკური პროცესებისა და მათ შორის ურთიერთკავშირის შესწავლას დღეისათვის მეტად მნიშვნელოვანი როლი ენიჭება, თუმცა ბოლომდე არ არის შესწავლილი მზის ატმოსფეროში მიმდინარე არასტაციონარული პროცესები, რომელთა ბუნების კვლევის არსებული მეთოდები არ იძლევა მზის ატმოსფეროში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების რეალობასთან ახლოს მყოფ ახსნას/დასაბუთებას, რასაც მივყევართ მნიშვნელოვან განსხვავებამდე რეალურ და კვლევების შედეგად მიღებულ დაკვირვებით მონაცემებს შორის. გარდა თეორიული კვლევებისა, მზის აქტივობის ევოლუციის შესწავლა იძენს სუფთა პრაქტიკულ ხასიათს, რადგან იგი წარმოადგენს მზის აქტივობის პროგნოზირების საფუძველს, რომელიც აუცილებელია ადამიანის საქმიანობისათვის მრავალ სფეროში.

მზის წარმონაქმნებში მიმდინარე პროცესების შესწავლაში აქტუალურ ამოცანას წარმოადგენს მათი ტემპერატურის, წნევის, სიმკვრივის, მაგნიტური ველის დამაბულობის, დოპლერის/ტანგენციალური სიჩქარეების, სპექტრული ხაზების ნახევარ სიგანეების, ინტენსივობის, ცალკეული წარმონაქმნების განედური განაწილების ცვლილების, მათი კავშირის დადგენა მზის გლობალურ მახასიათებლებთან და სხვა მრავალი მოვლენები.

ქრომოსფერო საკმაოდ არაერთგვაროვანი, ნაწილობრივ იონიზირებული ფენაა, რომლის სტრუქტურული დეტალები კარგად დაიკვირვება როგორც წყალბადის, ჰელიუმის, იონიზირებულ კალციუმის, ასევე მთელ რიგ მეტალურ სპექტრულ ხაზებში. ქრომოსფეროს ნატიფი სტრუქტურის ერთ-ერთ ძირითად ელემენტს წარმოადგენენ სპიკულები. ქრომოსფეროს ძირითადი მასა სწორედ სპიკულებშია თავმოყრილი.

დასაწყისში სპიკულებს თეთრ სინათლეში აკვირდებოდნენ მზის სრული დაბნელების დროს. სპიკულების პირველი ფოტოგრაფირება 1930 წელს მოახდინა

მარიოტიმ, ხოლო 1942 წელს მონოქრომატული ფილტრში პირველად ლიო დააკვირდა. ტერმინი “სპიკული” 1945 წელს შემოიტანა რობერტსმა (Roberts, 1945) მანვე განსაზღვრა სპიკულების სიგრძე, რომელიც დაახლოებით 4500-8000 კმ-ია.

სპიკულები ფოტოსფეროს კორონასთან აკავშირებენ, რომლებსაც გადააქვთ ენერგია და ნივთიერება. სპიკულები მზის კიდეზე ყველგან შეიმჩნევა. ისინი ძალიან დინამიურებია, ვიწრო ქრომოსფერული წარმონაქმნებია. სპიკულებს აკვირდებიან დიდი ხნის განმავლობაში და არსებობს დაკვირვებითი შედეგების მრავალი მიმოხილვითი ხასიათის სტატიები (მაგ., Beckers 1968, 1972; Suematsu et al. 1982, 1995; Sterling 2000), სპიკულების წარმოშობა, კავშირი ფოტოსფეროსთან და კორონასთან დიდი ხანია განიხილება. სპიკულები საინტერესოა არიან, კერძოდ აქტუალურია შევისწავლოთ, მათი პოტენციალი ნივთიერებისა და ენერგიის გადატანისას კორონაში. ეს პოტენციალი აღიარებულია ადრეც (მაგ., Beckers 1968; Pneuman & Kopp 1978; Athay & Holzer 1982), მაგრამ მაღალი ხარისხის დაკვირვებების უკმარისობის გამო სპიკულებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების და მათი კორონასთან კავშირის კარგი / სანდო ახსნა ვერ მოხერხდა (მაგ. Withbroe, 1983; Pneuman & Kopp 1978). მზის ოპტიკური ტელესკოპის გამოჩენამ (მაგ., Kosugi et al. 2007; Tsuneta et al. 2008; Suematsu et al. 2008) გამოიწვია დიდი ნახტომი სპიკულების ბუნების გაგებაში. ოპტიკური ტელესკოპებით მაღალმა სივრცული და დროითი გარჩევითობის დაკვირვებებმა (თანამედროვე დაკვირვებებმა) მზის ქრომოსფეროზე, გამოავლინა უფრო მეტად დინამიური სპიკულები ვიდრე ადრე იყო ცნობილი, რამაც განაახლა კვლევა კორონის გათბობის მექანიზმში მათი წვლილის შესწავლაში (მაგ., De Pontieu et al. 2007a, 2007b, 2007c, 2009, 2011, Pereira, 2012, 2013, 2014). ასეთმა დინამიურ სპიკულებს, რომლებსაც უწოდეს “II-სპიკულები” (II spicules), შეუძლიათ კორონა ნივთიერებით და ენერგიით მოამარაგონ (მაგ.; De Pontieu et al. 2009, 2011).

ბეკერსი (Beckers, 1964) მივიდა დასკვნამდე, რომ სპიკულები ძირითადად მზის დისკოს მართობულები არიან; მათი სიმაღლეა 2800კმ, ხოლო სიგანე 800კმ. დიზერ (DDizer, 1952) ფილტრული დაკვირვებებით აჩვენა, რომ სპიკულების სიმაღლეს შეადგენს 10" (1" დაახლოებით ტოლია 715 კმ-ის) რაშმა და რობერტსმა (Rush, et al., 1954) გამოკვლევებით დაადგინეს, რომ სპიკულების საშუალო სიმაღლე მზის დისკოს კიდიდან ზემოთ შეადგენს დაახლოებით 3"-4"-ს. დანმა (Dunn, 1959, 1957) აჩვენა, რომ სპიკულები ეს არის პლაზმა, რომელიც მოძრაობს მზის კიდიდან ზევით 30კმ/წმ სიჩქარით და აღწევს 6000კმ სიმაღლეს. მოლერმა (Mohler, 1951) მიიღო, რომ სპიკულების სიგანე შეადგენს დაახლოებით 1."8. მოგვიანებით დანი თავის გამოკვლევებში მიუთითებს, რომ სპიკულების დიამეტრი საშუალოდ შეადგენს 815 კმ, ხოლო მიშარის (MMichard, 1974) მონაცემებით H α - სპიკულების დიამეტრი დაახლოებით 950 კმ-ია.

სპიკულები ცილინდრული ფორმის წარმონაქმნებია (მაგ., de Pontieu, 1999) მათში არსებული პლაზმა ქრომოსფერული ხასიათისაა, რომლის სიმკვრივეა

დაახლოებით 0.5-2,5 კგ/მ³, ხოლო ტემპერატურა 5000-15000⁰K. თუმცა ზოგიერთი დამკვირვებელი (მაგ., Braun, 1987) უფრო დაბალ ტემპერატურას მიუთითებს 5000-8000⁰ K. ბეკერსი (Beckers, 1972) აღნიშნავს, რომ სპიკულების სიმაღლე დაახლოებით ტოლია 300-2500 კილომეტრის, ხოლო ტემპერატურა და სიმკვრივე სიმაღლესთან ერთად უმნიშვნელოდ იცვლება. დამკვირვებლების უმრავლესობა აღნიშნავენ, რომ სპიკულების სიმაღლე იცვლება 500-9500კმ ფარგლებში, მათში ქვემოდან ზემოთ ნივთიერების გავრცელების სიჩქარე დაახლოებით 15-25 კმ/წმ-ია, სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობა 6000 კმ-ის ზემოთ 5 წუთია. სპიკულებზე Ha ხაზში დაკვირვებები მიუთითებენ, რომ სპიკულები გრძელი წარმონაქმნებია, სიცოცხლის ხანგრძლივობით 5-15 წთ, და ფარავენ 1-10% მზის ზედაპირის, აღწევენ 3000კმ-ზე მეტ სიმაღლეს (მაგ., Selhorst, et al., 2003).

მზის ზედაპირზე ქრომოსფეროს დაბალ სიმაღლეებზე სპიკულების რაოდენობა დაახლოებით 10⁶-ია (მაგ., Rush 1954, Coats 1958), ხოლო 3000-5000 კმ სიმაღლეებზე 9.3×10⁴ (მაგ., Rush 1953, Athay 1957, Мамедов, Оруджев 1975). მკვლევარები (Пишкало, и др. ., 1987) მიუთითებენ, რომ სპიკულების საერთო რაოდენობაა ≈10⁵ - 10⁶. სპიკულების რაოდენობა მზის ლიმბთან მიახლოებისას მკვეთრად იზრდება, მხედველობის სხივის გასწვრივ მათი რაოდენობის გარკვევაში დიდ როლს თამაშობს სპიკულების ერთმანეთზე ზედდება, განსაკუთრებით 6000 კმ-ს ქვემოთ, მზის წყნარ არეებში სპიკულები ძირითადად მიმართული არიან ეკვატორისკენ (მაგ., Бугославская, 1946). ნაშრომში (Mosheret et al., 1977) მითითებულია, რომ მზის პოლუსის მიმართულებით სპიკულების საშუალო გაფანტვა შეადგენს 30-36%.

ქრომოსფერულ სპიკულებზე დაკვირვებებით მიღებული შედეგები საკმარისად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. დამკვირვებლების უმრავლესობა მიუთითებს, რომ სპიკულების სიგანე და სიმაღლე იცვლება 200-950კმ და 500-9500კმ ფარგლებში შესაბამისად. Hinode/SOT დაკვირვებებმა აღმოაჩინა, რომ სპიკულების დიამეტრი დაახლოებით 200კმ-ის რიგისაა. მკვლევარები (De Pontieu et al., 2007b, 2004) აღნიშნავენ, რომ სპიკულების სიგანე საშუალოდ იცვლება 350-400კმ ფარგლებში. იმ სიმაღლეებზე, სადაც სპიკულები დაიკვირვებიან, ელექტრონული სიმკვრივე გაცილებით ნაკლებია ვიდრე 10⁹ სმ⁻³, ამიტომ, რომ სპიკულები უფრო მკვრივია ვიდრე მისი გარემომცველი არე (მაგ., Aschwanden, 2004).

შვედური მზის ტელესკოპით (D=1მეტრი) მიღებული დაკვირვებებია გაანალიზებული ნაშრომში (Skogsrud et al., 2014). დამუშავებულია მზის კიდიდან მაღალ სიმაღლეებზე დაკვირვებული Ha ხაზში მიღებული სპექტრები, რათა მინიმუმამდე იყოს დაყვანილი სპიკულების ზედდება. ისინი აღნიშნავენ, რომ მრავალ სპიკულს აქვთ ასიმეტრიული სპექტრი, ზოგიერთი რამდენიმე პიკს შეიცავს. ავტორები მიუთითებენ, რომ დოპლერის სიჩქარეები 57 სპიკულისათვის იცვლება 20 – 30 კმ/წმ. ისინი აღნიშნავენ, რომ ერთი სპიკული შესდგება რამდენიმე „მაფისაგან“/ზოჩკოსაგან. სპიკულების ზედდება იწვევს სპექტრის ასიმეტრიას, რაც იწვევს ნივთიერების ვერტიკალურ ნაკადებს სპიკულების

შიგნით. მათ ინდივიდუალურ სპიკულებისათვის იპოვეს სპექტრული გადახრა, რაც სპიკულების რთულ დინამიკურ სტრუქტურულ ბუნებაზე მიუთითებს.

უმრავლესობა დამკვირვებლებისა სპიკულების სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობისათვის დაახლოებით ერთნაირ მნიშვნელობას აფიქსირებს: ბეკერსის (Beckers, 1964, 1960, 1972) მონაცემებით სპიკულების სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობა \approx 6-10 წუთია, მაქსიმალური - 16 წთ; გიგანტი/მაკროსპიკულები ცოცხლობენ 40 წუთი და ვრცელდებიან დაახლოებით 20 000კმ სიმაღლეებამდე (მაგ., Koutchmy, et al., 1991; Pike and Mason, 1998; Pike and mHarrison, 1997; Xia, et al., 2005; Yamauchi, et al., 2005; Madjarska, et al. 2006; Nishizuka, et al., 2009); რობერტსმა (Roberts, 1945, 1979) პირველმა განსაზღვრა სპიკულების საშუალო სიცოცხლის ხანგრძლივობა, რომელიც შეადგენს 4-5 წუთს. დანმა (Dunn R. B.: 1959, 1957) და ლიპინკოტმა (Lippincott, 1959) სპიკულების სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობა მიიღეს 5 წთ, ხოლო ნიკოლსკი (Никольский, 1965), ათეი (Athay, 1959), დე იაგერი (Де Ягер, 1962) თვლიდნენ, რომ სპიკულების სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობა შეადგენს 2-3 წთ-ს. მოგვიანებით ნიკოლსკიმ და საზანოვმა (Никольский, Сазанов, 1966), $H\alpha$ - სპიკულებიშათვის განსაზღვრეს სიცოცხლის ხანგრძლივობა და მიიღეს \approx 20 წთ, ისინი აღნიშნავენ, რომ მზის ზედაპირზე განლაგებულია დაახლოებით 400 000 სპიკული; ბანოსი (Banos, 1973) თვლის, რომ 6000კმ სიმაღლეზე სპიკულების სიცოცხლის ხანგრძლივობა \approx 1-10 წუთია, საშუალოდ კი - 4.5 წთ; დანმა (Dunn, 1959), 5000 კმ სიმაღლეზე სპიკულების სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობად მიიღო 5 წთ. არც სპიკულების წარმოშობის მექანიზმია კარგად ახსნილი (მაგ., Sterling, 2000, Lorrain, et al., 1996. Filippov, 2000, Christopoulou, et al. 2001).

ასეთი განსხვავებები სპიკულების სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობის განსაზღვრაში შეიძლება გამოწვეული იყოს, როგორც სპიკულებზე სხვადასხვა სიმაღლეზე დაკვირვების გამო, ასევე დაკვირვების ექსპოზიციის ხანგრძლივობით. დავუშვათ, რომ სპიკულებს ვაკვირდებით 4500 კმ და 7000 კმ სიმაღლეებზე, ერთიდაიგივე ექსპოზიციით, როგორც წესი პირველ შემთხვევაში სპიკულების სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობა გამოვა მეტი.

ნაშრომში (Xia1, et al., 2005) შესწავლილია UV და EUV სპიკულების დინამიური თვისებები კორონის ჩრდილო და სამხრეთ პოლუსებთან. EUV სპიკულები შეისწავლეს 3 თანამიმდევრული დაკვირვებების საფუძველზე, მათგან ერთერთი მათგანის დაკვირვების ხანგრძლივობაა \approx 14 სთ. ეს რათქმუნდა იწვევს დიდ ინტერესს, რადგან 14 საათი მრავალჯერ აღემატება სპიკულების სიცოცხლის ხანგრძლივობას, რაც იძლევა შესაძლებლობას დავინახოთ სპიკულების წარმოშობა, განვითარება და გაქრობა უწყვეტად მთელი სიცოცხლის განმავლობაში კორონის ჩრდილო და სამხრეთ პოლუსებთან. ავტორების აზრით სპიკულები წარმოიშვებიან რამდენჯერმე ერთიდაიგივე ადგილზე. მათ შეამჩნიეს, რომ სპიკულები აღწევენ რა მაქსიმალურ სიმაღლეს, ანუ განვითარების მაქსიმუმს,

ისისნი ბრუნდებიან ქრომოსფეროსკენ, იგივე სიჩქარით, რა სიჩქარითაც მოძრაობდნენ ქვევიდან ზევით. სპიკულების წარმოშობა პერიოდულად ყოველ ≈ 5 წუთში ხდება შესამჩნევი. უმრავლეს შემთხვევაში სპიკულების სიმაღლე არის 10"-20" მზის კიდიდან, ხოლო სიცოცხლის ხანგრძლივობა მერყეობს 15-30 წთ. ზოგიერთი სპიკული აღწევს 40" სიმაღლეს, ესენია მაკროსპიკულები "macrospicules", რომლებიც შესდგებიან მაღალი სპიკულების ჯგუფისაგან. სპიკულების გარკვეულ ნაწილს ≈ 5 წთ-იანი რხევის პერიოდულობა თვალნათლივ გამოხატული აქვთ.

ყულიჯანიშვილი და ნიკოლსკი (Kulidzanishvili, 1980, Kulidzanishvili, Nikolsky, 1978, V.I. Kulidzanishvili, Zhugzhda, 1983) აღნიშნავენ, რომ სპიკულების დოპლერის სიჩქარეები იცვლება -11 კმ/წმ - +11კმ/წმ შუალედში, საშუალოდ დოპლერის სიჩქარე $V_r = 0$ (გაზომვის სიზუსტეა 0.5 კმ/წმ). სპიკულების თითქმის 80% აქვთ სიჩქარე $|V_r| \leq 4$ კმ/წმ. ავტორები მივიდნენ დასკვნამდე, რომ დოპლერის სიჩქარეები იცვლებიან კვაზიპერიოდულად. ყულიჯანიშვილმა (Kulidzanishvili, 1980) 5000-9500 კმ სიმაღლეების შუალედში მილო H α -სპიკულების კვაზისინქრინული სიმაღლეთა სერია, სადაც დამუშავებული იქნა სპექტრული ხაზის 300 პროფილი. მან მიიღო, რომ H α -სპიკულების ნახევარსიგანეები უმნიშვნელოდ მცირდებიან სიმაღლის ზდის მიხედვით. $T = 6000^{\circ}$ K ტემპერატურაზე ტანგენციალური სიჩქარის საშუალო მნიშვნელობა დაახლოებით ტოლია $V_t = 29$ კმ/წმ. ტანგენციალური სიჩქარე 4800კმ-9500კმ სიმაღლის შუალედში დაახლოებით იცვლება 32კმ/წმ - 23კმ/წმ შუალედში. ავტორმა მიიღო, რომ დოპლერის სიჩქარეები იზრდება სიმაღლის ზრდასთან ერთად. დოპლერის სიჩქარესა და სიმაღლეს შორის ემპირიულ დამოკიდებულებას აქვს სახე

$$|V_r| = 0.93h - 1.4 \cdot 10^3$$

აქედან ცხადია, რომ როცა $h = 1500$ კმ, მაშინ $V_r = 0$.

აბასთუმნის ასტროფიზიკურ ობსერვატორიაში დაკვირვებების თანახმად (Khutsishvili, et al., 1981, 1982, 1983, 1983, 1985, 1986, 1995, 2000, 2004) სპიკულები ძირითადად წარმოიშვებიან ქრომოსფეროს დაბალ ფენებში. მათი წარმოშობა მიმდინარეობს თანდათანობით. სპიკულების წარმოშობამდე ჩანს დიფუზური წარმონაქმნი, პატარა სპიკულის წარმოშობის შემდეგ დიფუზური წარმონაქმნი ქრება. სპიკული თავისი განვითარების მაქსიმუმს და მაქსიმალურ სიმაღლეს აღწევს წარმოშობიდან დაახლოებით 3-4 წუთის შემდეგ. ამგვარ მდგომარეობაში სპიკული რჩება თავის სიცოცხლის ხანგრძლივობის ნახევარ დროზე უფრო მეტ ხანს. შემდეგ ინტენსივობა ეცემა და სპიკული მაღალ სიმაღლეებზე შეუმჩნეველი ხდება და გარკვეული დროის შემდეგ ქრება. გამქრალი სპიკულის ადგილზე კვლავ დიფუზური წარმონაქმნი გამოჩნდება, რომლის სიგანე რამდენჯერმე აღემატება სპიკულის სიგანეს. ქრომოსფეროს სავადასხვა სიმაღლეზე დროის ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში აბასთუმანში მიღებული დაკვირვებითი მასალიდან (Khutsishvili, 1986) დაადგინეს, რომ H α -სპიკულების სიცოცხლის

ხანგრძლივობა შეადგენს 15-20წთ-ს, ხოლო D₃-სპიკულებისა, 25-30 წუთს, შესაბამისად.

ამგვარად სპიკულის წარმოშობის დასაწყისში ერთდროულად ჩანს როგორც ძალიან სუსტი სპიკული, ასევე დიფუზური წარმონაქმნი, ხოლო შემდეგ, სპიკულის განვითარებასთან ერთად, დიფუზური წარმონაქმნი ქრება. ეს დაკვირვებითი ფაქტი შესაძლებელია მიუთითებს დიფუზური წარმონაქმნის კონდესაციაზე, რასაც სპიკულის წარმოქმნა მოყვება ან პირიქით, სპიკულის გაქრობა წარმოშობს დიფუზურ წარმონაქმს. დაკვირვებების ახალი მეთოდის საფუძველზე მომავალში ეს პრობლემა მოითხოვს დაწვრილებით შესწავლას.

არსებობს შეხედულება, რომ სპიკულები წარმოიშვებიან დაახლოებით 2000კმ სიმაღლეზე, საშუალო სიჩქარით 25კმ/წმ, აღწევენ მაქსიმალურ სიმაღლეს, შემდეგ ქრებიან ან ჩამოდიან ფოტოსფეროში უკან იგივე სიჩქარით (მაგ., Beckers 1968; Pasachoff et al. 2009), სიცოცხლის ხანგრძლივობაა 5-15 წთ. მკვლევარები (Pasachoff et al. 2009) განმარტავენ, რომ სიცოცხლის ხანგრძლივობა აჩვენებს პიკს 7 წთ-ზე.

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ასეთი განსხვავებები სპიკულების სიცოცხლის საშუალო ხანგრძლივობის განსაზღვრაში შეიძლება გამოწვეული იყოს, როგორც სპიკულებზე სხვადასხვა სიმაღლეზე დაკვირვების გამო, ასევე დაკვირვების ექსპოზიციის ხანგრძლივობით.

§1.2 ქრომოსფერული სპიკულების დოპლერის/ტანგენციალური სიჩქარეები, რხევები, ტალღები, ბრუნვა, ინტესივობა, ექვივალენტური და ნახევარ სიგანეები

მკვლევარების დიდი ნაწილი აღნიშნავს, რომ ნივთიერება სპიკულებში დაახლოებით ერთიდაიგივე სიჩქარით გადაადგილდება ქვემოდან ზემოთ, აღწევს რა თავის მაქსიმალურ სიმაღლეს, „გაჩერდება“, რის შემდეგაც ან იგივე სიჩქარით დაიწყებს მოძრაობას ქვევით, ან ხდება მისი დისიპაცია კორონაში. სპიკულებში ნივთიერების ასეთი მოძრაობის საშუალო სიჩქარეები 20-30კმ/წმ-ის ფარგლებში მერყეობს (მაგ., Saleem, et al., 2007; Koutchmy, et al., 1976). დე იაგერის (Де Ягер, 1962) გამოთქმულ მოსაზრებაში, სპიკულებში იზომება არა ნივთიერების მოძრაობის სიჩქარეები, არამედ ის სიჩქარეები, რომლის დროსაც ეს ნივთიერება ხილვადი ხდება.

დიზე (Dizer, 1952) თვლის, რომ სპიკულებში ნივთიერების მოძრაობის საშუალო სიჩქარე ტოლია - 20 კმ/წმ. ლი პინკოტი, აღნიშნავს, რომ (Lippincott, 1959), ნივთიერების მოძრაობის საშუალო სიჩქარე 9500 კმ სიმაღლეზე ტოლია-19 კმ/წმ. რაში და რობერტის მიერ მიღებული დამზერითი შედეგებით (Rush, Roberts, 1954), 7000კმ სიმაღლეზე ნივთიერების სიჩქარე ≈ 30 კმ/წმ-ია. ნიკოლსკის (Никольский, 1965) მონაცემებით 6000 კმ სიმაღლეზე სიჩქარე ≈ 20 კმ/წმ-ია, იგი აქვე აღნიშნავს, რომ გვხვდებიან სპიკულები რომელთა სიჩქარეები ≈ 50 კმ/წმ აღწევს, ბანოსი (Banos, 1973) თვლის, რომ სიჩქარე ≈ 26 კმ/წმ-ია. ავტორები (Saleem, et al., 2007) თვლიან, რომ სპიკულებში ნივთიერების გავრცელების სიჩქარეები იცვლება 20-30კმ/წმ-ის შუალედში.

სპიკულებში ნივთიერების გავრცელების საშუალო კვადრატული ტანგენციალური სიჩქარის მნიშვნელობა დაახლოებით ტოლია 25კმ/წმ-ის (Pasachoff, et al., 1968). ისინი გვთავაზობენ, რომ 300კმ/წმ სიჩქარეები შეიძლება არსებობდნენ 2000კმ და 4000კმ სიმაღლეებზე. ეს რამდენამდე მეტია ვიდრე ქრომოსფეროში არსებული ბგერითი სიჩქარეებზე, მაგრამ ალფენის ტალღების მსგავსი სიჩქარეები რომლებიც იწვევენ სპიკულში ნივთიერების ასეთ აჩქარებას გამოწვეულია მაგნიტური მექანიზმით. მკვლევარებმა (Zaqarashvili, 2013) აჩვენეს, რომ ალფენის (Alfvén) ტალღები მცირე პერიოდებით (<5 წმ) ნეიტრალური იონების დაჯახებებით ქრებიან უფრო ჩქარა. მეორეს მხრივ უფრო დიდი პერიოდიანი (> 5 წმ) ტალღები ვერ აღწევენ გარდამავალ ფენას, იმიტომ რომ დაბალ სიმაღლეზე ისინი დიდიხნით ვერ ცოცხლობენ.

მკვლევარებმა (Okamoto, Takenori J. and Bart De Pontieu, 2011) შეისწავლეს 89 სპიკულში გავრცელებული „Alfvénic“ ტალღები და დაადგინეს: (1) სპიკულებში აღმავალი და დაღმავალი ტალღების რაოდენობის ზრდა, ისევე როგორც მუდმივი ტალღის, არის 59%, 21%, 20% შესაბამისად; (2) სიმაღლის ზრდასთან ერთად ფაზის სიჩქარე თანდათანობით იზრდება; (3) დაბალ სიმაღლეებზე აღმავალი ტალღები დომინირებენ, ხოლო მაღალ სიმაღლეებზე დომინირებენ დაღმავალი ტალღები; (4) აღმავალი ტალღები დომინირებენ სპიკულის განვითარების შუა ფაზაში, ხოლო დაღმავალი ტალღები დომინირებენ სპიკულის განვითარების საწყის და ბოლო ეტაპზე; (5) ზოგიერთ სპიკულებში ტალღების რაოდენობის ზრდა ხდება სპიკულის ფუძის ზედა ნაწილში, ხოლო ზოგიერთი სპიკულებში

ტალღების რაოდენობის ზრდა ხდება სპიკულის ზედა ნაწილის ქვედა არეში, იმიტომ რომ სპიკულის შუა ნაწილში მოხდეს მუდმივი ტალღის ჩამოყალიბება; (6) რხევის ამპლიტუდა და პერიოდი შეადგენდა 55 კმ და 45 წმ, შესაბამისად.

დე იაგერმა (De Jager K.: 1962) დაადგინა, რომ 3999-4000კმ სიმაღლეზე სპიკულებში ნივთიერების გავრცელების სიჩქარე ≈ 18 კმ/წმ-ია. მიშარი (Michard, 1956, 1959) აღნიშნავს, რომ სპიკულებში ნივთიერების გავრცელების საშუალოკვადრატული ტანგენციალური სიჩქარე შეადგენს ≈ 13.5 კმ/წმ-ს. სპიკულებში ნივთიერების გავრცელების სიჩქარე დაახლოებით 20-25 კმ/წმ-ია. (Koutchmy, et al. 1976), მათი სიმაღლე იცვლება 6 500 - 20 000 კმ-ის ფარგლებში. ნაშრომში (Иванчук, и др., 1985, 1985a) ნაჩვენებია, რომ ნივთიერება სპიკულებში მისი ღერძის გასწვრივ მართლაც მოძრაობს, როგორც ზევით ასევე ქვევით სიჩქარით 20-30კმ/წმ. ამ ნაშრომში ავტორები სპიკულების რხევით მოძრაობებს მაგნიტოჰიდროდინამიკურ ტალღებთან (МГД) აკავშირებენ.

ივანჩუკი (Иванчук, и др., 1985, 1985a) ქრომოსფეროს 4200კმ სიმაღლეზე დიდ დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფით დააკვირდა H α -სპიკულებს. დაკვირვებითი მასალის ანალიზის (70 სპიკული დაამუშავა, დაკვირვების ხანგრძლივობა 274 წმ.) საფუძველზე მან მიიღო შემდეგი მორფოლოგიური და დინამიური მონაცემები; სპიკულების დოპლერის სიჩქარეები საშუალოდ იცვლება ± 30 კმ/წმ-ის შუალედში, $\langle V_r \rangle = 11.7$, ძირითადი მაქსიმუმი ნულთან ახლოა; ტანგენციალური სიჩქარეები $\langle V_t \rangle = 9.2$ კმ/წმ-ია; ტურბულენტური სიჩქარეები 6 000⁰ K ტემპერატურაზე ≈ 20.5 კმ/წმ-ია; ბეკერსმა (Beckers, 1972) იპოვა ტემპერატურის ზრდა 9000⁰-დან - 16 500⁰ K-მდე, 2000 კილომეტრიდან ზევით სპიკულის თავში. მკვლევარები (Matsuno & Hirayama, 1988) მიუთითებენ შედარებით ნაკლებ ტემპერატურაზე 5000⁰-8000⁰ K.

ნიკოლსკი და საზანოვი (Никольский, Сазанов, 1966) თვლიან, რომ სპიკულის უფრო მკვირივი ცენტრალური არეებიდან, საიდანაც გამოსხივება H α ხაზი, დოპლერის სიჩქარეების სიდიდე უფრო მეტია, ვიდრე იმ ადგილებში საიდანაც სხივდება D $_3$ ჰელიუმის ხაზი. ტურბულენტური სიჩქარეები D $_3$ -სპიკულებისთვის ≈ 4 კმ/წმ., ხოლო ნახევარსიგანე $\Delta\lambda = 0.3\text{\AA}$. ნიკოლსკაიამ (Никольская, 1966, 1966, 1966,) გაზომა D $_3$ სპიკულების ექვივალენტური სიგანე პოლუსებზე და ეკვატორზე და აჩვენა, რომ იგი იცვლება $0.5 \times 10^{-3}\text{\AA} - 1.5 \times 10^{-3}\text{\AA}$. შუალედში. მისი დასკვნის საფუძველზე, ექვივალენტური სიგანეები უნიშვნელოდ მცირდება სიმაღლის ზრდასთან ერთად.

ყულიჯანიშვილი და ნიკოლსკი (Kulidzanishvili, Nikolsky, 1978) აბასთუმნის ობსერვატორიაში 53-სმ კორონოგრაფით დააკვირდნენ H α -სპიკულებს ქრომოსფეროს ერთიდაიგივე 4200კმ სიმაღლეზე 22 წუთის განმავლობაში. გამოიკვლიეს 675 პროფილი და დაადგინეს დამოკიდებულება სრულ ნახევარ-

სიგანეებსა $\Delta\lambda$, ინტენსივობასა და W ექვივალენტურ სიგანეებს შორის. მათ სპიკულები დაყვეს ორ ჯგუფად. შედარებით კამკაშა/ინტენსიური სპიკულები (გაზომილი სპიკულებიდან ასეთი სპიკულების რაოდენობამ შეადგინა 30%), რომლებისთვისაც $\Delta\lambda$ და W სიდიდეებს უფრო მკვეთრი დამოკიდებულება აქვთ შეიყვანეს პირველ ჯგუფში, ხოლო დანარჩენი ნაკლებად ინტენსიურები (70%) შეიყვანეს მეორე ჯგუფში. მათ გააკეთეს დასკვნა: პირველი ჯგუფისათვის - $\Delta\lambda=1.6\text{\AA}$, $W=1.3\text{\AA}$; მეორე ჯგუფისათვის - $\Delta\lambda=1.3\text{\AA}$, $W=0.08$; ტემპერატურაზე 6000°K , მინიმალური სიგანისათვის $\Delta\lambda=1.0\text{\AA}$ ტურბულენტური სიჩქარე $V_t = 25\text{კმ/წმ}$.

სპიკულების ბრუნვა თავიანთი ღერძის გარშემო აღწერილი აქვს პასახოვსა და მიჩარდს (Pasachoff , 1968, Michard, 1959), რომლებიც აღნიშნავენ, რომ ბრუნვის სიჩქარის მაქსიმალური მნიშვნელობა, 1000კმ დიამეტრის სპიკულის ზედა წვეროს გარე საზღვართან, დაახლოებით 30კმ/წმ-ის ტოლია, ხოლო ბრუნვის პერიოდი კი ~ 2 წუთის ფარგლებში მერყეობს.

ნაშრომში (Madjarska, et al., 2011) გაანალიზებულია SUMER/SoHO და EIS/SOT/XRT/Hinode დევირვებებიდან მიღებული სპიკულების გამონასახები. დაკვირვებული მრავალი სპიკულებიდან მათ ამოარჩიეს სამი დიდი სპიკული. მათ დაასკვნეს, რომ ისინი ბრუნავენ და ადიან ზევით, და გარკვეული დროის შემდეგ კი ეშვებიან ქვევით. მათი ბრუნვა გავს დაგრებილი დიდი თოკის გრებისაგან განთავისუფლებისას ბრუნვას, ისინი აჩვენებენ სიჩქარეს 50-250კმ/წმ. ამ ნაშრომში მთავარ შედეგად ავტორები თვლიან, რომ ასეთი სპიკულები, რომლებიც ძალიან დიდებია და დინამიურები არიან, ფორმირდებიან $300\ 000^{\circ}\text{K}$ ტემპერატურაზე.

მკვლევარები (Tavabi, et al.,2015) აღნიშნავენ, რომ პოლარულ სპიკულებს გრეხვითი (helical) დინამიკა აქვთ. მათ ეს ფაქტი რამდენიმე მაღალ სპიკულებში აღმოაჩინეს: ა) აღმავალი და დაღმავალი ნაკადები; ბ) მარცხენა და მარჯვენა სიჩქარეები იზრდება სიმაღლის ზრდისას; გ) სპიკულებში მარცხენა და მარჯვენა სიჩქარეების არსებობას ხსნიან გრეხვითი ბრუნვის არსებობით. შემობრუნების სიდიდე დამოკიდებულია სპიკულების დიამეტრის სიდიდეზე. სპიკულის გასწვრივ არსებული ღუნვები შეესაბამება სპიკულების შემობრუნების დაბალ რიცხვს და სხვა.

მკვლევარები (Kulidzanishvili, Nikolsky, 1978; Кулиджанишвили , 1980; Kulidzanishvili, Zhugzhda, 1983; Khutsishvili, et. al., 1981, 1983, 1983, 1985, 1986, 1995, 2004, Kukhianidze, Zaqarashvili, Khutsishvili, 2006, Zaqarashvili, Khutsishvili, et. al., 2007) აღნიშნავენ, რომ: H α -სპიკულების დოპლერის სიჩქარეები დაახლოებით $\pm\pm 12\text{კმ/წმ}$ შუალედში იცვლება, ხოლო D β - სპიკულებისა $\pm\pm 6\text{კმ/წმ}$ -ის ფარგლებში მერყეობს; დოპლერის სიჩქარეების სიდიდე წყალბადის H α და ჰელიუმის D β -სპიკულებისათვის იზრდება ქრომოსფეროს სიმაღლის ზრდასთან ერთად; ტანგენციალური სიჩქარე კი, 4800კმ-9500კმ სიმაღლის შუალედში, დაახლოებით

23-დან 32 კმ/წმ-ის ფარგლებში მერყეობს; სპიკულების ნახევარსიგანეები უმნიშვნელოდ იცვლება და მათი სიდიდეები მცირდება სიმაღლის ზდის მიხედვით; ზემოთ აღნიშნულმა ავტორებმა აღწერეს მექანიზმი ვერტიკალური 5-წუთიანი რხევების ტრანსფორმაციისა ჰორიზონტალურ რხევებში (kulidzanishvili, Nikolsky.,1978; და kulidzanishvili, 1980); დაადგენილია დამოკიდებულება სრულ ნახევარსიგანეებს $\Delta\lambda$, ინტესივობასა და W ექვივალენტურ სიგანეებს შორის; აღწერილია სპიკულების წარმოშობისა და გაქრობის მექანიზმი; H α -სპიკულების სიცოცხლის ხანგრძლივობა შეადგენს 15-20 წუთს, ხოლო D δ -სპიკულებისა კი - 25-30 წუთს; დაიკვირვება როგორც ცალკეული, ასევე ჯგუფებად გაერთიანებული სპიკულებიც; ამ უკანასკნელთა ზომები საშუალოდ 13"-16"-ის ფარგლებში მერყეობს; შესწავლილია სხივური სიჩქარეების რხევის პერიოდები და ამპლიტუდები; აგებულია სპიკულების თეორიული მოდელებიც; შესწავლილია სპიკულების სივრცული მოძრაობების ტრაექტორიები; გაკეთებული დასკვნის მიხედვით, კარგად ჩანს, რომ წყალბადის H α და ჰელიუმის D δ -სპიკულები ერთსადაიმევე ქრომოსფერულ წარმონაქმნებს წარმოადგენს.

5-წუთიანი ვერტიკალური რხევები ფოტოსფეროში პირველად ლეიტონმა (Leighton, 1961, 1962) აღმოაჩინა. 5-წუთიანი ჰორიზონტული რხევები ქრომოსფეროში ყულიჯანიშვილმა და ნიკოლსკიმ დააფიქსირეს (მაგ., kulidzanishvili, Nikolsky.,1978; და kulidzanishvili, 1980, Kulidzanishvili, Zhugzhda, 1983). სპიკულების შესაძლო რხევებზე მიუთითებენ ნაშრომი (Pasachoff, 1968), ანალოგიურ რხევებს განიცდის ფოტოსფერო (მაგ., Tsubaki T.: 1977), ნაშრომებში (Platov, Shilova, 1971; Дынов, 1978) ავტორები მიუთითებენ სპიკულების ჰორიზონტალური რხევების შესაძლებლობაზე.

სპიკულების 5 წუთიანი რხევები დაფიქსირებულია, როგორც კოსმოსური, ასევე მიწიერი დაკვირვებებიდან (მაგ.,kulidzanishvili, Nikolsky.,1978; და kulidzanishvili, 1980, Kulidzanishvili & Zhugzhda, 1983; De Pontieu et al. 2003; Xia et al. 2005). რხევები უფრო მოკლე პერიოდით 1 წთ შემჩნეული იქნა ნიკოლსკისა და პლატოვის (Nikolsky and Platova, 1970, 1971) მიერ.

ნაშრომში (Kim Yeon-Han, et al., 2008) Hinode დაკვირვებების საფუძველზე შესწავლილია 3 სპიკული. პირველი სპიკულს (03.07.2008) დააკვირდნენ 6 000კმ სიმაღლეზე, მეორეს (04.07.2008) 5 000კმ სიმაღლეზე, ხოლო მესამეს (04.07.2008) 4 200კმ სიმაღლეზე. დაკვირვება მიმდინარეობდა ჩრდილოეთ პოლუსთან ახლოს. სპიკულების მოდელად განხილილია ვიწრო მაგნიტური მილი. მათ განსაზღვრეს პერიოდი, ამპლიტუდა, ტალღის მინიმალური სიგრძე და სიჩქარე. მიიღეს შემდეგი ძირითადი შედეგები: 1. სპიკულები ირხევიან 5-7 წთ შუალედში, რხევის პერიოდია 2-3 წთ, სიგანეა 700-1000კმ. 2. შედარებით დაბალ ფენებში მაგნიტური ველის სიდიდეა დაახლოებით 10-18 გაუსი, ხოლო მაღალ ფენებში 43-76 გაუსი. 3. რხევადი ტალღის მინიმალური სიგრძეებია 60 000კმ, 56 000კმ, 45 000კმ. 4. დროის შემოსაზღვრულ შუალედში არსებობდა რხევა (დაახლოებით 250

წმ). ეს ნიშნავს, რომ რხევები შეიძლება გამოწვევული იქნეს იმპულსური მექანიზმით. ავტორები აღნიშნავენ, რომ გარეატმოსფერული დაკვირვებებიდან მიღებული რხევები განსხვავებულია მიწიერ დაკვირვებებიდან მიღებულ რხევებისაგან. მაგ. ტალღის სიჩქარე 3-4 ჯერ მეტია და 2-3 ჯერ ხანგრძლივია.

პირველი სპიკულის სიცოცხლის ხანგრძლივობაა 430წმ, რხევის პერიოდი დაახლოებით 130წმ ამპლიტუდით 1000კმ. რხევა შეიმჩნეოდა 260 წმ-ის შუალედში, რაც ტოლია სპიკულის სიცოცხლის ხანგრძლივობის ნახევრის. რხევის ტალღის სიგრძე მეტია 750კმ-ზე. როგორც შეაფასეს ტალღის მინიმალური სიგრძე არის $8 \times 7500 \text{კმ} \sim 60000$ (Okamoto et al. 2007). მეორე სპიკულის სიცოცხლის ხანგრძლივობა-320წმ-ია, რხევის პერიოდი 180 წმ, ამპლიტუდა 700კმ. დასაშვები მინიმალური ტალღის სიგრძეა 56 000კმ, ტალღის სიჩქარე დაახლოებით 310 კმ/წმ. ამ სპიკულისათვის მაგნიტური ველია - 12-52გ, ხოლო რხევის პერიოდი ქრომოსფეროს რხევის პერიოდის ანალოგიურია - 3წთ. მესამე სპიკულის სიცოცხლის ხანგრძლივობაა -305 წმ, რხევის პერიოდი 170 წმ, ამპლიტუდა 800კმ. ტალღის სიგრძის და სიჩქარის მინიმალური სიდიდე დაახლოებით ტოლია 45 000კმ და 260 კმ/წმ შესაბამისად. ამ შემთხვევაში მანიტური ველის დასაშვები სიდიდე 10-43 გ. ავტორები აკეთებენ დასკვნას: სპიკულის სიცოცხლის ხანგრძლივობაა 300-340წმ, რხევის პერიოდი 2-3წთ, სიგანე 700-1000კმ, სიჩქარე 8-15 კმ/წმ, ტალღის სიგრძის დასაშვები მინიმალური სიგრძეა 45 000-60 000კმ, ხოლო სიჩქარე 260-460 კმ/წმ.

სპიკულების რხევების, ინტენსივობის ცვლილების პერიოდულობა და ქრომოსფერულ სპიკულებში მაგნიტოჰიდროდინამიკური ტალღების (MHD) გავრცელების ბუნება შესწავლილია შრომებში (Ebadi, at all., 2012; Kukhianidze, at all., 2006; Zaqarashvili, at all., 2007, Nikolsky, at all., 1971; Kulidzanishvili, at all.,1978, Kim, Yeon-Han, 2008). როგორც სხვა მკვლევარებმა მათაც აღნიშნეს, რომ სპიკულების პერიოდული ზედა და ქვედა მოძრაობები შეიძლება გამოიწვიოს გრანულების არასტაციონალურმა მოძრაობებმა. (MHD) წარმოდგენს ერთ-ერთ ძირითად ინსტრუმენტს, პლაზმის ჰიდროდინამიკის დასადგენად. ეს ეხება თითქმის ყველა წარმონაქმნს, დაკვირვებულს მზის ატმოსფეროში: კრონული მარყუჟებს, სპიკულებს და სხვა.

მაგნიტურ მილებში რხევების არსებობის შესაძლებლობა აღწერილია ნაშრომში (Carter and Erdélyi, 2007; Jess, et al., 2009, Erdelyi, et al., 2007). სპიკულებზე დაკვირვებების შედეგად მიღებული რხევების პერიოდები ფორმალურად შეიძლება დავყოთ ორ ჯგუფად: შედარებით მოკლე პერიოდები (<2 წთ.) და გრძელი პერიოდები (>2წთ.). დაკვირვებული პერიოდები ძირითადად მოთავსებულია 3-7 წთ-ის და 50-110 წმ-ის შუალედებში (Zaqarashvili and Erdelvi, 2009). რხევები პერიოდით 5 წთ შესწავლილია ნაშრომებში (De Pontieu, et al., 2003, 2004, 2006). ნაშრომში (Ajabshirizadeh, et. Al., 2008, 2009) ავტორები მიუთითებენ, რომ ტალღები რხევის პერიოდით 80-120 წმ სპიკულში უფრო მაღალ

სიმაღლეებზე აღწევენ.

გეონჯიანმა (Геонджян, 1985) აბასთუმნის ობსერვატორიაში დაკვირვებებიდან შეისწავლა სპიკულების რხევითი სპექტრი, კერძოდ D_3 - სპიკულების რხევის ამპლიტუდა. მიიღო სპიკულკების დოპლერის სიჩქარეების რხევის ორი პიკი -2.5 წთ და 5 წთ. იგი აღნიშნავს, რომ არსებობს კიდევ ერთი პიკი -1.5 წთ. პაპუშევმა (Папушев, 1990) გამოითვალა სპიკულების დოპლერის სიჩქარეების რხევის პერიოდი, რომელიც მოთავსებულია 70 წმ -140 წმ და 180 წმ - 215 წმ შუალედებში. არსებობს 3-5 წუთიანი რხევები ლაქებში (De Pontieu, et al., 2003) და სპიკულებში (Xia, et al., 2005).

სპიკულების რხევები და ინტენსივობის ცვლილების პერიოდულობა შესწავლილია შრომაში (Ajabshirizadeh et al., 2008, Sánchez-Andrade Nuño, 2007), სადაც აღნიშნულია, რომ სპიკულების პერიოდული ზედა და ქვედა მოძრაობები შეიძლება გამოიწვიოს გრანულების არასტაციონალურმა მოძრაობებმა. მაგნიტურ მილებში რხევების არსებობის შესაძლებლობა აღწერილია ნაშრომში (Carter, Erdélyi, 2007). ავტორება (Zhelyazkov, 2012, Viggo Hansteen, 2013) შეისწავლეს II-სპიკულში გავრცელებული ტალღის დისპერსია და მდგრადობის ხასიათი.

ქრომოსფერულ სპიკულებში დაიკვირვება სიჩქარეები, რომლებიც გამოხატულია, როგორც სპიკულთ დაკვირვებული არეების ჰორიზონტალური მოძრაობებით, ასევე “სპიკულების ღერძის” გასწვრივ ნივთიერების მოძრაობით, რომელიც გადახრილია მხედველობის მიმართულებიდან (De Pontieu, et al., 2007a, 2007b; Zaqarashvili and Erdelvi, 2009, Morton, 2014). ეს შეიძლება აიხსნას სპიკულებში ტალღის გავრცელებით (Kukhianidze, Zaqarashvili, Khutsishvili, 2006, Zaqarashvili, Khutsishvili, et. al., 2007). სპიკულების შიგნით ნივთიერების მოძრაობას ზოგჯერ შეიძლება ქონდეს დიფერენციალური და ბრუნვითი ხასიათი, რაზეც მიუთითებს დაკვირვებული სპექტრების გადახრა დისპერსიის მიმართულებიდან.

§1.3. ქრომოსფერული სპიკულების კლასიფიკაცია

ქრომოსფეროს ძირითადი მასა სპიკულებშია თავმოყრილი, რომლებიც დომინირებენ ქრომოსფეროსა და კორონას შორის, და კორონაში გადააქვთ გარკვეული ნივთიერება და ენერგია. კლასიკური და თანამედროვე დაკვირვებული სპიკულები იწოდებიან, როგორც I და II ტიპის სპიკულებად

შესაბამისად. მიუხედავად მრავალი კვლევისა, სპიკულებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების დამაჯერებელი ახსნა ჯერ კიდევ არ არსებობს.

პასაჩოფმა კოლეგებთან ერთად (Pasachoff et al. 2009) მაღალი სივრცული შეღწევადობის შვედურ მზის ტელესკოპით (SST), რომლის გარჩევის უნარია 0.2 არკსეკუნდი (arcsec), შეისწავლა სპიკულების დინამიკა. უფრო ადრე მაღალი გარჩევის შესაძლებლობის (SOT) ოპტიკური ტელესკოპის დაკვირვებებით და Hinode (იაპონურ კოსმოსურ ხომალდზე მზის ოპტიკური ტელესკოპით) დაკვირვებებით აღმოაჩინეს ახალი ტიპის სპიკულები (II-სპიკულები), რომლებსაც აქვთ განსხვავებული თვისებები, ვიდრე კლასიკურ I-სპიკულებს (De Pontieu et al. 2007, 2007a). მაგალითად (Pasachoff et al., 2009) მიუთითებს, რომ H α -სპიკულები (I სპიკულები) აღწევენ 4 000-12 000კმ სიმაღლეს მზის ლიმბიდან. დე პონტიე (De Pontieu et al., 2007a,) აღნიშნავს, რომ II-სპიკულები აღწევენ მაქსიმალურ 500 კმ სიმაღლეს. II-სპიკულების პლაზმა მიაღწევს, რა 10⁵ და 10⁶ კმ, უშუალოდ ქრებიან (Judge & Carlsson, 2010, 2011, Philip, 2011, 2012). ისინი იძლევიან ინტეგრეტაციას II-სპიკულებისა როგორც ნაკადის, რომლებსაც გადააქვთ სითბური ენერგია 10⁷ ერგ/სმ² წმ. ავტორი (Pereira et al. 2014) ამტკიცებს, რომ II ტიპის სპიკულის მაღალ ტემპერატურამდე სწრაფმა გაცხელებამ შეიძლება გამოიწვიოს მათი გაქრობა. II-სპიკულები დაბლა ეცემიან დაახლოებით 500-800 წმ-ის შემდეგ წარმოშობიდან. მკვლევარი მიუთითებს, რომ I-სპიკულებს სხვა თვისებები აქვთ, ისინი უჩვენებენ უფრო დაბალ სიჩქარეებს და არ ქრებიან, ისინი ან კორონაში გაიბნევიან ან უკან ბრუნდებიან. მრავალი მკვლევარის აზრით კორონის გათბობის მექანიზმში II-სპიკულები დიდ როლს თამაშობენ.

სპიკულების ჩამოყალიბების მექანიზმი ფორმალურად შეიძლება დაიყოს 3 ნაწილად: „პულსირებადით“, „ალფვენის ტალღებით“ და „p-მოდით“ (pulses, Alfvén waves, and p-mode leakage). ქრომოსფერულ სპიკულებზე მიღებული დაკვირვებითი შედეგები, როგორც მიწიერი, ასევე გარეატმოსფერული ერთმანეთისაგან განსხვავებულია. თანამედროვე კვლევებში სპიკულებს სამ ტიპად/ნაწილად ყოფენ, ესენია:

ა) კლასიკური გაგებით I-სპიკულები, რომლებიც წარმოიშობიან მზის ლიმბიდან დაახლოებით 2000კმ ქვევით და ვრცელდებიან 20–25კმ/წმ სიჩქარით კორონისაკენ. სპიკულების დიამეტრი დაახლოებით 660 ±200 კმ (Pasachoff, Jacobson and Sterling, 2009), რომელიც აღწევს 10 000კმ სიმაღლეს (Beckers, 1968, Pasachoff, Jacobson and Sterling, 2009, Tsiropoula et al. 2012, Khutsishvili, 1986.). I-სპიკულებში პლაზმის ტემპერატურა იცვლება 6 000 – 60 000 K ფარგლებში (Pasachoff, Jacobson and Sterling, 2009, Xia et al. 2005).

სპიკულების მაგნიტურ მილში რხევების არსებობის შესაძლებლობა აღწერილია ნაშრომში (Carter and Erdélyi, 2007; Jess, et al., 2009, Erdelyi, et al., 2007, Zaqarashvili et al. 2011, 2013). ნაშრომში (Khutsishvili, et al., 2014) სპიკულების რხევის ოთხი 358-167წმ, 156-114წმ, 108-81წმ და 76-50წმ შესაძლო პერიოდია მოყვანილი.

სპიკულებში რხევები პერიოდით 5 წთ შესწავლილია ნაშრომში (De Pontieu, et al., 2003, 2004, 2006, Kulidzanishvili, 1978, 1980, 1983, Khutsishvili, 1986). ალპონსეს და სტერლინგის (Alphonse Sterling, 2000; De Pontieu, Erdelyi, 2006; Zaqarashvili, and Erdelvi, 2009) მოდელები მზის ატმოსფეროში ტალღების გავრცელების შესაძლებლობაზეა დამყარებული. მათი შეხედულებით ასეთმა ტალღებმა მზის შედარებით დაბალ ფენებში შეიძლება გამოიწვიოს ნივთიერების მოძრაობა მაგნიტურ მილში.

ნაშრომებში (Ebadi, Zaqarashvili and Zhelyazkov, 2011, 2012, Yurchyshyn, Abramenko and Goode 2013, Zaqarashvili and Erdelyi, 2009, Zaqarashvili, 2011, 2003, Zaqarashvili and Skhirtladze, 2008, Zhelyazkov, 2012), განხილულია სპიკულების პლაზმური პარამეტრები, რხევები, კერძოდ, MHD ტალღების (ალფენის ტალღები) გავრცელება, სპიკულების მოდელები და სხვა. აგებულია სპიკულების თეორიული მოდელები (Murawski and Zaqarashvili, 2010, Murawski, Srivastava and Zaqarashvili, 2011).

ბ) გიგანტური სპიკულები (*macrospicules*), რომლებიც ძირითადად პოლარულ არეებში დაიკვირვებიან, ისინი აღწევენ 40 000კმ სიმაღლეს (Koutchmy, et al., 1976, 1991; Pike and Mason, 1998; Pike and Harrison, 1997; Xia, et al., 2005; Madjarska, et al. 2006, 2011, Nishizuka, et al., 2009, Ajabshirizadeh, et al., 2008, Jun Zhang, et al., 2000) და ცხოვრობენ დაახლოებით 40 წთ-ს. მაკროსპიკულებზე დაკვირვებითი მონაცემები, მიღებული სამხრეთ პოლარულ არეში პარენტიმ და მისმა კოლეგებმა (Parenti., et al., 2002) (SOHO/CDS-დაკვირვებები) გაანალიზეს. მათ მიიღეს, რომ მაკროსპიკულების სიმკვრივე დაახლოებით ტოლია 10^{10} სმ^{-3} , ხოლო ტემპერატურაა $\sim 2-3 \times 10^5 \text{ K}$. მზის კიდესთან ახლოს მაკროსპიკულების ნივთიერების საწყისი სიჩქარე მეტია ვიდრე 80 კმ/წმ, რომელიც მცირდება 26 კმ/წმ-მდე, დაწყებული $6 \times 10^4 \text{ კმ}$ - დან და ზევით.

გ) II-სპიკულები. Hinode (მაგ., Kosugi и др. 2007) დაკვირვებებმა და ადაპტიური ოპტიკის გამოყენებამ (van Noort et al. 2005) მოგვცა ახალი ჰაერი სპიკულების თანამედროვე კვლევისა. De Pontieu (2007) და სხვა დაკვირვებებმა სპიკულები წარმოგვიდგინა შედარების დინამიურ წარმონაქმნებად ვიდრე ადრე იყო ცნობილი. მათ სპიკულებს დაარქვეს ნელი ხანგრძლივი სიცოცხლის ხამგძლივობის „I ტიპის“ და ჩქარი, მცირე სიცოცხლის ხამგძლივობის „II ტიპის“. I-სპიკულების სიცოცხლის ხანგრძლივობაა 150-400 წამი, სიჩქარე 15-40კმ/წმ, და II-სპიკულების სიცოცხლის ხანგრძლივობა 50-150 წამი, სიჩქარე კი 30-130კმ/წმ. ძირითადი განსხვავება ამ ორი ტიპის სპიკულებში (სიცოცხლის ხამგძლივობა და სიჩქარე) არის ის, რომ I-სპიკულები პარაბოლურ ტრაექტორიაზე ვრცელდებიან ზევით და ეცემიან ქვევით, ხოლო II-სპიკულები მხოლოდ აღმავალი არიან, ხოლო შემდეგ ქრებიან. II-სპიკულების გაქრობის იდეა ემყარება იმ აზრს, რომ მაღალ სიმაღლეებზე ისინი სწრაფად ცხელდებიან, არ ჩანან Ha ფილტრში და შეუძლიათ აიტანონ მასა და ენერგია ზედა კორონაში (De Pontieu et al. 2007, 2009, 2011, 2012). ეს ვერსია გააამყარა შემდეგმა კვლევებმაც (მაგ., De Pontieu et al. 2011).

ამგვარად მნიშვნელოვანია, რომ შესწავლილი იქნეს ორივე ტიპის სპიკულები. II-სპიკულებს აქვთ მეტი პოტენცია ქრომოსფეროში და კორონაში მასის და ენერჯის გადატანისა. ისმება კითხვა: კლასიკური სპიკულებზე (I-სპიკულების) დაკვირვების შედეგად მიღებული ფიზიკური პარამეტრები რატომ განსხვავდება II-სპიკულების ფიზიკურ პარამეტრებთან, რომლებიც შეამჩნიეს Hinode დაკვირვებებიდან? ამ შეკითხვაზე ამომწურავი ახსნა არ არსებობს, მაგრამ დაკვირვებების დაყრდნობით დასმული კითხვის პასუხად შეიძლება შემდეგი ჩაითვალოს: (1) I-სპიკულები დაიკვირვება მხოლოდ აქტიურ არეებში, ხოლო II-სპიკულები დომინირებენ წყნარ არეებში; (2) I-სპიკულების დაკვირვებების შედარებით დაბალი სივრცული და დროითი შედწევადობა; (3) I-სპიკულების სიცოცხლის ხანგრძლივობის და დოპლერის სიჩქარეების სიდიდის დადგენაზე შესაძლებელია სპიკულების ზედდებამ გამოიწვიოს გავლენა, რასაც II-სპიკულების შემთხვევაში ადგილი არ აქვს; (4) ქრომოსფეროს რთული სტრუქტურა, არსებობს სხვა გარემოებებიც, რასაც ქვემოთ განვიხილავთ.

მორიგი დაკვირვებებით ავტორებმა (Pereira, De Pontieu, Carlsson, 2012, 2013, Zhang и др. 2012, Alphonse, et al., 2010) მზის ოპტიკური ტელესკოპით Hinode/SOT მაღალი გარჩევადობის მქონე კოსმოსური დაკვირვებებით გამოავლინეს II-სპიკულები, რომელთა ფიზიკური მახასიათებლები განსხვავდება I-სპიკულების ფიზიკური მახასიათებლებისაგან. ისინი აღნიშნავენ, რომ II-სპიკულების სიცოცხლის ხანგრძლივობა დაახლოებით 10-150წმ-ის რიგისაა, დიამეტრი ტოლია 200კმ-ის და ისინი აღწევენ შედარებით მაღალ სიჩქარეებს 50-100 კმ/წმ. დე პონტიემ და სხვ. (2007) გააიგივეს ახალი კლასის (II-სპიკულები) სპიკულები, რომლებიც გადაადგილდებიან უფრო სწრაფად და ცოცხლობენ შედარებით მცირე დროით ვიდრე ტრადიციული სპიკულები (I-სპიკულები), რომლებსაც აქვთ სიჩქარე 20 - 40 კმ/წმ და სიცოცხლის ხანგრძლივობა 3-7 წთ.

ავტორებმა (Yurchyshyn, Kilcik, Abramenko, 2013) გაანალიზეს II-სპიკულების რხევები. დაკვირვებები ჩატარდა ჩრდილოეთ პოლუსის მიდამოებში ახალი სამზეო ტელესკოპით, რომელსაც აქვს მაღალი გარჩევადობის უნარი. გაკეთებული იქნა დასკვნა: 1. II-სპიკულები შეიძლება წარმოიშვან მაგნიტური ძალწირების „გადაერთებით“ (reconnection). 2. II-სპიკულებს აქვთ ტენდენცია აჩვენონ თანამიმდევრული რხევები. რხევის პერიოდებია 30-180წმ, საშუალოდ 90წმ. II-სპიკულები წარმოადგენენ ქრომოსფეროს აღმავალ პლაზმას (de Pontieu et al. 2007), რომელსაც გადააქვს ნივთიერება და ტემპერატურა კორონაში და აჩქარებენ მზის ქარს (მაგ De Pontieu et al., 2011, 2009; McIntosh et al., 2007, 2009, 2011, 2012). ისინი აღნიშნავენ, რომ II-სპიკულებს განსხვავებით I-სპიკულებისაგან აქვთ მოკლე სიცოცხლის ხანგრძლივობა 10-100წმ, ნაკლები სიგანე 150-700კმ, მეტი სიჩქარეები 50-150კმ/წმ.

მკვლევარები (Langangen, et al., 2008) მიუთითებენ, რომ II-სპიკულებს აქვთ სიჩქარეები 50-150კმ/წმ, სიგანე 100კმ, სიცოცხლის ხანგრძლივობა 10-60 წმ. (Leenaarts, et al., 2012) აღნიშნავს, რომ II-სპიკულების სიცოცხლის ხანგრძლივობაა 10-60წმ, სიჩქარე 50-100კმ/წმ. II-სპიკულები როგორც ცნობილია აჩვენებენ რხევებს ამპლიტუდით 10-30კმ/წმ (მაგ. Tomczyk et al., 2007; McIntosh et al. 2011) და პერიოდით 100-500წმ (მაგ. Zaqarashvili & Erd'elyi, 2009), რომლებიც ინტერპრეტირდება როგორც აღმავალი ან დაღმავალი ალფენის ტალღებით (Okamoto & De Pontieu 2011), ან MHD ტალღებით (e.g., He et al. 2008, 2009; McLaughlin et al. 2012; Kuridze et al. 2012).

არსებობს მკვლევარების გარკვეული განსხვავებული მოსაზრებები იმაზე თუ როგორ წარმოიშობიან II-სპიკულები და როგორია მათი განივი/გრძობითი რხევების წყარო (Isobe et al. 2008; de Pontieu et al. 2007; Archontis et al. 2010, McLaughlin et al. 2012, Mart'inez-Sykora et al. 2011, de Wijn et al. 2009, Moortel, et al., 2012, 2012, Zhang et al., 2012, Goodman, M, 2012). მოსაზრებების ასეთი განსხვავება მკვლევარებს შორის ძირითადად გამოწვეულია დაკვირვებითი მასალის სივრცული გარჩევადობის არასაკმარისობით და ქრომოსფეროს რთული სტრუქტურით (მაგ., Judge et al. 2011; Leenaarts et al. 2012). მათ მიერ შესწავლილია ყველაზე მაღალი და კარგად ხილული სპიკულები, რომლებიც იძლევიან უფრო სანდო შედეგებს.

ავტორების Kim, Yeon-Han (2008) და სხვ. მოსაზრებით II-სპიკულების სიცოცხლის ხანგრძლივობა დაახლოებით 300-340წმ-ის რიგისაა, რხევის პერიოდს შეადგენს 2-3 წთ-ს, დიამეტრი 700-1000 კმ-ს, სიჩქარე 8-15 კმ/წმ-ს, ტალღის სიგრძის დასაშვები მინიმალური სიგრძეა 45 000-60 000კმ, ტალღის გავრცელების დასაშვებ სიჩქარეს შეადგენს 260-460 კმ/წმ. როგორც ავტორები აღნიშნავენ დაკვირვებითი მონაცემების ასეთი განსხვავება ძირითადად გამოწვეულია ქრომოსფეროს რთული სტრუქტურისა და დაკვირვებითი მასალის არასაკმარისი სივრცული გარჩევის გამო (მაგ., Judge et al., 2011; Leenaarts et al. 2012).

ავტორებმა (Sekse, et al., 2012, 2013b) გაანალიზეს Hinode-ს დახმარებით მიღებული დაკვირვებები (იისფერ (RBEs) $H\alpha$ და 8542Å). მათ მიერ მიღებული შედეგები უჩვენებენ, რომ RBEs დაკვირვებებში საშუალო სიცოცხლის ხანგრძლივობას შეადგენს 83.9 წმ, რაც სპექტრალურ ხაზებშიც დაიკვირვება. დოპლერის სიჩქარეები Ca 8542 RBEs ხაზში იცვლებიან 10 – 25 კმ/წმ შუალედში, ხოლო $H\alpha$ RBEs ხაზში დოპლერის სიჩქარეები იცვლებიან 30 – 50 კმ/წმ შუალედში.

ნაშრომში (Trujillo, et al., 2005) შესწავლილია სპექტროპოლარიმეტრული ($He\ i\ 110830$) დაკვირვებები ქრომოსფეროს სპიკულებზე. მათ აჩვენეს, რომ სპიკულების მაგნიტურ მილში 2000კმ სიმაღლეზე (წყნარ მზეზე) ლიმბის ზემოთ აქვს დაახლოებით 10 გაუსის ველი და საშუალოდ დახრილია 35° -ით იქ არსებული ვერტიკალური მაგნიტური ძაღწირებიდან.

მიჩაელმა და გოდმანმა (Michael, Goodman, 2014) განიხილეს 2.5D მაგნიტოჰიდროდინამიკური მოდელი, სადაც განხილულია, რომ ქრომოსფეროს პირობებში II-სპიკულებში დაკვირვებული სიჩქარეები შეიძლება გამოწვეული იქნეს ლორენცის ძალის გავლენით. დაახლოებით 50 გ მაგნიტურმა ველმა შეიძლება წარმოქმნას ლორენცის ძალა, რომელიც აჩქარებს პლაზმას II-სპიკულებში. მაქსიმალური ვერტიკალური სიჩქარეა 150-460 კმ/წმ. ავტორები მიიჩნევენ, რომ ძირითადად მზის ქარის აჩქარება ხდება II-სპიკულებით. ჰორიზონტული სიჩქარეები დაახლოებით 20-ჯერ ნაკლებია, ვიდრე ვერტიკალური. როდესაც სიჩქარე მიაღწევს დაახლოებით 100 კმ/წმ, ამის შემდეგ იწყება აჩქარება. ზრდა მექანიკური და სითბური ენერგიების პლაზმის აჩქარების დროს დაახლოებით ტოლია $(2-3) \times 10^{22}$ ერგის. რადიალური კომპონენტი ლორენცის ძალისა აჩქარებითი პროცესის მიმდინარეობისას დაახლოებით ~ 100 - ზე მეტია. მაგნიტური ენერგიის დაახლოებით 84% - 94%, რომელიც აცხელებს და აჩქარებს სპიკულებს, წარმოიქმნება კინეტიკური ენერგიის ნაკადიდან.

მრავალი სპექტრული დაკვირვებების საფუძველზე ავტორები (De Pontieu, Carlsson, et al. 2012) II-სპიკულების სხვადასხვა მდგომარეობას აფასებენ შემდეგნაირად (1) ნივთიერების მოძრაობის სიჩქარეა 50 – 100 კმ/წმ; (2) რხევითი სიჩქარეებია 15 – 20 კმ/წმ; (3) გრეხვითი მოძრაობების სიჩქარეა 25 – 30 კმ/წმ. ისინი მიუთითებენ, რომ II-სპიკულების დიდი ნაწილში, თუ ყველაში არა, მიმდინარეობს გრეხვითი მოდულაცია და ასეთ მოძრაობები, როგორც რხევები, გამოვლინდება ალფენის ტალღების სახით, რომელიც ვრცელდება რამდენიმე ასეულ კმ/წმ სიჩქარით და მიმართულია მზის კიდიდან კორონისაკენ. კვლევები მოპოვებული *Hinode* დაკვირვებებით უჩვენებენ კავშირს ქრომოსფეროს, გარდამავალი ფენის და კორონის პლაზმას შორის (მაგ., De Pontieu et al. 2009; McIntosh et al. 2009).

ავტორება (Tian, et al., 2012) გამოიყენეს მაღალი ხარისხის დაკვირვებითი მასალა მიღებული *Hinode/Solar* ოპტიკური ტელესკოპის დახმარებით. მათ შეისწავლეს 519 სპიკული მზის სხვადასხვა არეში. მათ დაადგინეს ორი ტიპის სპიკულის არსებობა და აღნიშნავენ: ა) I-სპიკულში მიმდინარეობს, როგორც აღმავალი ასევე დაღმავალი მოძრაობები, მათი სივრცის ხანგრძლივობაა 150-400წმ, მაქსიმალური სიჩქარეა 15-40კმ/წმ. ბ) II-სპიკული სივრცის ხანგრძლივობაა 50-150წმ, სიჩქარე 30-110კმ/წმ, შეიმჩნევა აღმავალი (დაღმავალი არა) მოძრაობები და ქრებიან მაქსიმალურ სიმაღლეებზე. II-სპიკულები უფრო მეტად გავრცელებულები არიან წყნარ მზეზე და კორონაში. I-სპიკულები უმთავრესად არიან აქტიურ არეებში.

მკვლევარებმა (Tian, et al., 2012) *Hinode* დაკვირვებების (დაკვირვებითი მასალის) ეფექტი სივრცული და დროითი შეღწევადობა გააუარესეს და დაიყვანეს დედამიწის ზედაპირიდან მიღებულ დაკვირვების მონაცემებამდე. ასეთი დამახინჯებული გამონასახები მათ შეისწავლეს ნახევრადავტომატური

ალგორითმით. მათ დაადგინეს, რომ ამ გაუარესებული გამონასახებებით მიღებული დაკვირვებითი შედეგები ახლოსაა კლასიკური კვლევებით მიღებულ ფიზიკურ პარამეტრებთან (მაგ: სიცოცხლის ხანგრძლივობა არის 5 წუთზე მეტი; სპიკულებში ნივთიერების აღმავალი სიჩქარეებია 25 კმ/წმ.). მათი აზრით, დედამიწის ზედაპირიდან დაკვირვებების შედარებით დაბალი სივრცული შეღწევადობა გავლენას ახდენს სპიკულების ფიზიკური პარამეტრების განსაზღვრის სიზუსტეზე და ადრინდელმა დაკვირვებებმა შეიძლება შეგვიყვანოს შეცდომაში.

II-სპიკულების სიცოცხლის ხანგრძლივობა მცირეა 10-150წმ, აღწევენ უფრო მაღალ სიჩქარეს 50-100კმ/წმ (De Pontieu et al. 2007a). დაკვირვებითი მონაცემების გაუარესებით ავტორებმა შეისწავლეს 52 სპიკული. აქედან ყველაზე კარგ გამოსახულებებიდან შეისწავლეს 23 სპიკულის სიჩქარე. გაუარესებულ მონაცემებიდან მიიღეს სიცოცხლის ხანგრძლივობა 340წ; სტანდარტული გადახრით $\sigma = 107$ წმ; მაქსიმალური სიჩქარე 25.8კმ/წმ, $\sigma = 11.4/წმ$ კმ/წმ; მაქსიმალური სიმაღლე 6.66 MM c $\sigma = 1.35$ MM. კარგ/ორიგინალურ გამოსახულებაში - სიცოცხლის ხანგრძლივობა 111წ; $\sigma = 54$ წმ; მაქსიმალური სიჩქარე 60კმ/წმ, $\sigma = 23.3$ კმ/წმ; მაქსიმალური სიმაღლე 5.51 MM c $\sigma = 1.7$ MM. სპიკულების ქვევით მოძრაობა განპირობებულია დაბალი გარჩევადობის გამო. ავტორები აღნიშნავენ, რომ მხოლოდ 2% სპიკულებში შეიმჩნევა ქვევით მოძრაობა. ეს წინააღდეგობაშია ადრეულ კვლევებთან. ამ შეუთავსებლობის მიზეზი უცნობია. ეს შესაძლებელია გამოიწვიოს Ca გაშვების ზოლის დაბალმა შესაძლებლობამ, ვიდრე H α ხაზში.

მკვლევარებმა (Sterling, et al. 2000) SOT და Hinode დაკვირვებებიდან შეისწავლეს სპიკულები მზის დისკზე და სპიკულების განვითარება მას შემდეგ რაც ისინი მზის დისკოს გასცდნენ და გარკვეულ სიმაღლეს მიაღწიეს. დაასკვნეს, რომ მზის კიდიდან ზემოთ მყოფი მრავალი სპიკული ფართოვდება და ქრება, იხლიჩებიან რამდენიმე 2 ან მეტ სპიკულებად და ქრებიან. არავითარი ქვედა მოძრაობები არ შეიმჩნევა II-სპიკულებში. მათი მაღალი სიჩქარეები (~100 კმ/წმ) ძნელი ასახსნელია. სპიკულების უმრავლესობა შეიძლება იყვნენ მაგნიტური ამონატყორცნები კორონაში და მათი მაღალი სიჩქარეების გამო შეიძლება ანალოგია გავატაროთ მზის პატარა ამოფრქვევებთან.

დედამიწის ზედაპირიდან დაკვირვებების მეთოდის სრულყოფამ და მაღალი გარჩევით მზის ოპტიკური ტელესკოპით (SOT; on the Hinode satellite; Tsuneta et al. 2008, Kosugi et al. 2007) დაკვირვებებმა ბოლო წლებში გააუმჯობესა სპიკულების შესწავლა. მათაც აღმოაჩინეს II-სპიკულები, რომლებიც აღწევენ დაახლოებით სიმაღლეს (5000კმ), ვიწროებია (200კმ), სიცოცხლის ხანგრძლივობაა (10-150წმ), სიჩქარეები (~50-150კმ/წმ), აღწევენ კორონას და თანდათანობით ქრებიან. მკვლევარები აკვირდებოდნენ 70 წთ. დაკვირვების განამვლობაში ყველაზე მაღალი სპიკულები აღწევდნენ 11 000 კმ; ეს სიმაღლე იგივედება H α I-სპიკულების

სიმაღლესთან (მაგ., Beckers 1968, 1972; Pasachoff et al., 1968, 2009). მკვლევარების (მაგ., De Pontieu et al., 2007b) მიერ აღწერილი იქნა ზემოთ აღნიშნული მოძრაობები. მათ დაასკვნეს, რომ ვერტიკალური მოძრაობები თითქმის ყველა II-სპიკულში არსებობს, ხოლო ქვევით მიმართული სიჩქარეები არ შეუმნევიან.

გარეატმოსფერული/კოსმოსური მაღალი გარჩევის მქონე დაკვირვებებიდან ძირითადად ისაზღვრება ქრომოსფერული სპიკულების შემდეგი ფიზიკური პარამეტრები (მაგ., Pereira, 2012, 2013): სიცოცხლის ხანგრძლივობა (lifetime); მაქსიმალური სიჩქარე (maximum velocity); მაქსიმალური სიგრძე (maximum length); მაქსიმალური სიმაღლე (maximum height); სიგანე (width); დახრილობა (inclination); და გრეხვითი ბრუნვა (transverse displacement).

ცხადია გარეატმოსფერული დაკვირვებების, როგორც სივრცული ასევე დროითი გარჩევადობის უნარი უკეთესია ვიდრე დედამიწის ზედაპირიდან დაკვირვებების, მაგრამ აუცილებლად აღსანიშნავია, რომ დედამიწის ზედაპირიდან დაკვირვებები ჩამოთვლილი ფიზიკური მახასიათებლების გარდა საშუალებას იძლევა შევისწავლოთ/განვსაზღვროთ შემდეგი ფიზიკური პარამეტრები: დოპლერის და ტანგენციალური სიჩქარეები; მათი რხევები; სპიკულების სივრცული მოძრაობები; ნახევარსიგანეები; მაგნიტოჰიდროდინამიკური (MGD) ტალღების გავრცელების ბუნება; სპიკულების მოდელები და სხვა. აქედან გამომდინარე თამამად შეიძლება განვაცხადოთ, რომ დედამიწის ზედაპირიდან დაკვირვებებს არ დაუკარგავს აქტუალობა.

§ 1.4. ქრომოსფერული სპიკულების მოდელები

მზის ქრომოსფერო მცირე სიმკვრივის გამო, გამჭირვალეა ყველაზე უფრო ოპტიკურ სპექტრში. ქრომოსფეროში, რომელიც მოთავსებულია ფოტოსფეროსა და შედარებით ცხელ კორონას შორის, სიმაღლის ზრდასთან ერთად ტემპერატურა იზრდება, ხოლო სიმკვრივე მცირდება. დამაგნიტებული გაზის დინამიკა დამოკიდებულია გაზის წნევაზე და მაგნიტურ წნევაზე/ველზე (Spruit, Roberts, 1983). მკვლევარები (Selhorst, et al., 2003) აღნიშნავენ, რომ მზის ატმოსფეროს

მოდელი ფოტოსფეროდან კორონამდე აგებული იქნა ძირითადად რადიო მონაცემზე დაყრდნობით, რომლებიც წინამორბედ მოდელებზეა დაფუძნებული. მაგალითად, 1. ფოტოსფეროს (Fontenla et al., 1993); 2. ქრომოსფეროს (Zirin, 1988; Zirin et al., 1991); 3. კორონის (Gabriel, 1992).

პირველი მოდელი აგებული იყო სფერულად სიმეტრიული, რაიმე სტრუქტურის გარეშე, ისეთი როგორიცაა სპიკულები. ამ მოდელში გარდამავალი ფენა იწყება 3500კმ და ზევით ფოტოსფეროდან, აქვს დაახლოებით 100კმ სიგანე. მეორე მოდელებში გარდამავალი ფენა დაახლოებით 1000კმ ზემოთაა ვიდრე ტიპიურ ცნობილ VAL და FAL მოდელებში. VAL მოდელში გარდამავალი ფენა იწყება 2300კმ და ზევით ფოტოსფეროდან. ეს შეუთავსებლობა შეიძლება გამოწვეული იქნეს ინფრაწითელში მეტალის ხაზების სიჭარბით (მაგ., Zhang и др. 2001). ავტორები აჩვენებენ, რომ შემოთავაზებულ FAL მოდელში ტემპერატურული მატება 2000კმ-ზე, რეალური არ არის, მაშინ როცა ქრომოსფეროს ეფექტური ტემპერატურა 1800კმ ქვევით მცირდება. მათ მიერ შემოთავაზებული მოდელი არ ეწინააღმდეგება კარლსონის და სხვების (Carlsson & Stein 1995) მოდელს. მკვლევარების შემოთავსებული მოდელი განსაზღვრავს ადგილსამყოფელს გარდამავალი ფენის 3500კმ სიმაღლეზე, და არა 2000კმ სიმაღლეზე, როგორც FAL მოდელშია.

ამ პრობლემის გადასაწყვეტად, უფრო ზუსტად ქრომოსფეროს მოდელის ასაგებად ავტორებმა (Selhorst, et al., 2003, 2005) ჩართეს სპიკულები. ისინი აღნიშნავენ, რომ დროის ნებისმიერ მომენტში სპიკულები იკავებენ მზის ზედაპირის 10%-ს. თითოეული სპიკულის ფიზიკური სიდიდეები (როგორცაა, სიმკვრივე, ტემპერატურა, სიმაღლე და დახრის კუთხე) მინიჭებული ქონდათ უწესრიგოდ. სპიკულის სიგანედ აიღეს 500კმ. სპიკულები მოდელირებული იქნა, როგორც ცილინდრული სტრუქტურის წარმონაქმნი მუდმივი სიმკვრივით და ტემპერატურით, რომელიც იწყება 1000კმ სიმაღლიდან მზის ფოტოსფეროდან.

ავტორები (Sumatsu A Y., Wang H.: 1992) ნაშრომში მიუთითებენ, რომ სპიკულებში მართლაც შეიმჩნევა ნივთიერების პერიოდული მოძრაობები. ისინი გამოთქვავენ მოსაზრებას, რომ სპიკულები წარმოიშვებიან იმპულსური აღმავალი ნივთიერებით და დარტყმითი ტალღებით, აქვე აღნიშნავენ, რომ სპიკულების ფუძე მოთავსებულია ქრომოსფეროს ქვემოთ კონვექციურ ზონაში.

დე პონტიე (de Pontieu, Haerendel, 1998) აკეთებს დასკვნას, რომ აღმავალმა ალფენის ტალღებმა, რომელთა სიხშირეებია 0.2 და 0.6 ჰერცი შეიძლება გამოიწვიოს ზედა ქრომოსფეროს პლაზმის აღმავალი დინებები, რომელიც მნიშვნელოვან ზეგავლენას მოახდენს კორონის გათბობაში. მოგვიანებით დე პონტიე (de Pontieu, 1999) აცხადებს, რომ აღმავალი ალფენის ტალღა სიხშირით 0.5 ჰერცი იწვევს იმპულსის გადატანას და ქრომოსფეროს პლაზმის გაცხელებას, რაც აყალიბებს სტრუქტურას, რომელსაც სპიკულთან აიგივებს. ამ სტრუქტურის მაქსიმალურ სიმაღლეა

დაახლოებით 6000კმ-ია, რომლის ტემპერატურა მოთავსებულია 8000-120000° K შუალედში და აღწევს მაქსიმალური სიჩქარეს ≈ 20 კმ/წმ-ს. ასეთი წარმონაქმნის სიცოცხლის ხანგრძლივობა ტალღის სიცოცხლის ხანგრძლივობასთან არის დაკავშირებული.

ჯეიმსი და სხვები (James, Erdelyi and De Pontieu, 2003, James, et al., 2006) თვლიან, რომ გარდამავალ ფენაში სპიკულების ფორმირება ხდება აღმავალი და დაღმავალი ტალღების ურთიერთმოქმედებით. ისინი აღნიშნავენ, რომ ნეიტრალური იონები იწვევს სითბური გრადიენტის ზრდას.

ჰაერენდელმა (Haerendel, 1992), შემოგვთავაზა სპიკულების მოდელი, იგი აღნიშნავს, რომ სპიკული ნარჩუნდება ალფენის ტალღებით გადატანილი მიზიდულობის ძალის საპირისპირო მიმართულების ვერტიკალური იმპულსებით (ნეიტრალური იონები). შემდეგმა თეორიულმა გამოთვლებმა (მაგ., De Pontieu & Haerendel, 1998) გააძლიერა ეს მოსაზრება.

ადრინდელი მონაცემებით ცნობილია ალფენის ტალღები გრძელი ტალღის სიგრძით და პერიოდით. ნაშრომში (J.-S. He, et al., 2009) ავტორებმა 4 სპიკულის შესწავლის მაგალითით ნახეს ალფენის ტალღები, უფრო მცირე ტალღის სიგრძით და მცირე პერიოდით. ეს შედეგი გვაძლევს ახალ მიმართულებას ტალღის წარმოშობის, მზის ქარის გავრცელებისა და კორონის გაცხელების ამოცანებში. მკვლევარები სპიკულების მოდელებს ორ ჯგუფად ყოფენ: 1. ალფენის ტალღები მაღალი სიხშირით (მაგ., Tu & Marsch 1997; Marsch & Tu 1997; Axford et al. 1999; Tu & Marsch 2001; He et al. 2008). 2. ალფენის ტალღები დაბალი სიხშირით (მაგ., Matthaeus et al. 1999; Hollweg 2000; Suzuki, 2005; Cranmer et al. 2007). ისინი თვლიან, რომ ალფენის ტალღები გავრცელებულია მთელ ქრომოსფეროში, სპიკულებში, და მათ როგორც შეაფასეს ამპლიტუდის რხევის სიჩქარე იმყოფება 10-25 კმ/წმ ფარგლებში და პერიოდი 100-500 წმ დიაპაზონში.

სპიკულთა უმრავლესობა უჩვენებს ორმაგ სტრუქტურას მათი ჩამოყალიბების დროს. პირველად ეს ორმაგობა შეამჩნია Tanaka (1974) და Dara et al. (1998). მაღალი გარჩევის უნარით მოპოვებულ დაკვირვებები Hinode აჩვენებს, რომ სპიკულებს აქვთ ორმაგი სტრუქტურა (მაგ., Suematsu et al. 2008). სპიკულების დინამიკის მეორე განსაკუთრებულობა არის - ნივთიერების მოძრაობის ორმხრივი მიმართულება (მაგ., Tsiropoula et al. 1994; Tziotziou et al. 2003, 2004), კვლევების ძირითადი ნაწილში აღნიშნულია ქვევით მიმართული მოძრაობები, მაშინ, როცა სპიკულის წვეროში სტრუქტურას აქვს ზედა და ქვედა მოძრაობების ურთიერთ შენაცვლება. მეორეს მხრივ Pasachoff et al. (2009) აღმოაჩინეს რეგულარული ურთიერთ-საწინააღმდეგო მოძრაობები უფრო დაბალ ფენებში. ამგვარად ორმაგი მიმართულების მოძრაობები, როგორც ჩანს სპიკულებისთვის ტიპიურია.

ავტორები (Juan Mart'inez-Sykora, 2011) განიხილავენ მზის ატმოსფეროს სამმაგ მოდელს, რომელიც მოიცავს კონვექციის ზედა ფენებს, კორონის დაბალ ფენებს და ჰორიზონტული მაგნიტური ველის წარმოქმნის არეებს.

ცნობილია ქრომოსფეროს მოდელი, რომელიც შედგება სხვადასხვა ტემპერატურის მქონე ცალკეული შრეებისაგან/არეებისაგან. ტერმინი “ცხელი” ქრომოსფერო წარმოიშვა ხილულ უბანში გამოსხივებული ემისიური ხაზების არსებობით, სადაც ქრომოსფერო მნიშვნელოვნად გამჭირვალეა. თუკი გავითვალისწინებთ იმას, რომ დაახლოებით 3000 ± 1000 კილომეტრის ქვემოთ სხვადასხვა ელემენტები ძლიერად უნდა ახდენდნენ ერთმანეთის ეკრანირებას, მაშინ უნდა ვივარაუდოთ, რომ “ცხელი” არეები ამ სიმაღლეებზე გარშემორტყმულნი უნდა იყოს “ცივი არეებით.” აქედან გამომდინარე ქრომოსფეროს არაერთგვაროვნების ერთ-ერთი მაჩვენებელია სპიკულები, რომლებიც დაიკვირვებიან $3000-10000$ კმ სიმაღლეებზე.

არსებობს ქრომოსფეროს ორ კომპონენტის რამდენიმე მოდელი (მაგ.; Томас, Атей, 1965, Крат, Крат, Правдюк, 1956, Крат, Соболев, 1957, 1958, Никольский, 1964, Woltjer, 1954, Гуляев, 1965), სადაც ნათქვამია, რომ ქრომოსფერო შესდგება „ცივი“ და „ცხელი“ ელემენტებისაგან, რომლებსაც სპიკულებთან აიგივებენ. ათეიმ (Athay, Menzel, 1956) და ტომასმა (Томас, Атей, 1965) ქრომოსფერო ორ ფენად გაყვეს (ორ კომპონენტისანი მოდელი): ქვედა ქრომოსფეროდ, სადაც სპიკულებს აქვრ დაბალი ტემპერატურა ($63\ 000^{\circ}\text{K}$) და ზედა ქრომოსფეროდ 4500 კმ ზემოთ, სადაც სპიკულებს ტემპერატურა $20\ 000^{\circ} - 300\ 000^{\circ}\text{K}$ აღწევს. ზირინი და დიტცი (Zirin, Dietz, 1963) აღნიშნავენ, რომ 1500 კმ სიმაღლეზე, სადაც ტემპერატურა დაახლოებით ტოლია $4\ 500-70\ 000^{\circ}\text{K}$ ქრომოსფერო იმყოფება ჰიდროდინამიკურ წონასწორობაში, ხოლო მის ზემოთ ტემპერატურა აღწევს $20\ 000 - 1\ 000\ 000^{\circ}\text{K}$.

დე იაგერი (De Jager, 1962) და ათეი (Athay, Menzel, 1956) თვლიან, რომ სპიკულების ტემპერატურა $T \geq 20\ 000^{\circ}\text{K}$, და 4000 კმ-ის ზემოთ ისინი გარშემორტყმული არის ცხელი კორონით, რომლის ტემპერატურაა $T \approx 10^6$ გრადუსი. ნიკოლსკი (Никольский, 1965), კრატი (Крат, Крат, Правдюк, 1956, Крат, Крат, 1961), ათეი და მენზელი (Athay, Menzel, 1956) აღნიშნავენ, რომ სპიკულები შიგა ფენებიდან $\text{H}\alpha$ -ხაზში ასხივებს დაბალი ტემპერატურის ($5\ 000^{\circ}\text{K}$) არეებიდან, ხოლო ჰელიუმი გამოსხივდება სპიკულების გარე შრეებიდან სადაც ტემპერატურა დაახლოებით $20\ 000^{\circ}$ გრადუსია. ნიკოლსკაიამ (Никольская К. И.: 1967, 1967) თავის გამოკვლევებით დაადგინა, რომ ჰელიუმი და წყალბადი შეიძლება გამოსხივდეს სპიკულების ერთიდაიგივე არეებიდან $T \leq 10\ 000^{\circ}\text{K}$ ტემპერატურაზე.

არსებობს სპიკულების წარმოშობის და განვითარების დინამიკის განსხვავებული მოდელები (მაგ., Hansteen, et al., 2006, De Pontieu et al., 2007, 2007c, De Wijn 2009, Rouppe van der Voort, et al., 2007, 2009, Heggland, et al., 2007, H. Skogsrud et al., 2014, Centeno, 2006, Trujillo Bueno et al. 2005, 2007, Philip G. Judge, 2012, Guerreiro, et al., 2013): მკვლევართა ერთი ჯგუფი თვლის, რომ მაგნიტურ მილში ნივთიერების მოძრაობა ქვემოთ ზემოთ წარმოქმნის სპიკულებს, მეორე ჯგუფის მოსაზრებით, სპიკულები წარმოიშვებიან სუპერგრანულაციის საზღვრებზე, იქ სადაც სხვადასხვა პოლარობის ველები ერთმანეთთან ახლოს არიან განლაგებული,

დანარჩენი მკვლევარები კი – სპიკულების წარმოშობას კორონული გაზის კონდენსაციას უკავშირებს. ავტორების (Alphonse, Sterling, 2000) მიერ შემოთავაზებულ მოდელში ლაპარაკია მზის ატმოსფეროში ტალღების გავრცელების შესაძლებლობაზე. მათი შეხედულებით ასეთმა ტალღებმა მზის შედარებით დაბალ ფენებში შეიძლება გამოიწვიოს ნივთიერების მოძრაობა მაგნიტურ მილში.

სპიკულების მაგნიტური ველის შესწავლას მნიშვნელოვანი როლი უკავია. ავტორები (Ajabshirizadeh, A, 2009, Centeno Rebecca, et al., 2010) მზის ატმოსფეროს წყნარ არეებში შეისწავლეს სპიკულების მაგნიტურ მახასიათებლები. მათ გააკეთეს მოდელირება ალფენის ტალღის გავრცელების მზის ატმოსფეროს ღია მაგნიტურ მილში. ამ ციფრულ მოდელში ალფენის ტალღა წარმოიშვება ფოტოსფერული გრანულების მოძრაობით. მათ იპოვეს სამი რეზონანსული სიხშირის, 1, 3 და 5 მეგაჰერცი. ასეთი მიდგომა ერთერთი ეფექტური მექანიზმია სპიკულების დინამიკის და კორონის გაცხელების ასახსნელად.

ნაშრომში (Filippov, Koutchmy, 2000, Loukitcheva, 2015) მოყვანილია მარტივი გეომეტრიული მოდელი, თუ რა მნიშვნელობა აქვს საშუალო სიმაღლეზე მაგნიტური ველის მოქმედებას ქრომოსფეროს სტრუქტურაზე. ქრომოსფერული სპიკულები, კერძოდ, მათში გავრცელებული მაგნიტოჰიდროდინამიკური ტალღები (MHD) და მათ მიერ ენერჯის ტრანსფორმაცია ქვედა ფენებიდან ზედა ფენებისაკენ, მზის ატმოსფეროში მიმდინარე პროცესების ახსნის ერთ-ერთ ძირითად პრობლემას წარმოადგენს (მაგ., Zhelyazkov, 2012; Taroyan, 2009; Zaqarashvili, at all., 2009;).

ნაშრომში (Zaqarashvili, 2011; Verth, at all., 2008, 2011; Erdélyi, James ,2004; Ebadi, at all., 2012) ლაპარაკია სპიკულებში ალფენის ტალღების გავრცელებაზე და მის დისიპაციაზე, გამახვილებულია ყურადღება ნეიტრალური იონების დაჯახებაზე გარდამავალ ფენაში. არსებობს უწყვეტი ურთიერთმოქმედება აღმავალ და დაღმავალ ტალღებს შორის, რაც ხელს უწყობს სითბური გრადიენტის ზრდას და ქმნის სპიკულებისათვის წარმოქმნისათვის ხელსაყრელ პირობებს. შემოთავაზებულია მოდელი (Tavabi, at, all., 2011, 2012, ANAN Tetsu, at all.,2012, Sterling A. C., 2000), რომელიც ითვალისწინებს მზის დისკოზე სპიკულების შემთხვევით განაწილებას. გამახვილებულია ყურადღება სივრცული გარჩევადობის ხარისხზე, იმისათვის, რომ ვილაპარაკოთ სპიკულების ამათუ იმ პარამეტრის სანდო გამოთვლაზე.

მკვლევარები (Ebadi, at all., 2011, Lei Ni et al., 2015) ყურადღებას ამახვილებენ სპიკულების ახალ ორმაგ მოდელზე, რამაც შეიძლება ახსნას სპიკულების წარმოშობის კვაზიპერიოდილი სტრუქტურა. ძირითადი შედეგი რიცხვითმა მოდელირებამ აჩვენა. მათი მოსაზრებით ძლიერმა საწყისმა იმპულსმა კორონის დაბალ ფენებში შეიძლება გამოიწვიოს ქრომოსფერული სპიკულების წარმოშობა.

ნაშრომში (Kukhianidze, Zaqarashvili, Khutsishvili, 2006, Zaqarashvili, Khutsishvili, et. al., 2007) ავტორები აღნიშნავენ, რომ სპიკულის მაგნიტურ მილში ვრცელდება კინკ-ტალღები, რომელთა ტალღის სიგრძე დაახლოებით 3400-4400კმ-ია, ხოლო პერიოდი იცვლება 40-50 წმ-ის შუალედში. გამოთქმულია ვარაუდი, რომ კინკ-ტალღები გენერირდება ფოტოსფეროში ჩაშვებულ მაგნიტური მილის ბოლოში გრანულაციის წარმონაქმნების შეჯახებით. ავტორების მიერ გამოთქმულია მოსაზრება, რომ კინკ-ტალღების სიგრძეები გრანულების დიამეტრის რიგისაა. აქვე მოყვანილია სპიკულის მოდელი, სადაც აღნიშნულია, რომ იგი წარმოადგენს გრძელ მაგნიტურ მილს, რომლის ერთი ბოლო ჩაშვებულია ფოტოსფეროში, ხოლო მეორე აღწევს კორონამდე. ეს მოდელი ახლოა რეალურ მოდელთან, მასზე დაყრდნობით შეიძლება ვილაპარაკოთ მაგალითად კორონის გაცხელების მექანიზმზე (მაგ., Mahajan et al. 2001),

ნაშრომში ბრაუნმა და სხვებმა (Braun, Lindoe, 1987) შეისწავლეს ქრომოსფეროს მოდელი: ფოტოსფეროს ზემოთ 1000 კილომეტრამდე ქრომოსფეროს სტრუქტურა არ გაირჩევა, მის ზემოთ დაიკვირვება მხოლოდ სპიკულები; სპიკულებს აქვთ ცილინდრული ფორმა, განაწილებული არიან უწყესრიგოდ და გარშემორტყმულები არიან კორონით; აქვე შემოთავაზებულია სპიკულების მოდელი.

კრატი და მისი კოლეგები (Крат, Правдюк, 1956, Крат, Соболев, 1957; Крат, Соболев, 1958) გამოთქვავენ მოსაზრებას, რომ სპიკულები შედგებიან სხვადასხვა ტიპის ბოჩკოებისაგან-ჰელიუმის, წყალბადის და სხვა მეტალების, რომლებსაც სხვადასხვა ტემპერატურა აქვთ. ნიკოლსკი (Никольский, 1964, 1965), კრატი (Крат, Соболев, 1957; Крат, Соболев, 1958) და ვოლტიერი (Woltjer L. A.: 1954) უშვებენ, რომ წყალბადი სპიკულების შიდა შედარებით ცივი ფენებიდან ($T \approx 6000^0$ K) გამოსხივდება, ხოლო ჰელიუმი გამოსხივდება შედარებით ცხელ ($T \approx 20000^0$ K) არეებიდან სპიკულების გარე ფენებიდან. აქვე ნიკოლსკი და კრატი (Никольский, 1965, Крат В. А., Крат, 1961) აღნიშნავენ, რომ ჰელიუმის ხაზში სპიკულები ჩანან უფრო მსხვილად და ერთმანეთისაგან უფრო გამოყოფილად. წყალბადის სპიკულების რაოდენობა ქრომოსფეროს სიმაღლის ზრდასთან ერთად შედარებით სწრაფად მცირდება ვიდრე ჰელიუმის. H α -სპიკულები ვრცელდებიან 10000 კილომეტრამდე, ხოლო D δ -სპიკულები აღწევენ უფრო მაღალ სიმაღლეს.

როგორც აღვნიშნეთ არსებობს სპიკულების განსხვავებული მოდელები: ბეკერსი (Beckers, 1968, 1972) თვლის, რომ მაგნიტურ მილში ნივთიერების მოძრაობა ქვემოდან ზემოთ წარმოქმნის სპიკულებს. პარკერი (Parker, 1964) სპიკულების წარმოშობას აკავშირებს ფოტოსფეროს ბგერითი ტალღის ქრომოსფეროს დარტყმითი ტალღაში გარდაქმნასთან. პიკელნერის (Пикельнер, 1970) და უშიდას (Ushida, 1967) მოსაზრებით სპიკულები წარმოიშვებიან სუპერგრანულაციის საზღვრებზე, იქ სადაც სხვადასხვა პოლარობის ველები ახლოს არიან განლაგებული. გროსმან (Grossmann-Docrth, Uexküll, 1971, 1973) სპიკულების წარმოშობას უკავშირებს კორონული გაზის კონდესაციას და სხვა.

მკვლევარების (Erdelyi and Fedun, 2007; Ajabshirizadeh, 2008, De Pontieu B., et al., 2007a, 2007b; Zaqarashvili and Skhirtladze, 2008, Zaqarashvili and Erdelvi, 2009, Murawski and Zaqarashvili, 2010, Murawski, Srivastava and Zaqarashvili, 2011, Ebadi, Zaqarashvili and Zhelyazkov, 2012 , Kukhianidze, Zaqarashvili, Khutsishvili, 2006, Zaqarashvili, Khutsishvili, et. al., 2007, Isabel Lipartito et al. 2014, Kulidzanishvili, 1978, 1980, 1983, Khutsishvili, 1986) გამოთქვავენ მოსაზრებას, რომ ქრომოსფეროს პლაზმა მაგნიტურ ველში ენერჯის ერთი ფორმიდან მეორე ფორმაში გარდაქმნით ფორმირდება.

ავტორები (De Pontieu., et al., 2004, Taroyan, Erdelyi, 2008, 2009) აღნიშნავენ, რომ სპიკულები მაგნიტური წარმონაქმნებია, რომელთა დიამეტრი დახლოებით 500კმ., ხოლო სიჩქარე ~ 20კმ/წმ. სპიკულების მიერ გადატანილი ნივთიერება 100-ჯერ მეტია, ვიდრე მზის ქარის კორონის დაბალ ფენებში. ისინი აღნიშნავენ, რომ დახრილ მაგნიტურ მილში „p-მოდა“ (p-modes) ქრომოსფეროდან ატარებს საკმარის ენერჯიას, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს ნივთიერების აღმავალი ნაკადი სპიკულების ფორმირებისათვის. მკვლევარების (Murawski, Zaqarashvili, 2010) მიერ შემოთავაზებულ რიცხვითმა მოდელირებამ აჩვენა, რომ ძლიერმა საწყისმა იმპულსმა კორონის დაბალ ფენებში შეიძლება მიგვიყვანოს ქრომოსფეროს ნივთიერების კვაზი პერიოდულ მატებასთან სპიკულების სახით. ისინი ასკვნავენ, რომ ორკომპონენტიანმა მოდელმა შეიძლება ახსნას დაკვირვებებით მიღებული I-სპიკულების სიჩქარეები, სიგანე და სიმაღლე. ასეთმა მოდელმა შეიძლება იწინასწარმეტყველოს სპიკულების 3-5 წუთიანი პერიოდული გამოჩენა.

ალჰონსეს და სხვების (Alphonse, Sterling, 2000; De Pontieu, Erdelyi, 2006; Zaqarashvili, and Erdelvi, 2009) მოდელები მზის ატმოსფეროში ტალღების გავრცელების შესაძლებლობაზეა დამყარებული. მათი შეხედულებით ასეთმა ტალღებმა მზის შედარებით დაბალ ფენებში შეიძლება გამოიწვიოს ნივთიერების მოძრაობა მაგნიტურ მილში. ასეთი მოდელების ძირითად ნაკლოვან მხარედ სანდო დაკვირვებითი მასალის არ არსებობა სახელდება. დაკვირვებითი მასალის მიღების სიძნელე კი სპიკულების მცირე კუთხური ზომებითა და მათი მცირე სიცოცხლის ხანგრძლივობით არის გაპირობებული. ნაშრომში (Wilhelm, 2000) განხილულია სპიკულების რხევები, კერძოდ, MHD ტალღების (ალფენის ტალღები) გავრცელებისა. ნაშრომში (Erdelyi and James, 2004) ლაპარაკია სპიკულებში ალფენის ტალღების გავრცელებაზე და მის დისიპაციაზე. გამახვილებულია ყურადღება ნეიტრალურ იონთა დაჯახებაზე. დადგინილია, რომ გარდამავალ ფენაში არსებობს უწყვეტი ურთიერთმოქმედება აღმავალ და დაღმავალ ტალღებს შორის, რაც ხელს უწყობს სითბური გრადიენტის ზრდას და ქმნის სპიკულების წარმოქმნისათვის ხელსაყრელ გარემოს.

ქრომოსფეროს ყოფენ სამ ნაწილად: ა) ქვედა ქრომოსფერო, რომელიც დაახლოებით მოთავსებულია მზის კიდიდან 1500 კმ სიმაღლის ფარგლებში; ამ არეში სპიკულები არ ჩანს. ბ) საშუალო ქრომოსფერო, რომელიც მოთავსებულია

1500-3000კმ ფარგლებში; სპიკულები ამ არეში წარმოიშვებიან, მაგრამ შეუძლებელია მათი დაკვირვება, რადგან მხედველობის სხივის გასწვრივ ისინი ერთმანეთს ფარავენ და მათი ერთმანეთისგან გარჩევა შეუძლებელია. გ) ზედა ქრომოსფერო, 3000კმ ზევით; აქ სპიკულებზე დაკვირვება შესაძლებელია. წყალბადის H α და ჰელიუმის D $_3$ -სპიკულებს აქვთ სხვადასხვა სახე. სპიკულები გამოიყურებიან უფრო დიდად და განცალკევებულად ჰელიუმის ხაზში. H H α -სპიკულების რაოდენობა სიმალლის მიხედვით მცირდება უფრო სწრაფად, ვიდრე D $_3$ -სპიკულებისა და ისინი საშუალოდ ვრცელდებიან დაახლოებით 8000 კმ სიმალემდე, ხოლო D $_3$ -სპიკულები აღწევენ უფრო მაღალ სიმალეებს 10 000 – 12 000 კმ და სხვა.

ქრომოსფერული სპიკული შეიძლება წარმოვიდგინოთ, როგორც ვიწრო მაგნიტური მილი, რომლის ერთი ბოლო ჩაშვებულია ფოტოსფეროში, ხოლო მეორე კორონამდე აღწევს. ასეთი ვიწრო მაგნიტური მილის დიამეტრი გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე მისი სიგრძე. სპიკულის შიგა/ცენტრალურ არედან გამოსხივდება H α ხაზი, ხოლო D $_3$ ხაზი გამოსხივდება მის გარე ფენებიდან, სადაც ტემპერატურა უფრო მაღალია, ვიდრე H α ხაზისა. აქვე აღვნიშნოთ, რომ ასეთ ვიწრო მაგნიტურ მილში მაგნიტოჰიდროდინამიკური ტალღების გავრცელების მექანიზმი კარგად არის ცნობილი (Edwin and Roberts, 1983; Roberts, 2000).

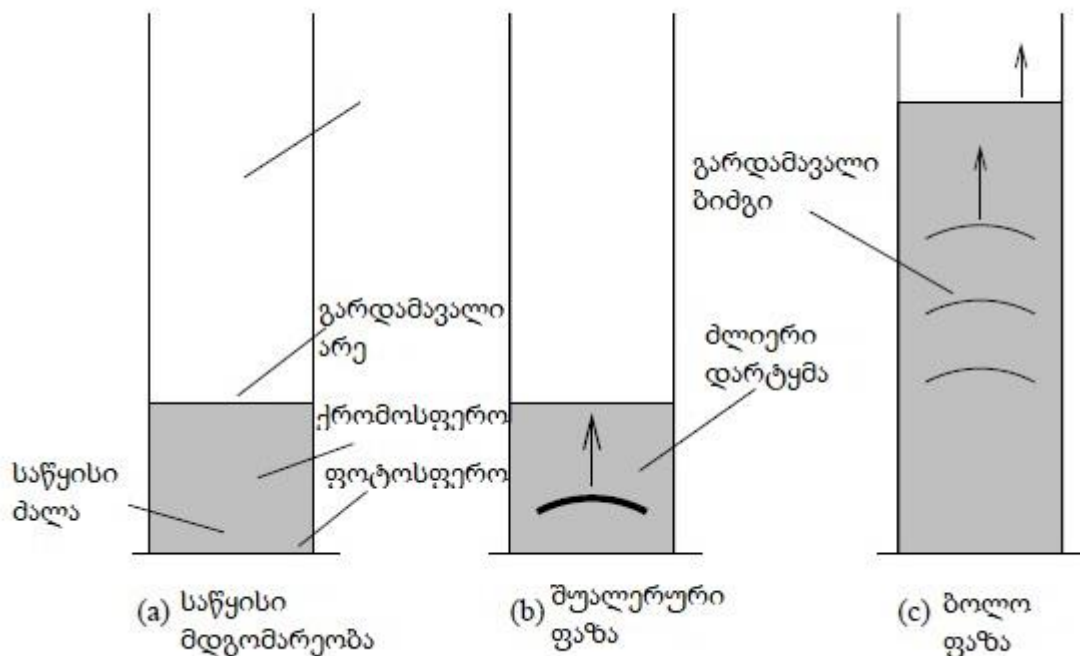
ერთ-ერთი ძირითადი პრობლემა, რომელიც ქრომოსფეროს არაერთგვაროვნების ახსნასთან არის დაკავშირებული, ჰელიუმის აღზნებაა. მართლაც: ა) წყალბადის შემდეგ, ჰელიუმი ქრომოსფეროს შემადგენლობის ძირითადი ელემენტია; ბ) ჰელიუმის ხაზები დაიკვირვება როგორც ქრომოსფეროში, ასევე პროტუბერანცებში; გ) იგი მოითხოვს სპეციფიკურ პირობებს გამოსხივებისათვის (ან მაღალ კინეტიკურ ტემპერატურას, ან გამოსხივების ძლიერ ველს). ჰელიუმი იმითაცაა საინტერესო, რომ პრაქტიკულად იგი ორი ელემენტისგან შედგება (პარაჰელიუმი და ორთოჰელიუმი).

ჰელიუმის აღზნების საკითხზე მრავალი ნაშრომი არსებობს, მათში აღნიშნულია, რომ ქვედა ქრომოსფეროში, ჰელიუმის არეებში, კინეტიკური ტემპერატურა დაახლოებით $9000^0 < T_e < 30000^0$. დასკვნა, რომელიც დღეისათვის დავის გარეშე შეიძლება მივიღოთ, არის ის, რომ ქრომოსფეროს მთლიანი არიდან არ შეიძლება წყალბადი და ჰელიუმი გამოსხივდებოდეს ერთსადაიმავე ინტენსივობით. ამის თვალსაჩინო მაგალითია ქრომოსფერული სპიკულები. ჰელიუმის და წყალბადის სპიკულებში მიმდინარე პროცესები განსხვავებულია ერთმანეთისაგან, კერძოდ დოპლერის სიჩქარეები და სხვა. მაგალითად დოპლერის სიჩქარეები D $_3$ - სპიკულებისათვის ქრომოსფეროს 4400-5800კმ. სიმალლეებზე დაახლოებით იცვლება ± 4 კმ/წმ. ფარგლებში, ხოლო უფრო ზემოთ ± 6 კმ/წმ ფარგლებში. იგივე სიმალლეზე H H α -სპიკულებისათვის კი ± 12 კმ/წმ-ის შუალედში. H α -სპიკულების დოპლერის სიჩქარეები დაახლოებით 2-3 ჯერ მეტია D $_3$ -სპიკულების სხივურ სიჩქარეებზე (Khutsishvili, 1986). მნიშვნელოვანია გაეცეს დასაბუთებული პასუხი, წარმოადგენენ თუ არა H α და D $_3$ --სპიკულები ერთსადაიგივე წარმონაქმნებს.

ნაშრომში (Khutsishvili 1995) ნაჩვენებია, რომ $H\alpha H$ და $D D_3$ -სპიკულები ერთსადაიგივე წარმონაქმნებია.

ცნობილია სპიკულების წარმოშობის მარტივი რამდენიმე მექანიზმი. ადრეც აღვნიშნეთ, რომ ვერტიკალურ მაგნიტურ მილში ძლიერ იმპულსს გადააქვს ქრომოსფერული ნვთიერება კორონაში (მაგ., Suematsu et al., 1982). სუმატსუმ და მისმა კოლეგებმა შეისწავლეს ეს შესაძლებლობა რიცხვითი მოდელირების საშუალებით. მათ დაუშვეს, რომ ძლიერი იმპულსი გამოწვეული იყო წნევის მოულოდნელი ზრდით ფოტოსფეროში ან ქვედა ქრომოსფეროში.

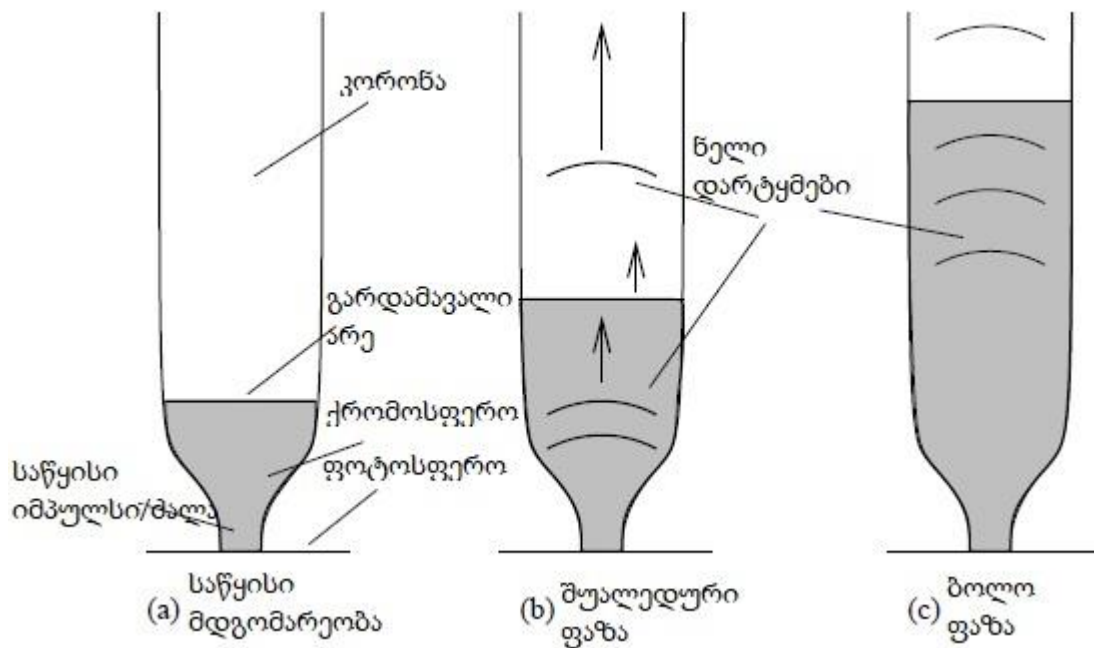
ავტორებმა განიხილეს მუდმივი უბრალო მყარი მაგნიტური მილი (ნახ.1a), სადაც სითბოგამტარიანობა არ გაითვალისწინეს. წნევის საწყისი იმპულსი/ძალა ახდენს შეშფოთების გენერირებას, რომელიც არაწრფივად ვრცელდება ზევით (ნახ.1 b).



ნახ.1. სპიკულის მოდელის პრინციპიალური სქემა, რომელიც წარმოიშობა ქვედა ქრომოსფეროში წნევის იმპულსით. დასაწყისში შეშფოთებული არე/ფენა იმყოფებუ დაახლოებით 2000კმ სიმაღლეზე. ფოტოსფეროს წნევის საწყისი იმპულსი იწვევს ძლიერ დარტყმას. ეს დარტყმა იწვევს ფენის ზევით მოძრაობას, რაც მოგვიანებით განვთარების/ჩამოყალიბების შემდეგ სპიკულებს გავს.

ეს დარტყმები შეიძლება განვიხილოთ როგორც ნელი MHD დარტყმები ფოტოსფეროს ზედა ან ქრომოსფეროს ქვედა პლაზმაში, სადაც მაგნიტური ველი საკმარისად ხისტია. აღნიშნული დარტყმები ურთიერთმოქმედებს არეებთან, უბიძგებს ზემოთ, და ასეთ მოძრავე ნივთიერებას აიგივებენ სპიკულებთან (ნახ.1c). ნახაზიდან ჩანს, რომ დამატებითი დარტყმები ჩნდება სპიკულის გარკვეულ სიმაღლეზე ასვლის შემდეგ.

(Hollweg 1982), მოდელიც (1.5D) წნევის მცირე იმპულსებით ქრომოსფეროს ქვედა ფენებიდან იწყება, მაგრამ მათ აქვთ მცირე ამპლიტუდით, ვიდრე ძლიერი იმპულსის დროს. გრანულები შეიძლება იყოს ეს მცირე იმპულსები. ავტორის მოდელი წარმოდგენილია ნახ. 2-ზე. წნევის იმპულსის ნაცვლად ამ მოდელირებისათვის გამოიყენა იმპულსი შეშფოთებული ქრომოსფეროსი (სიჩქარის 1 კმ/წმ გრანულებზე დაკვირვებული სიჩქარე). მილი ჩაშვებულია ფოტოსფეროში ან ქვედა ქრომოსფეროში. გამოსხივება და სითბოგამტარობა ამ მოდელში გამოყენებული არ იყო.



ნახ.2. სპიკულის მოდელის პრინციპიული სქემა. საწყისი ეტაპი (ბოთლის ფორმა) გამოსახულია ნახ. 2a. ძალა გამოიყენება ახლოს მილის ძირთან. ამას მიყვარათ საწყის ნელ დარტყმამდე, შემდეგ დარტყმები ვრცელდებიან, რაც იწვევს ნივთიერების აღმა სვლის გაგრძელებას. ნახ.2c, ეს ამოსული მატერია წარმოადგენს სპიკულს. სპიკულების განვითარების შემდეგ ეტაპზე ეს დარტყმები გრძელდება, მაგრამ დროთა განმავლობაში მცირდება.

შემდეგ მოდელში (Sterling et al. 1993), რომელიც წინა მოდელების მსგავსია, სპიკული შექმნილია ქრომოსფეროს შუა ფენის წნევის იმპულსით. მილი სიმაღლის მიხედვით ფართოვდება ქრომოსფეროში. ძირითადად დინამიკა მიმდინარეობს მაღალ ფენებში.

ადრეული კვლევები იყო ჰიდროდინამიკური (Alphonse, 2000). ეს ტალღები იწვევს სპიკულის ღერძის სიმეტრიულ გრძელვადს ვერტიკალური და აზიმუტალური მიმართულებით. აღფენის ტალღები არის შედეგი მაგნიტურ მილზე ფოტოსფერული გრანულაციის ზემოქმედებისა. გარდა ამისა მკვლევარების შემოთავაზება იმაზე მეტყველებს, რომ სპიკულები (მაგ., Livshits 1967; Pasacho et al. 1968) და H α -სპიკულები (მაგ., Cook et al. 1984) განიცდიან გრძელვად

მოდრაობებს/რხევებს მათი განვითარების დროს, რასაც ხსნიან ალფენის ტალღების ზემოქმედებით.

ცნობილია, რომ პირველებმა (Hollweg et al. 1982) გააკეთეს მოდელირება, რომელიც წოდებულია „1.5-d“ მოდელად, სადაც მოძრაობები ვერტიკალური (z) მიმართულებით და აზიმუტალური მიმართულებით ხდება. მაგრამ ისიც უნდა აღინიშნოს, რომ ორი მიმართულებით მოძრაობები ერთმანეთს ახშობენ და ქრება.

მიუხედავად იმისა, რომ ასეთი კვლევები არ ითვალისწინებდა რადიაციულ დანაკარგს, გარკვეულწილად ხსნიდა სპიკულების მოდელს. მაგალითად კვლევებში (Hollweg et al. 1982), მაღლა ამოსული ქრომოსფერული ნივთიერება იყო ძალიან ცივი სპიკულებისათვის ნივთიერების ადიაბატური გაფართოების გამო.

Cargill et al. (1997) ჩაატარეს ანალოგიური კვლევები, გამოსხივების და სითბოგამტარობის გარეშე. მათმა კვლევებმაც გამოავლინა ქრომოსფეროს მატერიის გამონატყორცნები, რომლებიც ძალიან ხანმოკლე იყო, ვიდრე სპიკულები.

Kudoh et al. (1999) განავრცეს ეს მოდელი, გამოიყენეს ალფენის იმპულსები, მაგრამ არ ჩართეს რადიაციული დანაკარგები და სითბოგამტარიანობა. მათ მოდელში სპიკული აღწევს 5000კმ სიმაღლეს, ტემპერატურაა $6000 \pm 10\,000$ K. მკვლევარების (Mariska et al., 1985) აზრით რადიაციული დანაკარგი ამცირებს ამ სიმაღლეს და ცვლის ტემპერატურას.

Haerendel (1992) and dePontieu et al. (1998) ანალიტიკური ანალიზის დახმარებით, შემოგვთავაზეს მოდელი, რომელიც დამყარებულია მაღალი სიხშირეებზე (პერიოდი 1-5 წმ) სადაც მექანიზმი არის ალფენის ტალღების ჩაქრობა იონო-ნეიტრალური დაჯახებებით. მათი მოდელის თანახმად დამყარებული ალფენის ტალღებზე, რომლებიც გენერირდებიან ქვედა ქრომოსფეროში, ქრებიან იონების და ნეიტრონების დაჯახებებით, როცა ისინი გადაადგილდებიან ზევით, ნაწილობრივ იონიზირებული საშუალო ქრომოსფეროში.

ახალმა (IRIS) დაკვირვებებმა (De Pontieu, et al., 2017a, 2017b, Martínez-Sykora, et al., 2017) გვიჩვენა, რომ სპიკული II-ის დიდი ნაწილი, რომლის საწყისი ტემპერატურა შედარებით დაბალია ($\sim 10^4$ K) იჭრებიან კორონაში სიჩქარით ~ 150 კმ/წმ. კორონაში აჭრილი სპიკული ცხელდება 10^4 K -ზე მეტად, ეს ვიწრო წარმონაქმნი ცივ ქრომოსფეროს და ცხელ კორონას ერთმანეთისგან გამოყოფს, მანამ სანამ იგი არ დაუბრუნდება საწყის ადგილს 5-10 წუთის შემდეგ. ისინი ასკვნიან, რომ: ქრომოსფეროს ნაკადებში მაგნიტური დამაბულობა და ნეიტრალური იონების ურთიერთქმედება დაკავშირებულია ალფენის ტალღებთან და კორონის გაცხელებასთან.

მკვლევარები (De Pontieu, et al., 2017a, 2017b, Martínez-Sykora, et al., 2017) გვთავაზობენ მაგნიტოჰიდროდინამიკურ (MHD) რიცხვითი მოდელს (2.5D), რაც ითვალისწინებს სპიკულის მსგავსი წარმონაქმნების არსებობას და მათ

ევოლუციას. ეს მოდელი ითვალისწინებს იმ რთულ ფიზიკურ პროცესებს, რომლებიც გადამწყვეტ როლს თამაშობენ სპიკულების წარმოქმნაში და ევოლუციაში: (i) პლაზმა ლოკალურ თერმოდინამიკურ წონასწორობაში არ იმყოფება; (ii) გამოსხივება ოპტიკურად განიერია და ემორჩილება გაბნევას; (iii) გაზი ნაწილობრივ იონიზირებულია; (iv) ზედა ქრომოსფეროში სითბოგამტარებლობის გათვალისწინება მნიშვნელოვანია.

ავტორები თვლიან, რომ (მაღალი გარჩევადობის დროს < 40 კმ, დაკვირვებების საფუძველზე) დიდმასშტაბიანი მაგნიტური ველის და ნეიტრალური იონების ურთიერთმოქმედება ნაწილობრივ იონიზირებულ ქრომოსფეროში კრიტიკულია სპიკულების წარმოსაშობად. მათ მიერ მიღებული შედეგები უჩვენებენ, რომ სპიკულის მაგვარი დინებები ხშირად წარმოიშვებიან ძლიერი მაგნიტური ველის არეში (იგი უმთავრესად ერთი პოლარობის არის). მართალია ადრინდელი რიცხვითი მოდელები ითვალისწინებდნენ ჩამოთვლილი პროცესების დიდ ნაწილს, მაგრამ ისინი არ ითვალისწინებდნენ სპიკული II-ს. ჩატარებული კვლევების ანალიზით ისინი თვლიან, რომ სპიკულის მაგვარი დინებები წარმოიშვებიან ძლიერი მაგნიტური ველის მახლობლობაში.

სპიკულების მაგვარი დინებები ფორმირებას სჭირდება რამდენიმე ეტაპი (ფოტოსფეროს კონვექციური მოძრაობები ამახინჯებს მაგნიტურ ველს). მაგალითად, ვერტიკალური დინებებისა და გრანულების სუსტი ჰორიზონტული ველების შერწყმის/ურთიერთქმედების გათვალისწინება. იმ არეში, სადაც პლაზმა ძლიერია (გაზის წნევა მეტია, ვიდრე მაგნიტური წნევა), ამ ურთიერთქმედებამ შეიძლება მიგვიყვანოს მაგნიტური ველის დამაბულობის ლოკალურ გაძლიერებამდე. ასეთი პირობები ალბათ ხშირია მზის ატმოსფეროში იმ არეებში, სადაც გამოხატულია ვერტიკალური მაგნიტური დინებები სიჭარბის კონცენტრაცია (რამდენიმე კილო გაუსი), ისეთი როგორცაა წყნარ ან აქტიურ არეებში. ისინი გარშემორტყმულნი არიან სუსტი, ძირითადად ჰორიზონტული დინებებით, რომლებიც უწყვეტად წარმოიშვებიან ჰორიზონტურ არეში მასშტაბით $\sim 10^3$ კმ.

შედეგად, წარმოიშვება ძლიერად ამობურცული/გამრუდებული ნაკადი მაგნიტური ველისა და შესამამისად დიდი დამაბულობის მაგნიტური ველის გავლენით ხდება ზედა ქრომოსფეროში გადაადგილება, სადაც მაგნიტური ველი დომინირებს პლაზმაზე ($\beta < 1$). თუმცა სუსტი ჰორიზონტული მაგნიტურ ველი საკამარისი არ არის, რომ გადაადგილოს ზევით ნაკადი. მხოლოდ ამბიპოლარულ დიფუზიას შეუძლია ზევით გადაადგილება. შემდეგ ამბიპოლარულმა დიფუზიამ შეიძლება გამოიწვიოს დისიპაცია მაგნიტური ენერჯის. ამბიპოლარული დიფუზია დამოკიდებულია იონ-ნეიტრალების დაჯახებებზე, მათ სიხშირეზე და მაგნიტური ველის დამაბულობაზე, რაც უმეტესად ყველაზე ცივ ფენებში ქრომოსფეროშია და მოქმედებს მაღალი მაგნიტური დამაბულობის წარმოშობაზე.

ბოლო ეტაპზე მაგნიტური დაძაბულობა თავისუფლდება ზედა ქრომოსფეროში, რაც იწვევს ძლიერ დინებებს (~100 კმ/წმ). შემდეგ მაგნიტური ველი სწორდება (ამობურცულობა იკარგება). გასწორებული ველი კუმშავს პლაზმას ჩაკეტილ არეში, რაც წნევის გრადიენტის საფუძველზე იწვევს ძლიერ აჩქარებას ქრომოსფეროს პლაზმის მაღალ სიჩქარეებამდე, მაგნიტური ველის გასწვრივ. ასეთივე ეფექტს ალფენის ტალღებიც იწვევენ, რომლებიც სწრაფად ვრცელდებიან ზევით, ისევე როგორც ელექტრონები.

ავტორები (De Pontieu, et al., 2017a, 2017b, Martínez-Sykora, et al., 2017) აღნიშნავენ, რომ მათ მიერ წარმოდგენილი მოდელი აერთიანებს: ძლიერ დინებებს სიჩქარეებით (100 კმ/წმ), რომლებიც აღწევენ 10 000 კმ სიმაღლეს 2-10 წუთის განმავლობაში. ამ მოდელში ნაჩვენებია, რომ სპიკულები არსებობენ/გვხვდებიან ძლიერი დინებების პერიფერიებში. მათი კვლევები უჩვენებენ სპიკულების წარმოშობის უფრო მეტ სიხშირეს, ვიდრე ადრინდელი/კლასიკური კვლევები. ადრინდელმა 3D მოდელმა ვერ გაითვალისწინა ბევრი დაკვირვებითი ხასიათი სპიკულებისა. თუმცა ადრინდელი 3D და ზემოთ ხსენებული ავტორების შემოთავაზებული 2.5D მოდელი შედეგებზე დიდ გავლენას არ ახდენენ (De Pontieu, et al., 2017a, 2017b, Martínez-Sykora, et al., 2017).

ისინი ასკვნიან, რომ ძლიერი ელექტრონული იმპულსების გენერაციით და ალფენის ტალღების გავრცელებით, სპიკულებმა შესაძლებელია გავლენა მოახდინოს კორონაზე. თუ დავუშვებთ, რომ ყველა მიმართულებით სპიკულს აქვს 300 კმ სიგანე, მაშინ მას კორონაში გადააქვს დაახლოებით 10^{10} კგ ცხელი პლაზმა. ძლიერი წყვეტილი ელექტრო დინებები, რომელებიც მოძრავი სპიკულის პლაზმაში არის ინტეგრირებული კორონაში გავრცელდება. ეს დინებები გაიზნევა ამბიპოლარულ დიფუზიაში ქრომოსფეროს ან სპიკულის პლაზმაში, რასაც მივყავართ 10^{18} ჯ გაცხელებამდე სპიკულის სიცოცხლის განმავლობაში. ამბიპოლარულ დიფუზია ეფექტური არ არის კორონალური ტემპერატურისათვის, მაგრამ მაინც ენიჭება გარკვეული როლი კორონის გაცხელებაში. ალფენის ტალღებს აქვთ დამატებითი როლი კორონის გაცხელებაში. ამ ტალღებს ავტორების მიერ შემოთავაზებულ მოდელში მივყავართ განივ ტალღებთან, რომლებიც იწვევენ ტალღების გრეხვას და გაღუნვას. ამ ტალღებისთვის საშუალო ამპლიტუდა არის 20 კმ/წმ და მკვლევარები აფასებენ დინების საშუალო ენერგიას, რომელიც დაახლოებით ტოლია ~103- 300 ვტ ქვედა კორონაში.

აღსანიშნავია, რომ არცერთი არსებული მოდელი სრულყოფილად ვერ ხნის სპიკულებში მიმდინარე ფიზიკურ პროცესებს. თეორიული და ექსპერიმენტული კვლევების შედეგად მიღებული დასკვნები ერთმანეთთან კარგ თანხვედრაში არ არის (მაგ., Taroyan, Erdelyi, 2009, De Pontieu, Erdelyi, 2006, Sterling, 2000, Suematsu, et al., 1995, De Pontieu, et al., 2017a, 2017b, Martínez-Sykora, et al., 2017).

§ 1.5. სპიკულები - მზის კორონის გაცხელების მექანიზმი

მზის ფიზიკაში ერთერთი საინტერესო/საიდუმლო არის, ის რომ მზის გარეატმოსფეროში, მაგალითად კორონაში, უფრო მაღალი ტემპერატურაა ვიდრე მის ზედაპირზე. კორონის გაცხელების მექანიზმზე შემოთავაზებული მოდელებს შორის-განხილულია სპიკულების მოდელები, რომლებიც მოქცეულია პლაზმის ვიწრო მილში და ათბობენ მზის ზედა ფენებს (მაგ.. Athay & Holzer 1982, Budnik, F, 1998, Athay, 2000, Alphonse C. 2010, Michael L. Goodman, 2014). ათეული წლების მანძილზე უშვებდნენ, რომ სპიკულები აგზავნიდნენ კორონაში მაღალ ტემპერატურას და ნივთიერებას. თუმცა 1980 წლის დაკვირვებებმა და მისმა ანალიზმა პირველებმა, ვინც შეისწავლეს გრეხვითი ტალღების გავრცელება სპიკულებში, წარმოშვა განსხვავებული მოსაზრება. მათი მიერ ნაპოვნი ტალღის სიგრძე იყო ~3500 კმ, ტალღის პერიოდი, როგორც შეაფასეს, მოქცეული იყო 35–70 წმ დიაპაზონში. ისინი ამტკიცებდნენ, რომ ამ ტალღებმა შეიძლება წაიღოს ფოტოსფერული ენერგია კორონაში, რაც გააცხელებს კორონას.

მნიშვნელოვანია მზის ნატიფი სტრუქტურის დინამიკის იმ ფიზიკურ პროცესებთან კავშირის გამოვლენა, რომელიც მიმდინარეობს მზის ატმოსფეროს ქვედა და მის ზევით მდებარე ფენებში. ისეთი აქტუალური პრობლემები, როგორცაა ქრომოსფეროდან კორონაში გარდამავალი ფენის ნივთიერების და ენერჯის ბალანსი, მზის ქარის გენერაცია და სხვა, მომავალში მოითხოვს საფუძვლიან შესწავლას. კორონის გაცხელების მექანიზმის შესწავლა, რომლის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან წყაროს წარმოადგენს ქრომოსფერული სპიკულები, კერძოდ მასში გავრცელებული მაგნიტოჰიდროდინამიკური ტალღები (MHD) და მათ მიერ ენერჯის ტრანსფორმაცია, ქვედა ფენებიდან ზედა ფენებისაკენ, მზის ატმოსფეროში მიმდინარე პროცესების ახსნის ერთ-ერთ ძირითად პრობლემას წარმოადგენს.

ჯერ კიდევ (Edlén 1943) გამოითქვეს მოსაზრება, რომ კორონის ტემპერატურაა 10^6 K. კორონის გაცხელების მექანიზმის ახსნა ერთერთი ძირითადი პრობლემაა თანამედროვე ფიზიკაში. ძირითად პრობლემას შეადგენს იმის დაზუსტება, თუ რა

მექანიზმით გადაიტანება ენერგია კორონაში და როგორ ხდება მისი გავრცელება კორონაში.

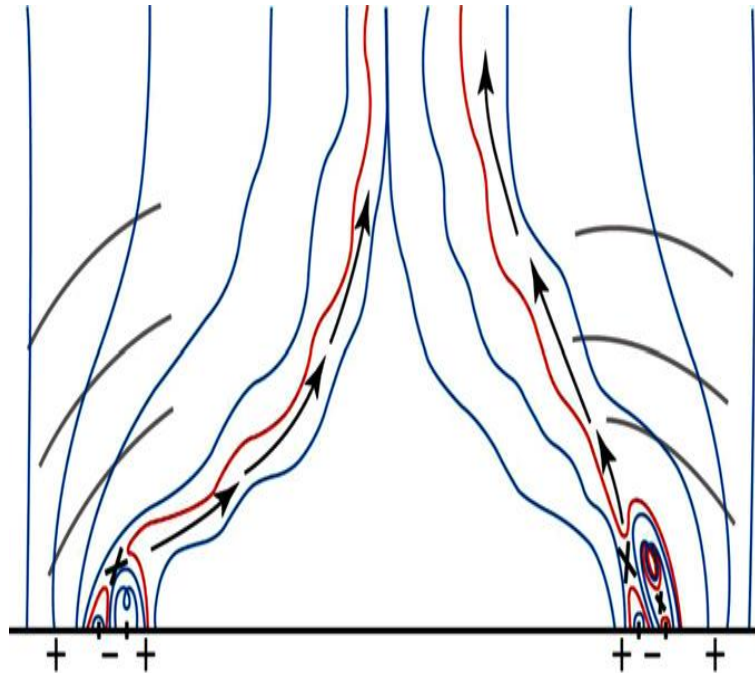
მნიშვნელოვან ამოცანას წარმოადგენს კორონის გაცხელებისა და მზის ქარის ნაწილაკების აჩქარების მექანიზმების შესწავლა. განსაკუთრებულ ყურადღებას იმსახურებს ფოტოსფეროდან კორონისაკენ მიმართული ალფენის ტალღების გავრცელების ბუნების შესწავლა. ბოლო წლებში მკვლევართა ერთი ჯგუფი ამტკიცებს, რომ კორონული სპექტრული ხაზების არასითბური გაფართოვება სიმაღლის ზრდასთან ერთად მცირდება, ხოლო მეორე ჯგუფი მივიდა საპირისპირო დასკვნამდე (De Moortel, 2004, De Pontieu, 2003, Beekers, 1972, Hasan, 1999, Hollweg, 1981, 1982, Trujillo Bueno, 2005). აღნიშნული პრობლემის შესწავლას დიდი მნიშვნელობა აქვს, თუმცა არსებობს ამ პროცესის ახსნის რამდენიმე მოდელი.

ათეი (Athay, 2000) თვლის, რომ ქრომოსფეროსა და კორონის გაცხელების მექანიზმი დაკავშირებულია სპიკულბთან. კობანოვი (Kobanov, Makarchik, 2001) აღწერს ექსპერიმენტს, რომელშიც ნაჩვენებია თუ როგორ ფორმულირდება სიჩქარის რხევების ვერტიკალური გრადიენტი. ავტორები (Ronald, Moore, et al. 2011, De Pontieu et al. 2007b, Soler, et al., 2012) გამოთქვავენ მოსაზრებებს, რომ I და II სპიკულბებში დაკვირვებული Alfven ტალღებს გადააქვთ საკმარისი ენერგია (7×10^5 ერგი/სმ.წმ.), გვთავაზობენ ამ ტალღების წარმოშობის მოდელს. მკვლევარები აღნიშნავენ, რომ II-სპიკულბი ქრომოსფერული პლაზმის გამონატყორცნებია, რომლებიც მოთავსებულნი არიან წყნარ არეში მაგნიტურ მილში, კორონის ხვრელებში და აქტიური არის მიდამოს გარშემო. ისინი არიან X-ray მსგავსად, II-სპიკულბი გამოიტყორცნებიან მაგნიტური არედან, რომლებიც ვრცელდებიან კორონის მაღალ ფენებში, მაგრამ არიან გაცილებით პატარები და უფრო მრავალნი. სპიკულბის სიგანეა $\sim 10^8$ სმ, და აღწევენ სიმაღლეს ფოტოსფეროს ზევით $5-10 \times 10^8$ სმ, მათი ტემპერატურა მაღალია ვიდრე $T \sim 10^4$ K. II-სპიკულბი - უფრო ვიწროა, უფრო მოკლეა, 3-4-ჯერ სწრაფებია ვიდრე კლასიკური I-სპიკულბი. მიწიერი დაკვირვებების ანალიზის საფუძველზე დე პონტიე (De Pontieu et al 2007a) სტერლინგი და სხვა (2010) აღნიშნავენ, რომ პოლარულ არეებში II-სპიკულბი უფრო მრავალრიცხოვანია ვიდრე I-სპიკულბი.

ენერგიის ნაკადი, რომელიც აუცილებელია კორონის გასაცხელებლად უნდა იყოს 3×10^5 ერგი/ სმ² წმ (Withbroe & Noyes 1977). არსებობს კორონის გაცხელების 2 მექანიზმი. I - ალფენის ტალღები (მაგ., Uchida & Kaburaki 1974; Wentzel 1974) და II „nanoflare“ მოდელი (მაგ., Parker 1988).

Hinode რენტგენულმა დაკვირვებების ანალიზმა აჩვენა, რომ კორონის გაცხელება ძირითადად ხდება II-სპიკულბით და მასში გავრცელებული ალფენის ტალღებით (მაგ., Ronald, Moore, et al., 2011, Soler, et al., 2015). ამ გზით კორონაში გადატანილი მექანიკური ენერგიის რაოდენობაა $\sim 7 \times 10^5$ ერგი/ სმ² წმ. ავტორები

მიუთითებენ, რომ გრანულები EBs-მთავარი მამოძრავებელია, რომელიც წარმოქმნის და ინარჩუნებს მთლიან ჰელიოსფეროს. ისინი აღნიშნავენ, რომ II-სპიკულები და მათში გავრცელებული ალფენის ტალღები წარმოადგენენ ენერჯის საკმარის რაოდენობის გადამტანს კორონის გასაცხელებლად და არიან მამოძრავებელი მზის ქარისა. მათი მოსაზრება სქემატიურად გამოხატულია ნახ.3 - ზე.



ნახ.3. II-სპიკულები და მათში გავრცელებული ალფენის ტალღების სქემა.

ნახაზზე განიერი შავი ლაქები ფოტოსფერული ზედაპირია. +, -, მაგნიტური პოლარობის მაჩვენებელია. შავი Xs სიმბოლურად მაგნიტური გადაერთებებია. II-სპიკულებს შავი ისრები წარმოადგენენ. წითელი ხაზები დაკავშირებულები არიან მაგნიტური ველის ძალხაზებთან. ლურჯი ხაზები ველის ხაზებია, რომლებსაც ჯერ კიდევ მონაწილეობა არ მიუღიათ მაგნიტურ გადაერთებებში. ნაცრისფერი ხაზები წარმოადგენენ MHD ტალღებს

ცნობილ კვლევებშიც (მაგ., James, et al., 2006, Mahajan, et al., 2001, Pietarila, et al., 2011) მკვლევარები თვლიან, რომ კორონის გაცხელების მექანიზმის შესწავლა, რომლის ერთ-ერთ მნიშვნელოვან წყაროს წარმოადგენს ქრომოსფერული სპიკულები (Athay, 2000), კერძოდ, მათში გავრცელებული მაგნიტოჰიდროდინამიკური ტალღები (MHD) და მათ მიერ ენერჯის ტრანსფორმაცია, ქვედა ფენებიდან ზედა ფენებისაკენ, მზის ატმოსფეროში მიმდინარე პროცესების ახსნის ერთ-ერთ ძირითად პრობლემას წარმოადგენს. იგივე მოსაზრება გატარებული ნაშრომებში (Athay, 2000, James, et ai., 2003, Erdélyi and James, 2004, Taroyan, Erd'elyi, 2009, Rouppe van der Voort *et al.*, 2015), სადაც

მითითებულია, რომ მზის ზედა ატმოსფეროში მაგნიტური მიღები წარმოადგენენ ენერჯის გადატანის ძირითად არხებს, რომლებიც თავის მხრივ მოქმედებს მზის გამოსხივებაზე. ამ მიმართულებით მაგნიტურ ველს აქვს გადამწყვეტი მნიშვნელობა გარე ატმოსფეროს გაცხელების თვალსაზრისით. აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ბოლომდე არ არის ახსნილი, თუ რა გავლენას ახდენს მაგნიტური ველი მზეზე მიმდინარე ფიზიკურ პროცესებზე.

ცნობილია კორონის გაცხელების განსხვავებული მექანიზმი (მაგ., Mahajan, et al., 2002b, 2003, 2001), სადაც ყურადღება გამახვილებულია პლაზმის და მაგნიტური ველის ურთიერთ-ბმაზე, რითაც განისაზღვრება მრავალ-მასშტაბიანი სტრუქტურების მახასიათებლები. შემოთავაზებულია, რომ ეს სტრუქტურები წარმოადგენენ მზის ზედაპირთან ახლოს მყოფი პლაზმური დინებების / ტრანზიენტული ჯეტების პირველსაწყისს, რომლებითაც შემდგომში შეიძლება აიხსნას კორონის გაცხელების პრობლემა. მკვლევარების (Ohsaki, et al., 2001, Mahajan, et al., 2002a) მიერ კორონაში არსებული საკმარისად სწრაფი პლაზმური დინებების გათვალისწინებით შემუშავებულია კორონალური სტრუქტურის რღვევის / ამოფრქვევის მოდელები. სწრაფ პლაზმურ დინებებს შეუძლიათ გაარღვიოს მაგნიტური ველი, შეუწყოს ხელი კორონალური ხვრელების - CH ჩამოყალიბებას და სხვა.

მიუხედავად ინფორმაციის დიდი რაოდენობისა, რომელიც მიღებულია, დედამიწიდან და კოსმოსური აპარატურით, ჩვენ მხოლოდ მცირედ წავიწიეთ ამოფრქვევების პროგნოზირებისა და აქტივობის ცენტრის წარმოშობის მიმართულებით. მზის წარმონაქმნების გაჩენის წინა პერიოდის და მათში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების ახსნის ძირითადი ამოცანა ჯერ კიდევ გადაუჭრელი რჩება. კერძოდ, თუ რას წარმოადგენს ამოფრქვევებში ენერჯის დაგროვებისა და გამოთავისუფლების მექანიზმი? ეს უკანასკნელი, მიუთითებს ამოფრქვევების ფიზიკური პროცესებისა და მზის აქტივობის ბუნების შესახებ არასრულფასოვან წარმოდგენაზე. გარდა ამისა, დიდი ამოფრქვევების დროს გამოსხივების სიმძლავრე კოლოსალურია, თუმცა, დედამიწაზე ოპტიკურ დიაპაზონში გამოსხივებული ენერჯია წარმოადგენს მთელი გამოსხივების პროცენტული ნაწილის მხოლოდ მეასედს. ხოლო შორეულ ულტრაიისფერ, რენტგენულ და რადიო დიაპაზონში იგი იზრდება ათიდან ათეულ ათასამდე, ასევე იზრდება მაღალი სიხშირის დამუხტული ნაწილაკების ნაკადებიც. ამ სახითაა დაკავშირებული რადიაცია ამოფრქვევების გეოეფექტურობასთან.

დაკვირვებები გვიჩვენებს, რომ ამოფრქვევები კანონზომიერი პროცესია აქტიური არის განვითარებაში. ამიტომ საჭიროა, გამოვავლინოთ მიზეზ-შედეგობრივი კავშირი ამოფრქვევის წარმოშობასა და აქტიური არეებში ამოფრქვევის წინა მდგომარეობას შორის. აღნიშნული პრობლემის გადასაწყვეტად მოითხოვება აქტიურ არეებში ფოტოსფერულ და ქრომოსფერულ წარმონაქმნებზე კომპლექსური დაკვირვებები.

სპიკულების ფორმირების და კორონის გაცხელების მექანიზმის ასახსნელად მკვლევარებმა (Takuya Saito, et al., 2001, Morton et al., 2014) შეისწავლეს ალფენისა და ნელი ტალღები, რომლებიც ვრცელდებიან სპიკულის მაგნიტურ მილში. ავტორებმა შეისწავლეს ნელი და ალფენის ტალღების გავრცელების მექანიზმი და დაასკვნეს, რომ ალფენის ტალღას შეუძლია გადაიტანოს კორონის გასაცხელებლად საკმარისი ენერჯია, ხოლო ნელ ტალღებს არა. II-სპიკულების მიერ კორონის გაცხელების მექანიზმზე მიუთითებენ (Petrulia, et al., 2014). ოპტიკური ტელესკოპით Hinode's დაკვირვებებით ავტორებმა (Juan Mart'inez-Sykora, et al., 2013) გააკეთეს მოდელირება მზის ატმოსფეროსი. მათ დაასკვნეს, რომ II-სპიკულებს შეუძლიათ მოამარაგონ კორონა ცხელი პლაზმით.

სპიკულები ქრომოსფეროს ნატიფი სტრუქტურის უმნიშვნელოვანეს ელემენტთაგანია. სპიკულები მაგნიტური წარმონაქმნებია (მაგ., De Pontieu, et al., 2004, 2007a, 2007b), რომელთა დიამეტრი დახლოებით 500კმ, მოძრაობენ ფოტოსფეროდან ზემოთ ~20-30კმ/წმ სიჩქარით და სპიკულების მიერ გადატანილი ნივთიერება 100-ჯერ მეტია, ვიდრე მზის ქარით, კორონის დაბალ ფენებში. ამ უკანასკნელში, ძლიერმა საწყისმა იმპულსმა შეიძლება მიგვიყვანოს ქრომოსფეროს ნივთიერების კვაზი-პერიოდულ მატებასთან სპიკულების სახით (მაგ., Murawski, et al., 2010).

ჰელიოსფეროსა და მისი მაგნიტური ველის შესახებ ჩვენმა წარმოდგენებმა უკანასკნელ პერიოდში დიდი ევოლუცია განიცადა. U, „Ulysses“-სთან ერთად, მზისა და ჰელიოსფეროს მრავალმა ახალმა დაკვირვებამ უზრუნველყო მზის გლობალური სურათის ჩაოყალიბება. აღმოჩნდა, რომ დოპლერის სიგანე ზოგადად იზრდება სიმალლის ზრდასთან ერთად, რაც ახსნილ იქნა, როგორც შიგნიდან გარეთ გავრცელებადი, ჩაუქრობელი ალფენის ტალღების არსებობის თაობაზე მინიშნებით. თუმცა, დამკვირვებელთა ერთი ნაწილი სიმალლის ზრდის კვალობაზე ხაზების სიგანის კლებაზე მინიშნებდა (მაგ., Harrison et al., 2003; O'Shea et al., 2002, 2005). ამგვარად, უაღრესად მნიშვნელოვანი ხდება კორონული სპექტრული ხაზების სიგანის ყოფაქცევის დაკვირვების აუცილებლობა. უნდა აღინიშნოს, რომ კორონის გაცხელებისა და მზის ქარის წარმოქმნის მექანიზმის გასარკვევად, ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ფაქტორს კორონის ელექტრონული ტემპერატურის გაზომვაც წარმოადგენს.

თავი 2. დაკვირვებითი მასალის მიღება-დამუშავების თანამედროვე მეთოდთა

§ 2.1 აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის დიდი 53 სმ-იანი დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის აღწერა

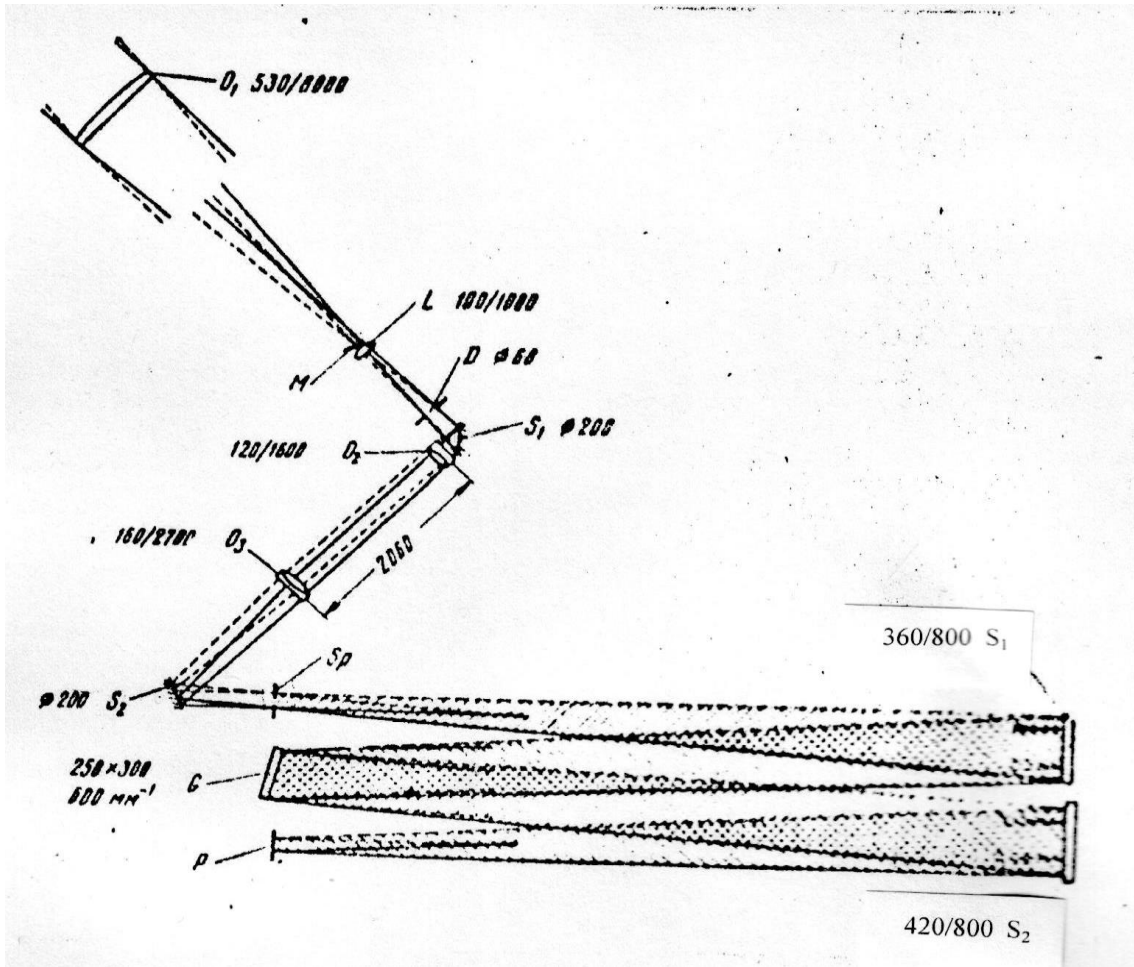
მიუხედავად მრავალწლიანი კვლევებისა, ბევრი რამაა უცნობი მზის წარმონაქმნების სტრუქტურისა და დინამიკის შესახებ. როგორც აღვნიშნეთ, განსაკუთრებით საყურადღებოა ის ფაქტი, რომ ჯერ კიდევ გაურკვეველია სპიკულების წარმოშობის, გაქრობის, რხევის მექანიზმი, მათი მოდელების საბოლოო სახე და სხვა. მრავალი დაკვირვებითი მონაცემები, ისეთები, როგორიცაა სიმაღლის ზრდასთან ერთად სიმკვრივისა და სიკაშკაშის გრადიენტების კლება, დოპლერის სიჩქარეებისა და კინეტიკური ტემპერატურის ზრდა, ქრომოსფეროს სპექტრში იონებისა და ატომების გამოსხივების ხაზების ერთდროული არსებობა და მრავალი სხვა დღემდე საბოლოოდ არ არის შესწავლილი. მაგნიტურ ველში ქრომოსფერული პლაზმის დამახასიათებელი თვისებები, ენერჯის ტრანსფორმირება ერთი სახიდან მეორეში, რხევებისა და ტალღების წარმოშობა და მათი გავრცელება სპიკულებში, სპიკულების რხევების თეორიული მოდელირება და სხვა საკითხები საჭიროებს შემდგომ მრავალმხრივ კვლევას (Wilhelm, 2000; Erdélyi, et al., 2004; Carter, et al., 2007; Sterling, 2000; Taroyan et al., 2009).

ქრომოსფერული სპიკულების დინამიკის შესწავლა დამზერით ასპექტში მოითხოვს სხვადასხვა ხაზებში სპექტროგრამების სერიის მიღებას, რომელიც ასახავს მათ მდგომარეობას ქრომოსფეროს სხვადასხვა სიმაღლეზე, სპიკულების არსებობის მთელი დროის მანძილზე. დაკვირვების მიმდინარეობისას ქრომოსფეროს სიმაღლის ზუსტ დადგენას და მის დაფიქსირებას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება სპიკულების ფიზიკური პარამეტრების განსაზღვრის მიზნით. მაგალითად, დაკვირვების მიმდინარეობისას ქრომოსფეროს სიმაღლის განსაზღვრის სიზუსტე შეიძლება დაირღვეს: დედამიწის ატმოსფეროს არაერთგვაროვნების შედეგად, რომელშიც გაივლის მზის სხივი, რაც სპექტროგრაფის ჭვრიტზე მზის გამონასახის გადაადგილებასა და მის დეფორმაციას იწვევს; ასეთი დამახინჯება დამოკიდებულია კორონოგრაფის

ობიექტისა და ატმოსფერულ ფლუქტუაციას შორის მანძილზე; ცხადია, დამახინჯების სიდიდე დამოკიდებულია ატმოსფერული არაერთგავროვნების ზომებზე და მრავალ სხვა გარემოებაზე. გარდა ამისა დაკვირვებისათვის ამორჩეული ქრომოსფეროს სიმაღლე შეიძლება შეიცვალოს ტელესკოპის საათიერი მექანიზმის არათანმიმდევრული მუშაობის გამო და დაკვირვების მომენტში გარემოს/ატმოსფეროს სტაბილურობის არაერთგვაროვნების გამო, მაგალითად ქარის და სხვა გარემოებების გამო.

ქრომოსფეროზე დაკვირვების ტექნიკისა და მეთოდის სრულყოფის ყოველ ეტაპზე, მზის სრული დაბნელებების პირველი დაკვირვებებიდან დაწყებული, თანამედროვე გარეატმოსფერული დაკვირვებების და დიდი დაბნელებისგარეშე კორონოგრაფების შექმნამის შემდეგ, მიღებული იქნა გარკვეული დამზერითი შედეგები სპიკულებზე. სპიკულების კვლევაში პროგრესი ძირითადად განისაზღვრება დაკვირვების ტექნიკითა და მეთოდით.

გ. მ. ნიკოლსკისა და ა. ა. საზანოვის მიერ (1966) შემუშავებულმა დიდ დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის შექმნამ, რომლის ობიექტივის დიამეტრია 530 მმ, საფოკუსო მანძილი 800 მმ, მთელი რიგი ახალი დამზერითი მონაცემების მიღების საშუალება მოგვცა. დიდი სივრცული და სპექტრული გარჩევის მქონე დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის შექმნამ გაცილებით წინ წასწია ქრომოსფეროსა და კორონაში არსებული წარმონაქმნების სტრუქტურის და დინამიკის შესწავლა.



ნახ.4. დიდი დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის და სპექტროგრაფის ოპტიკური სქემა

ნახ. 4.-ზე მოცემულია დიდი დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის ოპტიკური სქემა. კორონოგრაფის მთავარი ობიექტივაა -O₁; იგი ბრტყელ-ამოზნექილი ლინზაა, რომლის დიამეტრია 530 სანტიმეტრია და $\lambda=5300\text{\AA}$ ტალღის სიგრძეზე აქვს 8 მეტრი. საფოკუსო მანძილი. ხელოვნურ მთვარეზე-M (რკინის ბრტყელი მრგვალი სარკე) გამოსახულებას აგებს მთავარი ობიექტივი. ხელოვნური მთვარის უკან მოთავსებულია ველის ლინზა-L L (F =1000მმ, D D=100მმ), რომელიც 70 მილიმეტრიანი მთავარი ობიექტივის გამონასახს აგებს ლიოს D დიაფრაგმაზე, რომლის დიამეტრია 68მმ-ია. დიაფრაგმის უკან, ტელესკოპის ღერძისა და დახრილობის ღერძების გადაკვეთაზე მოთავსებულია S₁ ბრტყელი სარკე, რომელიც პოლარული ღერძისაკენ მიმართავს სინათლის კონას. მთვარის გამოსახულების, გადამწყობი ოპტიკური სისტემის O₂ (D=120mm, F=1600mm), O₃ (D=160mm, F=2700mm) და S₂ (D=200mm) დიაგონალური სარკის მეშვეობით ტელესკოპის სპექტროგრაფის ჭვრიტის სიბრტყეში, გადიდებით 1.7-ჯერ, იგება მზის გამოსახულება დიამეტრით 125მმ.

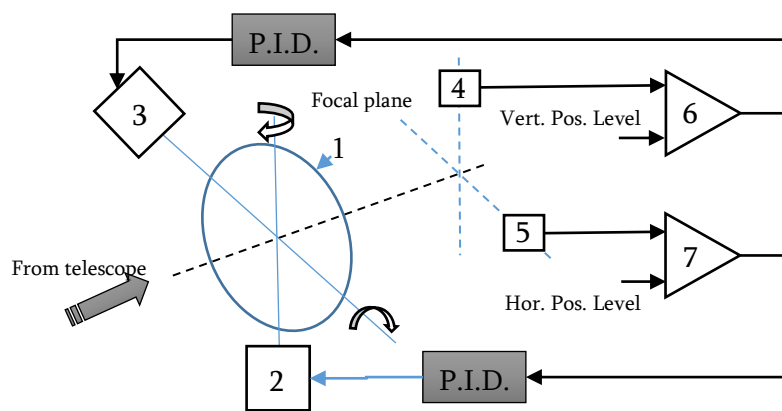
ტელესკოპის ებერტა-ფასტის სისტემის სპექტროგრაფი, აღჭურვილია 230მმ×250მმ ფართის დიფრაქციული მესერით. მესერის 1მმ დამტრიხულია 600 შტრიხით,

რომელსაც ხილულ არეში მაქსიმალური კონცენტრაცია აქვს სპექტრის მე-2-ე რიგში. ინსტრუმენტის გარჩევის უნარი სპექტროგრაფის ფოკალურ სიბრტყეში 25 ხაზია ერთ მილიმეტრში. მეორე რიგში სპექტროგრაფის გარჩევის უნარია-0.04 Å /მმ. კორონოგრაფს აქვს ლენტური გადაცემა. ტელესკოპის მზის მიმართ უწყვეტი მიყოლების ხანგრძლივობაა 2^h 40^m, რაც ცის თაღზე რკალის 30⁰-ს შეესაბამება. სპექტროგრაფის კოლიმატორის სარკის დიამეტრია 360 მმ, საფოკუსო მანძილი 8 მ, ხოლო კამერის სარკის D=420 mm, F=8 m, შესაბამისად.

როგორც აღვნიშნეთ დაკვირვებითი მასალის მიღებისას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ქრომოსფეროს სიმაღლის განსაზღვრას და მის დაფიქსირებას. წინააღმდეგ შემთხვევაში თუ დაკვირვების მიმდინარეონისას დაირღვა დაკვირვებისათვის წინასწარ ამორჩეული სიმაღლე, სიმაღლის შეცვლა დაარღვევს და გამოუსედაგარს გახდის მისაღებ და შესაბამისად, დასამუშავებელ დროულ სერიას (სპიკულების სპექტროგრამები), რასაც დიდი მნიშვნელობა აქვს მზის წარმონაქმნებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების პარამეტრების განსაზღვრაში. მაგალითად: დაუშვათ დაკვირვების მიმდინარეონისას დაირღვა დაკვირვებისათვის წინასწარ ამორჩეული სიმაღლე (თუმცა ამ კადრის დამუშავებისას, დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანების განსაზღვრის სიზუსტე ისეთვე იქნება), მაშინ განსხვავებულ სიმაღლეზე განსაზღვრული/გამოთვლილი დოპლერის სიჩქარის სიდიდე განსხვავებული იქნება წინასწარ ამორჩეული სიმაღლეზე გამოთვლილ დოპლერის სიჩქარესთან, რაც გამოიწვევს მცდარ დაკვირვებითი მონაცემების დაგროვებას. (სწორედ ამის გამო, ასეთი კადრები დამუშავებას არ ექვემდებარება, და დასამუშავებლად ვირჩევთ ისეთ დროულ სერიებს, რომლებშიც განსხვავებულ სიმაღლეებზე მიღებული კადრების რაოდენობა იქნება მინიმალური და მათი სერიიდან უგულვებელყოფა/ამოღება არ გამოიწვევს სერიაში კადრებს შორის დიდ დროულ წყვეტას; აქ სასურველია მეორე ფაქტი: მინიმუმამდე დავიყვანოთ მიღებულ დასამუშავებელ სერიაში წინასწარ დაგეგმილ სიმაღლიდან, განსხვავებულ სიმაღლეებზე მიღებული კადრების რიცხვი. ამ უკანასკნელში კი, წარმატებით დაგვეხმარება ქვემოთ აღწერილი ფოტოგიდი).

ამ სიძნელის დასაძლევად ტელესკოპზე ჩამონტაჟებულია ჩვენს მიერ (ვ. კახიანი და სხვები) დამზადებული მზის ფოტოგიდი, რაც მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს დაკვირვებისათვის შერჩეულ ქრომოსფეროს სიმაღლის ფიქსირებას (ნახ. 5). გიდი შედგება ორი ლერძის ირგვლივ მბრუნავი ბრტყელ-პარალელური ოპტიკური მინის ფირფიტისგან (1), რომლის მოტრიალება ხდება რევერსული მიკროძრავებით (2 და 3). ტელესკოპის ფოკალურ სიბრტყეში შესაბამის ადგილას განთავსებულია ორი სინათლის მიმღები - მზის ჰორიზონტალური (5) და ვერტიკალური (4) წანაცვლებების დასაფიქსირებლად. შესაბამისი გაძლიერებისა

და ფილტრაციის შემდეგ (6 და 7), ხდება მიმღებებზე დაფიქსირებული სიგნალების შედარება წინასწად დაყენებულ ვერტიკალურ (Vert. Pos. Level) და ჰორიზონტალურ (Hor. Pos. Level) მდებარეობების პოზიციების დონეებთან, რის შედეგადაც გამოიმუშავება შეცდომის სიგნალები. ეს სიგნალები მიეწოდება შესაბამის გარდამქნელებს (P.I.D. - პროპორციულ-ინტეგრალურ-დიფერენციალური მართვის პროცესორი), რომლებიც ქმნიან ძრავების (2) და (3) მართვის შესაბამის ძაბვებს, რაც მიეწოდება რევერსულ მიკროძრავებს (2 და 3). მიკროძრავები შემოაბრუნებენ ბრტყელ-პარალელური ოპტიკური მინის ფირფიტას შესაბამისი კუთხით, რაც განაპირობებს სპექტროგრაფის ჭვრიტეზე მზის გამონახახის, კერძოდ დაკვირვების წინ წინასწარ შერჩეული ქრომოფეროს სიმაღლის ფიქსაციას.



ნახ.5. მზის ფოტოგიდის ფუნქციონალური სქემა

კორონოგრაფის კონსტრუქცია ტელესკოპში გაბნეული სინათლის მინიმუმამდე დაყვანას ითვალისწინებს. გაბნეული სინათლის ინტენსივობა დამოკიდებულია როგორც ატმოსფეროში მიმდინარე პროცესებზე, ასევე კორონოგრაფის ოპტიკის ხარისხსა და სისუფთავეზე. პირველ ხელშემშლელ პირობებს ნაწილობრივ შეიძლება გვერდი ავუაროთ, თუ დაკვირვებებს წარვმართავთ ცის მაღალი გამჭვირვალობისას ეგრეთ წოდებულ ”კორონულ” დღეებში. რაც შეეხება კორონოგრაფის ოპტიკის სისუფთავე მკაცრად დაცული უნდა იყოს. ლაბორატორიულმა გამოკვლევამ (Kulidzanishvili V. I.: 1980) აჩვენა, რომ აბსოლუტური ასტროფიზიკურ ობსერვატორიაში არსებული დიდ დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის და სპექტროგრაფის ოპტიკური ნაწილის ხარისხი კარგია.

ობიექტივის ნაკაწრის და ცენტრალური ბლიკის (ქარხნული დეფექტი) მიერ გამოწვეული გაბნეული სინათლის ინტენსივობის შესამცირებლად გამოყენებულ იქნა სპეციალური შედგენილი დიაფრაგმა, რომელიც ახდენს ეკრანირებას, როგორც ობიექტივის ცენტრალური ბლიკის ასევე ნაკაწრის მიერ გამოწვეულ დამახინჯების. აღსანიშნავია, რომ ობიექტივზე (საერთოდ კორონოგრაფის მთელ ოპტიკაზე) მტვრის ნაწილაკების სიმრავლეზეა დამოკიდებული გაბნეული

სინათლის ინტენსივობა, ამიტომ იგი ყოველ დაკვირვების წინ უნდა იწმინდებოდეს. გარდა ამისა სპექტროგრაფის შავი ოთახი დაცული უნდა იყოს გარედან „შეპარული“ სინათლისაგან და მტვრისგან.

ფოტო.1-ზე გვამოსახულია აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის დიდი დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის სურათი, რომელიც ამ ტიპის ტელესკოპებში შეყვანილია მსოფლიოს უდიდეს 10 ტელესკოპის სიაში.



ფოტო.1. აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის დიდი დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფი. მთავარი ობიექტივი (დიამეტრი 53სმ.) მოთავსებულია კორონოგრაფის ფერმის წვეროში. კორონოგრაფის უკან ჩანს თაღი/ სახურავი , რომელიც მოძრაობს რკინის ლიანდაგებზე წინ და უკან. დამკვირვებელი იმყოფება ქვედა სართულზე.

§2.2 დამზერითი მასალის მიღების თანამედროვე მეთოდის აღწერა დიდი დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის დახმარებით

ექვგარეშეა ის, რომ სპიკულებზე მეტი ინფორმაციის მოსაპოვებლად აუცილებელია მათზე უწყვეტი დაკვირვებები ქრომოსფეროს, როგორც ერთი და იგივე, ასევე სხვადასხვა სიმაღლეზე დროის ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში. სხვადასხვა სიმაღლეზე დაკვირვება თუკი მყისიერად მოხდება, ანუ დროის მოკლე ინტერვალში, მით უფრო მნიშვნელოვანი და ფასეული იქნება ასეთი დაკვირვებითი სპექტროგრამების სერია. ქრომოსფერულ სპიკულებში მიმდინარე ფიზიკური მახასიათებლების შესასწავლად აუცილებელია, როგორც დაკვირვებისადმი, ასევე კვლევის მეთოდისადმი განახლებული/თანამედროვე მიდგომა.

დაკვირვების განახლებული/თანამედროვე მეთოდიკა ჩვენ შემთხვევაში გულისხმობს: (1) დიდ დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფებით მზის ატმოსფეროს, როგორც ერთი და იგივე, ასევე სხვადასხვა სიმაღლეზე დაკვირვებებს მუხტკავშირიანი A Apogee CCD U9000 (პიკსელების რაოდენობა 3056 x 3056; პიკსელების ზომა 12 x 12 მიკრონი; გამოსახულების ზომა 36.7 x 36.7mm; გამოსახულების დიაგონალი 51.9 მმ;) სინათლის მიმღების გამოყენებით დროის ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში. მაგალითად, ქრომოსფეროს 4000 კმ - ს, 7000 - ს ან 8000 კმ - ს სიმაღლეზე (სიმაღლის არჩევა მკვლევარზეა დამოკიდებული). ამკარაა, რომ სამივე სიმაღლეზე ერთდროული დაკვირვება არ მოხერხდება, თუმცა გამორიცხული არ არის. დაკვირვების ხანგრძლივობა უნდა აღემატებოდეს სპიკულის სიცოცხლის ხანგრძლივობას. დაკვირვების ხანგრძლივობა, რაც მეტი იქნება, მით სანდო იქნება დაკვირვებითი მასალის დამუშავებიდან სპიკულების მიღებული ფიზიკური პარამეტრები; (2) ქრომოსფეროს სპიკულებზე ერთდროული დაკვირვებების ჩატარებას ორ სხვადასხვა სპექტრულ ხაზში, მაგალითად წყალბადისა და ჰელიუმის ან ჰელიუმისა და იონიზირებულ კალციუმის ხაზებში და სხვა; (3) დაზუსტებას მზის ატმოსფეროს სხვადასხვა სიმაღლის განსაზღვრის/დაფიქსირების მექანიზმის, რასაც დიდი მნიშვნელობა ენიჭება ღირებული დაკვირვებითი მასალის მიღებისათვის; (4) თვითეული სპექტროგრამის ექსპოზიციის რაც შეიძლება მცირე ხანგრძლივობას; (5) სპექტროგრამებს შორის ერთმანეთზე მიყოლებული დროის ინტერვალის, მიღებას დროის რაც შეიძლება მცირე შუალადებით; (6) დაზუსტებას სპიკულების გაიგივების მეთოდის; (7) დაკვირვებითი მასალა დამუშავების თანამედროვე მეთოდების გამოყენებას; (8)

დაკვირვების ხანგრძლივობის გაზრდას და სხვა. ეს ყველაფერი აბასთუმნის ობსერვატორიაში ხორციელდება.

რაც შეეხება (2) ეტაპის წარმატებით განხორციელებას, იგი დაკავშირებულია მთელ რიგ სიძნელებთან. მაგალითად, კორონოგრაფის კონსტრუქცია საშუალებას არ იძლევა ერთდროულად დავაკვირდეთ ორ განსხვავებული ტალღის სიგრძის სპექტრულ ხაზს ტელესკოპის ქრომატიზმის გამო. მიუხედავად ასეთი დაბრკოლებისა ამ პრობლემის გადალახვა შეიძლება, კერძოდ კორონოგრაფის სპექტრიგრაფის მუშაობის პრინციპის გასაუმჯობესებლად უნდა ჩატარდეს შესაბამისი სამუშაოები. ასეთი ტიპის სამუშაოების ჩატარება ობსერვატორიაში დაგეგმილი გვაქვს.

დაკვირვების დაწყების წინ აუცილებელია სპექტროგრაფის შესასვლელზე მზის გამონასახის (მზის გამონასახის დიამეტრია 125 მმ), ხელოვნური მთვარის გამონასახის (ხელოვნური მთვარის რკალის სიგრძე ტოლია 6 სმ) და სპექტროგრაფის ჭვრიტე (ჭვრიტის რკალის სიგრძე ტოლია 6 სმ - ს, რაც შეესაბამება 60° - იან სიმრუდის რკალს) გავხადოთ კონცენტრული. ცხადია მზის გამონასახის, მთვარის გამონასახის და ხელოვნური მთვარის ცენტრები ერთმანეთს დაემთხვევა. ამ მომენტში ფოკალურ სიბრტყეში დამკვირვებელი ხედავს მზის კიდიდან წამოსული გამოსხივების სპექტრს. სპეციალური მოწყობილობით დამკვირვებელს საშუალება აქვს ჭვრიტე ($H\alpha$ სპიკულებზე დაკვირვებისას ჭვრიტე გახსნილია 0.3 - 0.4 მმ) გადაადგილოს მზის კიდიდან ზემოთ კორონისაკენ (ან პირიქით კორონიდან ქრომოფეროსკენ) დაკვირვებისათვის სასურველ სიმაღლეზე. ჩვენ დაკვირვებებში, რომელზედაც ქვემოთ ვიმსჯელებთ სპექტროგრაფის ჭვრიტეში სინათლის სხივი შედის მზის კიდიდან 4 500კმ - ის და 7 500 კმ - ის სიმაღლიდან.

დიდ დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფით დაკვირვების მიმდინარეობისას მუხტკავშირიანი სინათლის მიმღების A Apogee CCD U9000 წინ ვათავსებთ რამდენიმე სინათლის ფილტრისაგან შედგენილი, ობსერვატორიაში დამზადებული ($H\alpha$ ხაზისათვის ფილტრისა და მისი კომპონენტების შესაბამისი შებურვის კანონის დადგენა, რაც ექსპერიმენტული თვალსაზრისით საკმაოდ რთულად გადასაწყვეტ ამოცანას წარმოადგენდა, განხორციელდა ვ. ყულიჯანიშვილის მიერ, რაც შემდეგ ა. მაიერმა პრაქტიკულად დაამზადა/განახორციელა; მოგვიანებით ანალოგიური დაკვირვებების წარმოებისათვის D_3 ხაზში იქმნება მეორე შუქფილტრი, რომელიც დამზადებულია ე. ხუციშვილისა და ა.მაიერის მიერ), სპეციალური შუქფილტრს, რომელიც ატარებს, როგორც წითელ $H\alpha$ ხაზს სპექტროგრაფის მეორე რიგიდან, ასევე საყრდენ 4371 Å ხაზს სპექტროგრაფის მესამე რიგიდან. ანალოგიურად მუხტკავშირიანი სინათლის მიმღების წინ ვათავსებთ ობსერვატორიაში დამზადებული, სპეციალური ფილტრს, რომელიც ატარებს, როგორც D_3 ხაზს სპექტროგრაფის მეორე/მესამე რიგიდან, ასევე საყრდენ 4410 Å ხაზს სპექტროგრაფის მესამე/მეოთხე რიგიდან. ცხადია დაკვირვება თუ ტარდება

წითელ ხაზში, დამკვირვებელი მუხტკავშირიანი სინათლის მიმღების წინ ათავსებს $H\alpha$ - ფილტრს. დაკვირვება თუ ტარდება მწვანე ხაზში, დამკვირვებელი მუხტკავშირიანი სინათლის მიმღების წინ ათავსებს D_3 - ფილტრს.

სპექტროგრაფის ჭვრიტეზე მზის გამონასახის მასშტაბი ტოლია – 16" ერთ მილიმეტრზე.

როგორც ზემოთ იქნა აღნიშნული, ჩვენ ვგეგმავთ შევისწავლოთ მზის ზედა ატმოსფეროს ცალკეულ ფენაში, როგორც სპექტრული ხაზების გაგანიერების პრობლემა, ასევე ამ ემისიური ხაზების ნახევარსიგანეთა და დოპლერისეულ წანაცვლებათა ცვალებადობა დროისა და სიმაღლის მიხედვით. ამ თვალსაზრისით, ქრომოსფეროსა და კორონის ხვადასხვა უბნებისათვის და განსხვავებული სიმაღლეებისათვის განვახორციელებთ ამ ფენების ნატიფი სტრუქტურის ემისიური ხაზების სერიული CCD სპექტროსკოპიული დაკვირვებები. აქვე, შევნიშნოთ ისიც, რომ მზის ქრომოსფეროსა და კორონის ნატიფი სტრუქტურის დაკვირვებითი მასალის მიღება ცალკეულ ემისიურ სპექტრულ ხაზში, როგორც წესი, დიდ სირთულეებთან არის დაკავშირებული; ამიტომ მაღალი სივრცული გარჩევის მქონე დაკვირვებითი მასალის მისაღებად ინსტრუმენტებს ჩვეულებრივ ისეთ დასაკვირვებელ ადგილებში განალაგებენ, სადაც მათი გარჩევის ზღვარი რკალის ერთ სეკუნდს ან მასზე ნაკლებს შეადგენს. სწორედ ამის გამო, ქრომოსფეროსა და კორონის ნატიფი სტრუქტურის დედამიწისეული დაკვირვებების წარმოება, მაღალი სივრცული გარჩევით, შესაძლებელია მსოფლიოს მხოლოდ რამდენიმე ობსერვატორიიდან. კერძოდ, ესენია: კლაიმაქსი, მედონი, პიკ-დიუ-მიდი, კისლოვოდსკი, აბასთუმანი და საკრამენტო პიკი და სხვა. აღნიშნულიდან გამომდინარე, ჩვენი კარგი ასტროკლიმატისა და ჩვენთან დიდი ზომის, 53-სმ-იანი კორონოგრაფის არსებობის გათვალისწინებით, ჩვენ გვეძლევა უნიკალური შანსი, ჩავერთოთ მზის ქრომოსფეროსა და კორონის ნატიფი სტრუქტურის მაღალი სივრცული გარჩევის მქონე დაკვირვებითი მასალის მონიტორინგში და შესაბამისად, ჩვენი მოკრძალებული წვლილი შევიტანოთ კორონის გათბობის მექანიზმისა და მზის ქარის აჩქარების პრობლემის გადაწყვეტის ესოდენ მნიშვნელოვან საქმეში.

ამ თვალსაზრისით, აბასთუმნის ასტროფიზიკურ ობსერვატორიაში დიდი დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფისათვის შევიმუშავეთ ისეთი დაკვირვებითი პროგრამა, რომელიც საშუალებას მოგვცემს მივიღოთ სრულიად ახალი ტიპის მონაცემები. კერძოდ კი, წინათ შემუშავებული დაკვირვების მეთოდიკა (Kulijanishvili, 1980; Kulijanishvili & Khutsishvili, 1981), რომელიც ეფუძნებოდა ფოტოგრაფიული კამერის-ადაპტერისა და ფოტოფირების გამოყენებას, ძირეულად შევცვალეთ. ამჟამად გამოვიყენეთ მუხტკავშირიანი Apogee CCD U9000

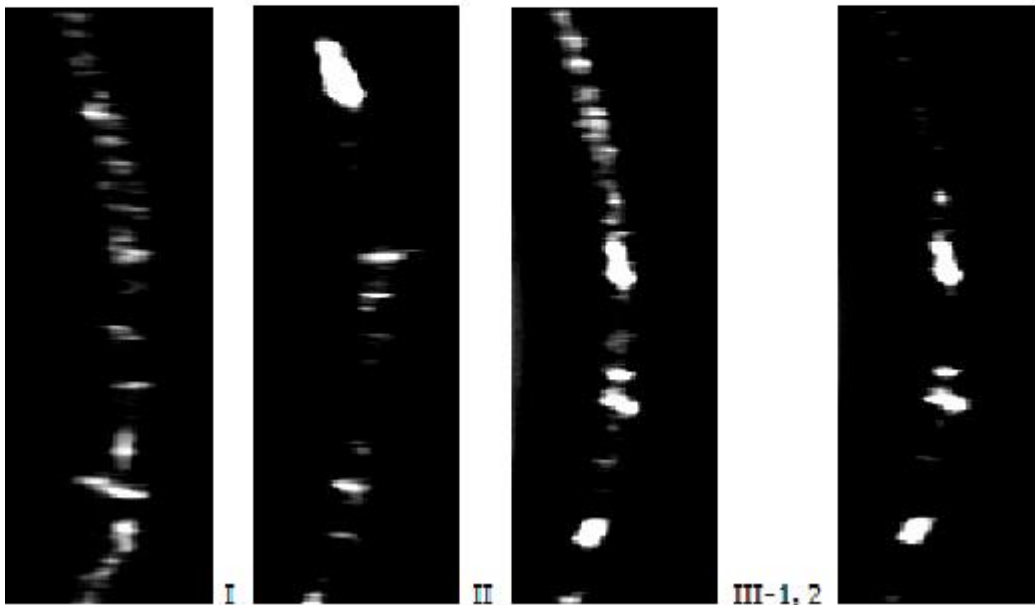
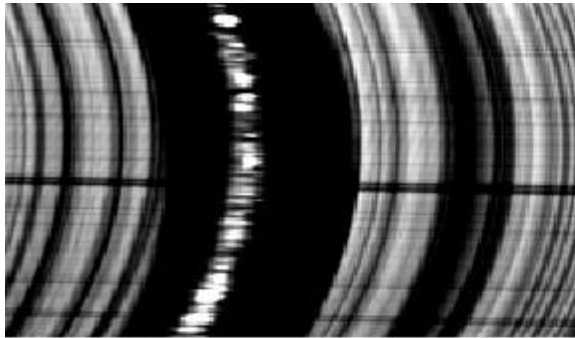
მიმღები, რომელიც მნიშვნელოვნად ამაღლებს როგორც დაკვირვებითი მასალის მიღების წარმადობას, ასევე მის ხარისხს. მუხტკავშირიან მიმღებს აქვს 9 მეგაპიქსელი გარჩევადობის მქონე, მეტად ფართოფორმატიანი ხილვადობის ველი, რომელიც კარგია მაღალი მგრძობიარობისა და საუკეთესო გარჩევადობის მისაღწევად. ზემოთ აღნიშნული კამერა საშუალებას იძლევა, მცირე ექსპოზიციით (1 სეკუნდზე ნაკლები) მივიღოთ ქრომოსფეროსა და კორონის ნატივი სტრუქტურების მაღალი ხარისხის სპექტროგრამები ცალკეულ ემისიურ სპექტრულ ხაზში, რაც უაღრესად მნიშვნელოვანია ამგვარი დაკვირვებებისათვის. კორონოგრაფის ინსტრუმენტული სპექტრული გარჩევადობა 0.04 \AA -ია, ხოლო დისპერსია სპექტრის მეორე რიგში – 0.962 \AA/მმ . სივრცული გარჩევა 1 arc sec , შეიძლება მიღწეულ იქნეს ე.წ. “კორონულ დღეებში”. კორონოგრაფი აღიჭურვა კარგი გარჩევის CCD კამერით, რომლის მეშვეობით მიღწეულია 1 წმ-ზე ნაკლები დროითი გარჩევა, მართვის პულტში შეკეთდა ე. წ. „სიხშირის გენერატორი“, რომლის მეშვეობითაც საათიერი მექანიზმის აღმძრავი მოტორის კვებისათვის საჭირო, წინასწარ შერჩეული სიხშირის მიწოდების შემთხვევაში, ეს უკანასკნელი უზრუნველყოფს ტელესკოპის კარგ მიყოლებას, რაც მეტად მნიშვნელოვანი ფაქტორია ხარისხიანი დაკვირვებითი მასალის მისაღებად.

გარდა ამისა, დამზადდა სპეციალური შუქფილტრი (ვ.ყულიჯანიშვილი, ა.მაიერი), რომელმაც საშუალება მოგვცა ერთ CCD გამოსახულებაზე (ანუ ერთ კადრზე) ერთდროულად, სპექტრის მეორე რიგში, მიგვეღო როგორც სპიკულთ $H\alpha$ სპექტროგრამა, ასევე საყრდენი ხაზიც სპექტრის მესამე რიგიდან. თუმცა, შევნიშნოთ ისიც, რომ მუხტკავშირიანი მიმღების მაღალმა მგრძობიარობამ ამ უკანასკნელი ამოცანის წარმატებით გადაწყვეტის საქმეში მნიშვნელოვანი პრობლემები შეგვიქმნა.

აღნიშნული შუქფილტრი წარმოადგენს ბრტყელპარალელურ, ორ, ერთმანეთთან მირჩილულ, ფერად მინათა კომბინაციას. შუქფილტრის ცენტრში თავსდება ისეთი მახასიათებლების მქონე წითელი შუქფილტრი (KC-13), რომელიც მაქსიმალურად ატარებს $H\alpha$ ხაზის მახლობელ ტალღის სიგრძეებს. მისი სიგანე დაახლოებით 2 სმ-ის, ხოლო სიმაღლე 8 სმ-ის რიგისაა. წითელი შუქფილტრის მარჯვნივ და მარცხნივ ივსება უკვე ისეთი ლურჯ-მწვანე (C3C-21) შუქფილტრით, რომელიც მაქსიმალურად ატარებს მხოლოდ სპექტრის ლურჯ-მწვანე უბანს (სწორედ სპექტრის სამუშაო მეორე რიგს $H\alpha$ ხაზის მახლობელ უბანში, მესამე რიგიდან ედება სპექტრის ლურჯ-მწვანე უბანი), რასაც საბოლოო ჯამში, $H\alpha$ ხაზის მახლობლად "გადმოყავს" მხოლოდ სპექტრის მესამე რიგიდან ლურჯ-მწვანე უბანში მდებარე სპექტრული ხაზები და რომელთა ტალღის სიგრძეთა გადათვლა სპექტრის მეორე რიგისათვის მიიღწევა მათი რეალური ტალღის სიგრძეების $3/2$ -

ზე გადამრავლებით; საბოლოოდ კი, H α ხაზისათვის, სწორედ რომ სპექტრის მესამე რიგიდან სპექტრის მეორე რიგში "გადმოსულ" ხაზებს შორის შეირჩევა ე.წ. "საყრდენი ხაზი", რომელსაც არსებითი მნიშვნელობა ენიჭება სპიკულთ დოპლერის სიჩქარეთა განსაზღვრისას. ასე მაგალითად, H α სპიკულის დოპლერის სიჩქარეთა განსაზღვრისათვის ჩვენ ვიყენებთ სპექტრის მესამე რიგში მდებარე CrI ხაზს, რომლის ტალღის სიგრძე 4371.286 Å-ია, და რომელიც, ზემოთ აღნიშნული შუქფილტრის მეშვეობით, სპექტრის მეორე რიგში "გადმოდის" როგორც 6556,929 Å ტალღის სიგრძის შესაბამისი სპექტრული ხაზი და რომელიც საკმაოდ ახლოა H α ხაზის ტალღის სიგრძესთან (6562.808 Å).

შევნიშნოთ, რომ ზემოთ აღნიშნული კომბინირებული შუქფილტრის დასამზადებლად საჭირო პარამეტრების მქონე შუქფილტრების შერჩევის შემდეგ, უკვე დღის წესრიგში დგება შუქფილტრის წითელ და ლურჯ-მწვანე უბნებში გამავალ ინტენსივობათა გათანაბრების საკითხი, რომლის გადასაწყვეტად მხედველობაში მისაღებია როგორც CCD კამერის სპექტრული მგრძობიარობა, ასევე შერჩეული შუქფილტრების სპექტრული მახასიათებლები (რამეთუ აუცილებელია, რომ ერთ CCD გამოსახულებაზე, ანუ ერთ კადრზე, ერთდროულად მივიღოთ როგორც სპიკულთ H α სპექტროგრამა, ასევე საყრდენი ხაზიც, სპექტრის მესამე რიგიდან). შევნიშნოთ რომ, ადრეულ ანალოგიურ დაკვირვებებში (ფოტოფირების გამოყენებისას), ექსპერიმენტული თვალსაზრისით ასეთი, საკმაოდ რთულად გადასაწყვეტი ამოცანა ჩვენს წინაშე არ დამდგარა; ეხლა კი ამ ამოცანის გადაწყვეტა დამკვირვებლის დიდ ძალისხმევასთან ერთად, შრომატევადი სამუშაოების ჩატარებასაც მოითხოვდა, სინათლის მაღალგამტარიანი შუქფილტრისათვის დამუქების პარამეტრების დადგენის თვალსაზრისით, რაც თავის დროზე წარმატებით განხორციელდა ვ.ყულიჯანიშვილის მიერ; აღსანიშნავია ისიც, რომ, აღნიშნული ამოცანის გადაწყვეტა ყველა სხვა ემისიურ სპექტრულ ხაზში დაკვირვებისას და ყველა სხვა მუხტკავშირიანი მიმღებისათვის, მათი სპეციფიკიდან გამომდინარე, ინდივიდუალურ მიდგომას საჭიროებს. ქვემოთ საილუსტრაციოდ მოგვყავს აბასთუმნის ასტროფიზიკურ ობსერვატორიაში, დიდ დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფზე CCD კამერითა და ზემოთაღნიშნული სპეციალური (ბრტყელპარალელური) შუქფილტრით გადაღებული H α სპიკულთ ერთ-ერთი ასეთი სპექტროგრამა, სადაც ერთი ექსპოზიციით, შესაბამისი შუქფილტრის დამუქებით, ერთ კადრზე მიიღება როგორც H α ხაზი, ასევე საყრდენი ხაზებიც სპექტრის მესამე რიგიდან.



ნახ.6. მოყვანილია ზემოთ წარმოდგენილია დაკვირვების თანამედროვე მეთოდით მიღებული $H\alpha$ - სპიკულების სპექტროგრამები (ზევით), ხოლო ქვედა ნაწილში წარმოდგენილია სხვადასხვა დღის დაკვირვებული $H\alpha$ - სპიკულების სპექტროგრამები. სპექტროგრამა I მიღებულია 17.10.2012 მზის კიდიდან 4 500კმ სიმაღლეზე, ხოლო სპექტროგრამა II, 25.08.2012 მზის კიდიდან 7 500კმ სიმაღლეზე. სპექტროგრამები III-1,2 მიღებულია 19.10.2012 მზის კიდიდან 4 500კმ და 7 500კმ შესაბამისად, 30 წუთის შუალედით. სპექტროგრამებიდან ნათლად ჩანს სიმაღლის ზრდასთან ერთად როგორ მცირდება სპიკულების რაოდენობა. შედარებით კაშკაშა მოზრდილი გამონასახები პროტუბერანცებია.

დაკვირვებისა და დამზერითი მონაცემების დამუშავების არასწორ მეთოდის მიყვარტ არაერთგვაროვან/არაერთმნიშვნელოვან დამზერით შედეგებამდე/მონაცემებამდე. მაგალითად, სპიკულების სიცოსხლის ხანგრძლივობის დადგენა, მათი განვითარების დინამიკის შესწავლა და სხვა

დიდად არის დამოკიდებული დაკვირვების მეთოდიკაზე. მნიშვნელოვანია სპიკულებს რომელ სიმაღლეზე ვაკვირდებით და რა ექსპოზიციის ხანგრძლივობით. მმაგ. თუ დაკვირვებას ვაწარმოებთ ქრომოსფეროს დაბალ სიმაღლეზე (აქ ექსპოზიციის ხანგრძლივობა ნაკლებია ვიდრე მაღალ სიმაღლეებზე, იმიტომ რომ როგორც ცნობილია სპიკულების ინტენსივობა ეცემა სიმაღლის ზრდასთან ერთად), მაშინ სპიკულის სიცოცხლის ხანგრძლივობა გამოვა მეტი, ვიდრე, თუ მას დავაკვირდებოდით საშუალო ან მაღალ სიმაღლეზე.

რაც შეეხება სპიკულის განვითარების დინამიკას, ღიად რჩება ისეთი საკითხი, როგორცაა: სპიკულები წარმოიშვებიან კორონული გაზის კონდესაციით, რის შედეგადაც ნივთიერება მიედნება ზემოდან ქვევით ფოტოსფეროსკენ, თუ პირიქით, სპიკულები წარმოიშვებიან ქვემოდან ზევით ნივთიერების კორონისაკენ მოძრაობით. საჭიროა აღვნიშნოთ, რომ სპიკულის კორონული გაზის კონდესაციის პირობებში წარმოშობისას არ არის აუცილებელი, რომ სპიკულმა დაიწყოს ნათება ქრომოსფეროს მაღალი ფენებიდან. ქრომოსფეროს მაღალ სიმაღლეებზე გამოსხივების აუცილებელი პირობები შეიძლება არც კი არსებობდეს. კორონული გაზის კონდესაციით წარმოშობისას სპიკულმა შეიძლება დაიწყოს ნათება ქრომოსფეროს დაბალ ან საშუალო სიმაღლეებზე. ამიტომაც, რომ სპიკულების დაკვირვებით ერთიდაიგივე სიმაღლეზე ძნელია ვიმსჯელოთ მათი წარმოქმნის მექანიზმზე. სპიკულების წარმოშობას მზის ატმოსფეროს ქვედა ფენებში მკვლევარების უმრავლესობა უჭერენ მხარს, თუმცა ჯერ კიდევ არსებობს საპირისპირო მოსაზრებები.

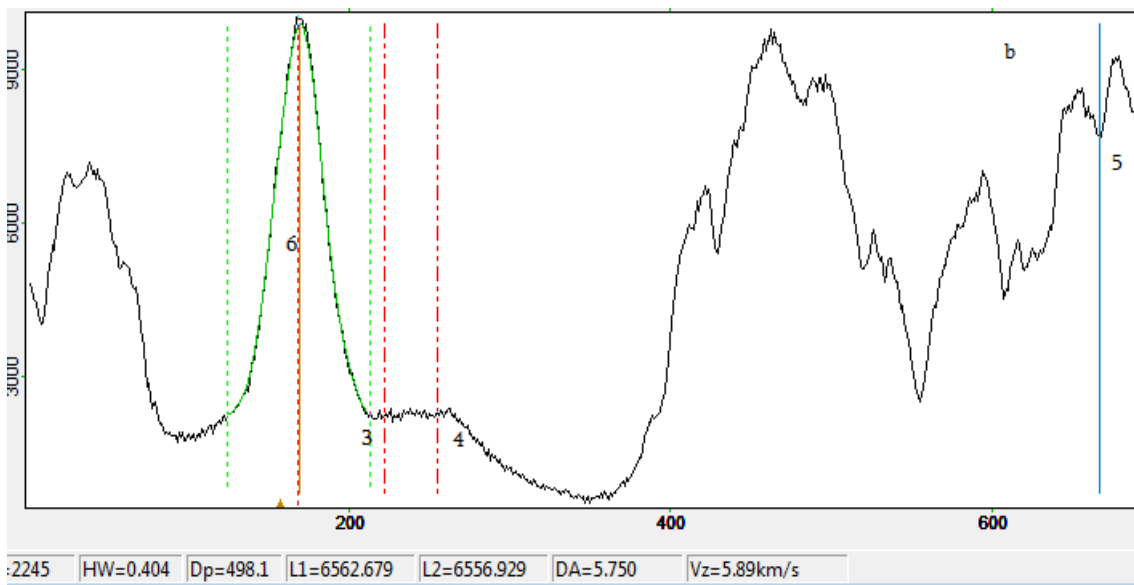
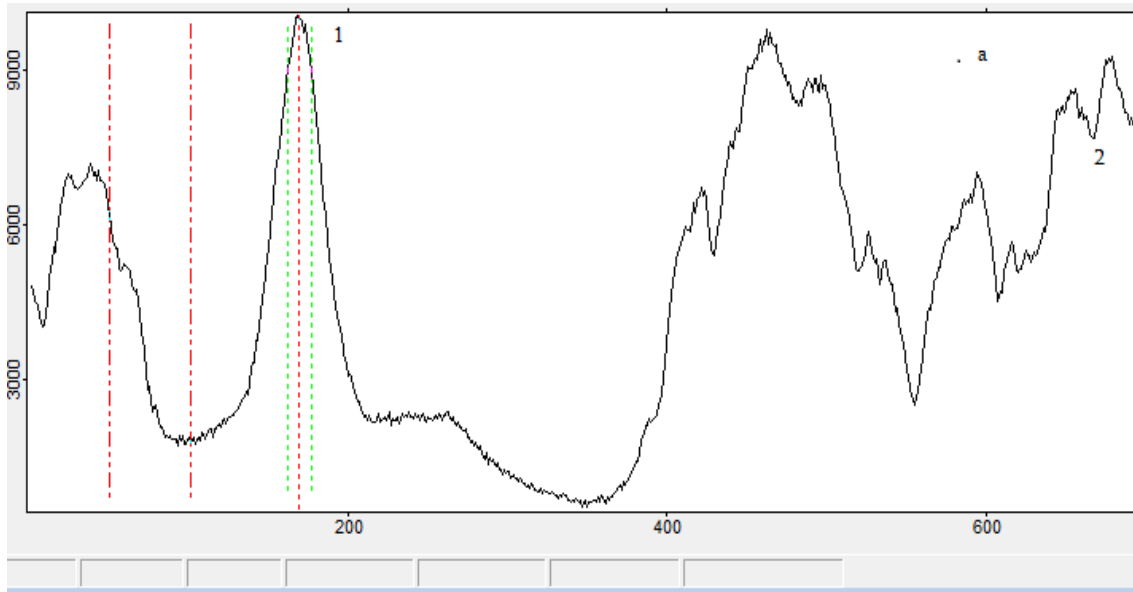
§2.3 დიდი დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის დახმარებით მიღებული დამზერითი მასალის დამუშავების თანამედროვე მეთოდის აღწერა

როგორც ავღნიშნეთ ქრომოსფერულ სპიკულებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესები კარგად ვერ აღიწერებოდა დაკვირვებებით მიღებული მონაცემებით და მიზეზიც დავასახელებთ. დიდი მნიშვნელობა ენიჭება, როგორც დაკვირვების მეთოდის ასევე დაკვირვებითი მასალის დამუშავების მეთოდების სიზუსტეს. ჩვენს ობსერვატორიაში მიღებული დაკვირვებითი მასალა დამუშავებული იქნა თანამედროვე, დღეისათვის აღიარებული პროგრამებით/მეთოდებით. კერძოდ: გავზარდეთ და დავაზუსტეთ ნახევარსიგანეების, დოპლერის და ტანგენციალური სიჩქარეების, მათი რხევების გამოთვლის/განსაზღვრის სიზუსტე და სხვა.

დამზერითი მასალის გასაზომად, გამოყენებული იქნა ობსერვატორიაში (ვ. კახიანი) დაწერილი სახეცვლილება ერთ-ერთი AlmaP359 კომპიუტერული პროგრამების მოდულის, რაც გრაფიკული წესით, როგორც დოპლერის და ტანგენციალური სიჩქარეების, ასევე ნახევარსიგანეების განსაზღვრის საშუალებას იძლევა. პროგრამული მოდული საშუალებას იძლევა განსაზღვროს როგორც სპიკულის/პროტუბერანცების ასევე საყრდენი ხაზების პროფილის შუა ხაზებს შორის მანძილი. გაზომვის შედეგად მიღებული ანათვლები იწერება შესაბამის ASCII ფაილში, რაც საშუალებას გვაძლევს ცნობილი მეთოდებით გამოვითვალოთ დოპლერის და ტანგენციალური სიჩქარეები, ნახევარსიგანეები, რხევები და სხვა. რათქმუნდა დამუშავების ახალი სხვა მეთოდებიც არსებობს, მაგრამ აღნიშნულ მოდულს მივანიჭეთ უპირატესობა.

პროგრამის მუშაობის აღწერა:

მას შემდეგ, რაც პროგრამაში შეყვანილი იქნება დაკვირვებითი მასალიდან ამორჩეული სპექტროგრამა, უნდა მოინიშნოს გასაზომი სპიკული; სპიკულის მონიშვნის შემდეგ სპეციალური პროგრამული ბრძანებით ეკრანზე გამოისახება სურათი (ნახ., 7, a), რომელზეც გამოსახულია, როგორც სპიკულის (1), ასევე საყრდენი ხაზის პროფილები (2); შემდეგი ბრძანებით მოვნიშნავთ არეს (3,4, წითელი) ნახევარსიგანის გამოსათვლელად (ნახ 7. b); მომდევნო ბრძანებებით ფიქსირდება/ისაზღვრება საყრდენი და სპიკულის შუა ხაზები (5,6) და მათ შორის მანძილი (ნახ., 7, b); ამის შემდეგ გარკვეული ბრძანებით პროგრამა ითვლის, როგორც დოპლერის სიჩქარეს (V_r) და ნახევარ სიგანეს $H \cdot HW(\Delta\lambda)$, ასევე სამუშაოსთვის საჭირო სხვა მონაცემებს (ეს მონაცემები ნახ 3. b ქვედა ნაწილში). ესენია: D_p - სპიკულისა და საყრდენი ხაზების ცენტრალურ ხაზებს შორის მანძილი პიქსელებში; L_1 - სპიკულის



ნახ.7. სპიკულის და საყრდენი ხაზის პროფილი

პიკის/მაქსიმუმის ანათვალ პიქსელებში; L2 – საყრდენი ხაზის პიკის/მაქსიმუმის ანათვალ პიქსელებში; DA – მათ შორის მანძილი პიქსელებში.

ცნობილი ფორმულით პროგრამა ანგარიშობს V_r -დოპლერის სიჩქარეს:

$$V_r = \frac{C \cdot D}{\lambda} (\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2) \quad (1),$$

სადაც C - სინათლის სიჩქარეა, D-ტელესკოპის დისპერსიაა შესაბამის ერთეულებში (მაგ., H α ხაზისათვის 0.962 Å/მმ, ცხადია, პროგრამული

გამოთვლებისას (1) ფორმულაში დისპერსია შესაბამისად გადაყვანილი უნდა იქნეს პიქსელებში და სხვა), λ - გამოსხივების ტალღის სიგრძეა (მაგ., H H α - 6562.808 Å), $\Delta\lambda_1$ - საყრდენი ხაზის პროფილის ცენტრის გაზომილი ანათვალა, ხოლო $\Delta\lambda_2$ - სპიკულის გაზომილი ანათვალა შესაბამისად.

იგივე პროგრამით მცირე ცვლილების შემდეგ დაახლოებით ანალოგიურად ისაზღვრება ტანგენციალური სიჩქარეებიც.

დამზერითი მასალის დასამუშავებლად/ანალიზისათვის ფურიეს მეთოდის მაგივრად გამოვიყენეთ ე. წ. "ლომბის პერიოდოგრამების მეთოდი" (Press et al. 1992). ეს მეთოდი განსაკუთრებით კარგია არათანაბარი ინტერვალების მქონე პერიოდულობის შესწავლისას, რაც ჩვენ შემთხვევას/დაკვირვებებს კარგად მიესადაგება. ჩვენს მიერ დაკვირვებული სპექტროგრამებს შორის დროითი ინტერვალი არათანაბარია, რაც გამოიხატება სხვადასხვა გარემოებით. მაგალითად, სპიკულების/პროტუბერანცების სპექტროგრამებს დამკვირვებელი აფიქსირებს/იღებს ცის მაღალი გამჭვირვალობის დროს, რაც საკმარისად ხშირად იცვლება, ეს კი იწვევს დაკვირვებული სპექტროგრამების შორის დროის ინტერვალის განსხვავებას და სხვა.

თავი 3. მზის სპიკულების დინამიკა

§ 3.1. ქრომოსფეროს სპიკულების მოძრაობის ტრაექტორიები, ინტესივობები, ნახევარსიგანეები

მნიშვნელოვანია მზის ლიმბის ზემოთ მაგნიტური სტრუქტურის წარმონაქმნების, კერძოდ შედარებით ცივი სპიკულების დინამიკის და სტრუქტურის შესწავლა. სწორედ სპიკულები ასრულებენ დიდ როლს ქრომოსფეროს ზედა ფენების ფორმირებაში და მასში მიმდინარე ფიზიკური პროცესებში. ჩვენ განვიხილავთ სპიკულებს, როგორც მთლიანს, რაც შეეხება სპიკულებში მიმდინარე ფიზიკურ პროცესების, როგორც ექსპერიმენტალური ასევე თეორიული მიმართულებით აღწერას, ეს დეტალურად არის მოყვანილი მიმოხილვებში (მაგ., Sterling, 2000., De Pontieu, Erdelyi, 2006).

ქრომოსფერული სპიკულის ტანგენციალური სიჩქარეების მნიშვნელოვანი ცვლილებები (Gadzhiev, Nikolsky, 1982; Nikolsky, Platova, 1971) მიუთითებს იმაზე, რომ როგორც ჩანს ვაკვირდებით ან სპიკულების რეალურ მოძრაობას ან სპიკულების რომელიღაც/ცალკეული არის გადადგილებას მზის ზედაპირის პარალელურად. ასეთ მოძრაობებს შეიძლება ქონდეთ სხვადასხვა ხასიათი, დაწყებული ქაოტურიდან დამთავრებული რხევითამდე.

დოპლერის სიჩქარედ არ შეიძლება ჩავთვალოთ სპიკულების მზის ზედაპირზე არსებული მხოლოდ ჰორიზონტალური სიჩქარეები (მაგ., Kulidzanishvili V. I., Zhugzhda Yu. D., 1983), იგი გამოხატულია, როგორც სპიკულთ დაკვირვებული არეების ჰორიზონტალური მოძრაობებით, ასევე “სპიკულების ღერძის” გასწვრივ ნივთიერების მოძრაობით, რომელიც გადახრილია მხედველობის მიმართულებიდან (მაგ., De Pontieu B., et al., 2007a, 2007b). ეს შეიძლება აიხსნას სპიკულებში ტალღის გავრცელებით (მაგ., Kukhianidze et. al., 2006, Zaqarashvili et. al., 2007). სპიკულების შიგნით ნივთიერების მოძრაობას ზოგჯერ შეიძლება ქონდეს დიფერენციალური და ბრუნვითი ხასიათი, რაზეც მიუთითებს დაკვირვებული სპექტრების გადახრა დისპერსიის მიმართულებიდან.

სპიკულებში მიმდინარე ფიზიკურ პროცესებზე მეტი ინფორმაციის მოსაპოვებლად აუცილებელია მათზე უწყვეტი დაკვირვებები ქრომოსფეროს სხვადასხვა სიმაღლეზე დროის ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში. ასეთი ტიპის დაკვირვებები აბასთუმნის ობსერვატორიაში, როგორც უკვე ავლინებთ, ჯერ კიდევ ჩატარებულ იქნა 1978-86 წლებში (Kulidzanishvili, 1978, 1980, Khutsishvili, 1986, 1995).

აბასთუმნის ასტროფიზიკურ ობსერვატორიაში 53 სმ დიდ დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის დახმარებით 1980-1982 წლებში მიღებული იქნა წყალბადის H α და ჰელიუმის D $_3$ -სპიკულების სპექტროგრამები ქრომოსფეროს სხვადასხვა

სიმაღლეზე დროის ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში. წყალბადის H α ხაზში სპექტროგრამები დაკვირვებული იქნა სპექტროგრაფის მეორე რიგში, სადაც პირუკუ დისპერსია ტოლია 0.96 Å/მმ, ხოლო D D₃-სპიკულები დაკვირვებული იქნა სპექტროგრაფის მესამე რიგში, სადაც პირუკუ დისპერსია ტოლია 0.58 Å/მმ.

მიღებული იქნა H α და D D₃-სპიკულებისათვის 250 და 110 უწყვეტი სიმაღლეთა სერია ქრომოსფეროს სხვადასხვა სიმაღლეზე 44 და 30 წუთის განმავლობაში, შესაბამისად. დაკვირვებული მასალის ხანგრძლივობა დაახლოებით 2-3 ჯერ აღემატება სპიკულის სიგოცხლის ხანგრძლივობას (თუ სპიკულის სიგოცხლის ხანგრძლივობას საშუალოდ ჩავთვლით 15 წუთს). ერთი სიმაღლეთა სერიის ხანგრძლივობა H H α სპიკულებისათვის შეადგენს 7 წმ., ხოლო D₃-სპიკულებისათვის 18 წამს. H H α -სპიკულებისათვის ქრომოსფეროს პირველ ოთხ სიმაღლეზე ექსპოზიციის ხანგრძლივობა 0.2 წამია, ხოლო დანარჩენ ოთხ სიმაღლეზე 0.4 წამია, D₃-სპიკულებისათვის ექსპოზიციის ხანგრძლივობას შეადგენს 1 და 2 წამი შესაბამისად.

დაკვირვებების მიმდინარეობისას ექსპოზიციის ცვლილება ხდებოდა ავტომატიურ რეჟიმში. ორივე ხაზისთვის თვითეული სიმაღლეთა სერია შესდგება 8 სიმაღლისგან, რომელიც H α -სპიკულებისათვის იწყება 3800 კილომეტრიდან და გრძელდება 8700 კილომეტრამდე, ხოლო D D₃-სპიკულებისათვის იწყება 4400 კილომეტრიდან და გრძელდება 9300 კილომეტრამდე. სიმაღლეთა შორის მანძილი დაახლოებით ტოლია 1" (1" ~ 725კმ). სიმაღლეთა განსაზღვრის სიზუსტე არის დაახლოებით ± 200 კმ.

სპიკულებისათვის გაზომილი იქნა, როგორც დოპლერის, ასევე ტანგენციალური სიჩქარეები. ტანგენციალური სიჩქარეების გაზომვისას სპექტროგრამას გამზომ ხელსაწყო (სპიდომეტრის) მაგიდაზე ათავსებდნენ ისე, რომ დისპერსიის მიმართულება პარალელური ყოფილიყო სპიდომეტრის ჭვრიტისა. დოპლერის სიჩქარეების გაზომვისას სპექტროგრამას გამზომ ხელსაწყო მაგიდაზე ათავსებდნენ ისე, რომ დისპერსიის მიმართულება მართობული ყოფილიყო სპიდომეტრის ჭვრიტისა. დაკვირვებითი მასალიდან ამორჩეულ 95 სიმაღლეთა სერიიდან, რომელიც მიღებული იქნა დაახლოებით 16 წუთის განმავლობაში, გაზომილი იქნა სპიკულები (12), ქრომოსფეროს ორ სხვადასხვა სიმაღლეზე, კერძოდ – 5200კმ და 5900კმ.

გაზომვის ცდომილებების მინიმუმზე დასაყვანად (განსაკუთრებით ტანგენციალური სიჩქარეები) თვითეულ სპიკული იზომებოდა შემდეგნაირად: თვითოეული სპიკული გამზომი ხელსაწყო ჭვრიტეში (0.015Å × 0.5) ტარდებოდა სამჯერ, კერძოდ, სპიკულის ცენტრალური არე და მის ორივე მხარე გახდნენ თანაბარი მანძილით დაშორებული არეები. გაზომვა მიმდინარეობდა შემდეგნაირად, იზომებოდა ამორჩეულ სპიკული და მის სიახლოვეს მდებარე 2 მეზობელ სპიკული. სამივეს სპიდომეტრის ჭვრიტეში ტარდებოდა ერთმანეთის მიყოლებით, შემდეგ ითვლებოდა 2 მეზობელი სპიკულის “სიმძიმის” ცენტრი და გამოითვლებოდა ამორჩეული სპიკულის გადახრა ამ „სიმძიმის ცენტრის“

მიმართ. რათქმაუნდა სპიკულების გაიგივება ხდებოდა ცალსახად, რის საშუალებასაც დაკვირვებული სპექტროგრამების მაღალი სივრცული და დროითი გარჩევა იძლეოდა.

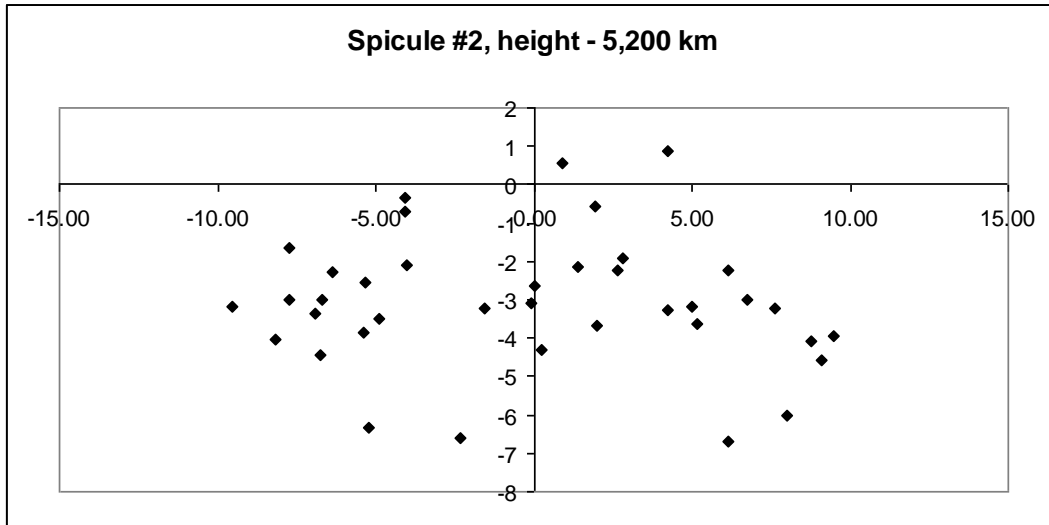
ცნობილია, რომ სპიკულები გარკვეული კუთხით არიან დახრილები მზის ლიმბის მიმართ. სპიკულებს შორის მანძილების გაზომვა დამოკიდებულია ამ კუთხეზე, ანუ სპიკულის განვითარების ეტაპზე. სპიკულის წარმოშობის პერიოდში მისი დახრა ლიმბის მიმართ ან შეუმჩნეველია (0° - ია), ან მცირეა, განვითარების შემდგომ ეტაპზე დახრის კუთხე იზრდება და აღწევს მაქსიმუმს სპიკულის განვითარების მაქსიმუმის დროს. სიჩქარეების განსაზღვრისას ამით გამოხატული ცდომილება არ აღემატება 0.02მმ ანუ $\sim 0.5 - 1.0$ რკალის სეკუნდს, მაგრამ გასათვალისწინებელია. ამიტომ მნიშვნელოვანია სპიკულის განვითარების რა ეტაპზე/ფაზაში იზომება დოპლერის/ტანგენციალური სიჩქარე. აღნიშნული დაკვირვებითი მასალის ანალიზისას მიღებულ იქნა სპიკულის განვითარების მაქსიმუმის ფაზაში $\pm 2-3$ წუთი და გაზომვებიც ჩატარებულ იქნა სპიკულების განვითარების შესაბამის მომენტში.

დაკვირვებითი მასალის დამუშავების ამგვარი მიდგომა იძლევა საშუალებას შეძლებისდაგვარად გამოვრიცხოთ ცდომილებები გამოწვეული გამოსახულების გადაადგილებით სპექტროგრაფის ჭვრიტის გასწვრივ, რომელიც გამოწვეულია ატმოსფერული ფლუქტუაციებით და დიდი კორონოგრაფის კუდეს ფოკუსში გამონასახის ბრუნვით.

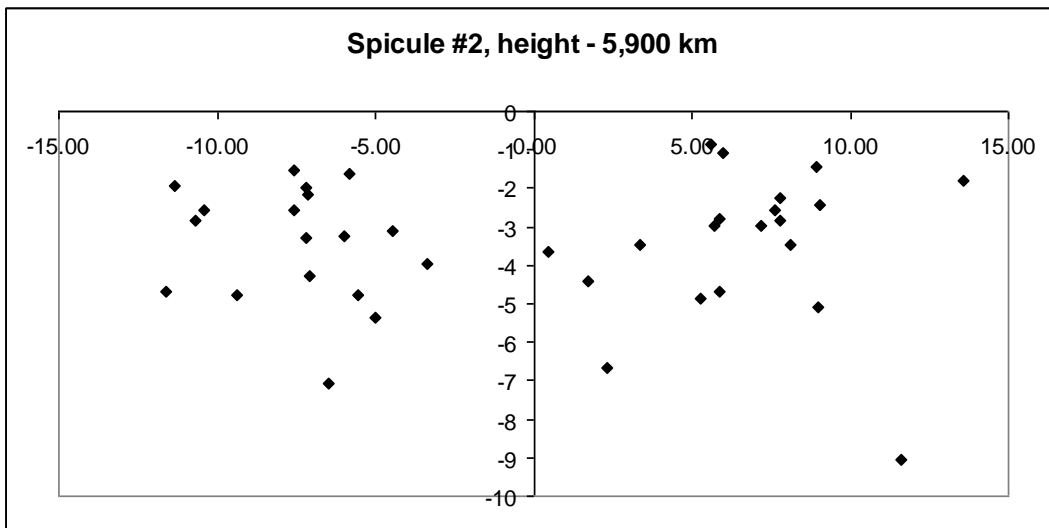
სპიკულების სივრცული მოძრაობების შესასწავლად გამოვიყენეთ ზემოთ აღწერილი დაკვირვებითი მასალის (1980-1982) მაშინდელი გაზომვით მიღებული დოპლერის და ტანგენციალური სიჩქარეები, რაც დამუშავებული იქნა ჩვენს მიერ აღწერილი თანამედროვე მეთოდით (§ 2.3).

ნახ. 8-11. საილუსტრაციოდ გაზომილი სპიკულებიდან ქრომოსფეროს ორი სხვადასხვა სიმაღლისათვის (5200კმ და 9200კმ) მოყვანილია მოძრაობების ტრაექტორიები ორი სპიკულისთვის ის ჰორიზონტალურ სიბრტყეში. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია ტანგენციალური, ხოლო ორდინატთა ღერძზე დოპლერის სიჩქარეები. აუცილებელი აღინიშნის, რომ Eეს ტრაექტორიები დამძიმებულია ცდომილებებით, რომელიც დაგროვებულია მხედველობის გასწვრივ გამონასახის გადაადგილებებით (როგორც აღვნიშნეთ იგი მინიმუმამდე არის დაყვანილი), მაგრამ მოყვანილი ტრაექტორიებით შეიძლება ვიმსჯელოთ მოძრაობების ხარისხობრივ ხასიათზე. დოპლერის სიჩქარეების გაზომვების სიზუსტე თანამედროვე მეთოდიკით საკმარისად მაღალია (ადრინდელ გაზომვებში იგი დაახლოებით ± 0.5 კმ/წმ-ია), ხოლო ტანგენციალური სიჩქარეების განსაზღვრის დღეისათვის არსებული სიზუსტე შედარებით დაბალია, თითქმის ცდომილების ზღვართან არის ახლოს. ცხადია ტანგენციალური სიჩქარეების განსაზღვრის მეთოდი მოითხოვს დაზუსტებას და შედარებით ზუსტი მეთოდიკის შემუშავებას.

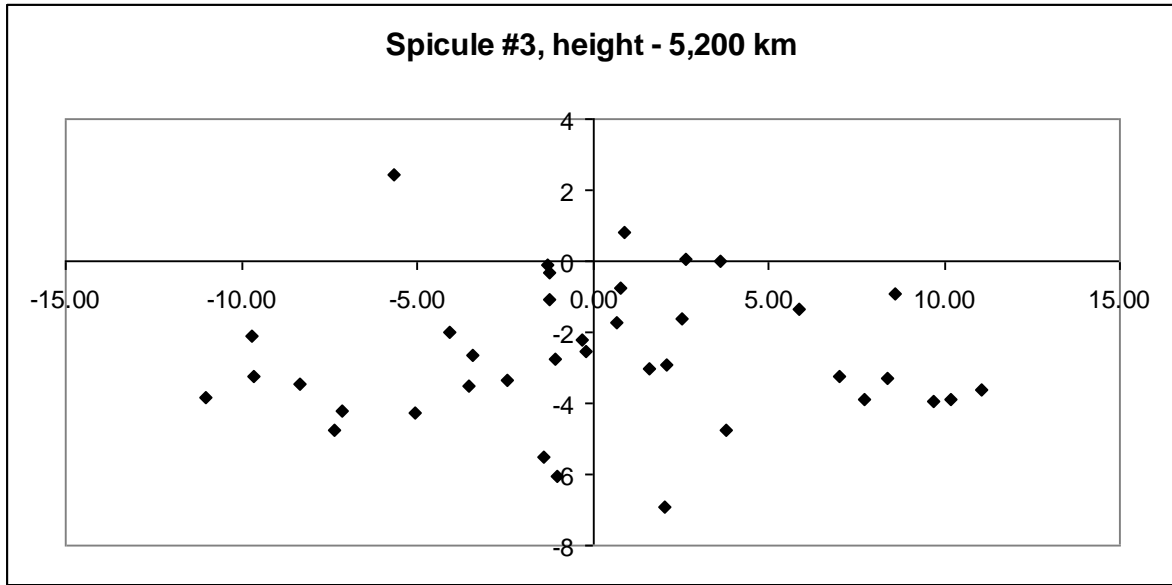
წარმოდგენილი გრაფიკებიდან აშკარად ჩანს, რომ სპიკულების მოძრაობების ტრაექტორიები შეკუმშულია აბსისათა ღერძის მიმართ, სადაც გადაზომილია დოპლერის სიჩქარეები.



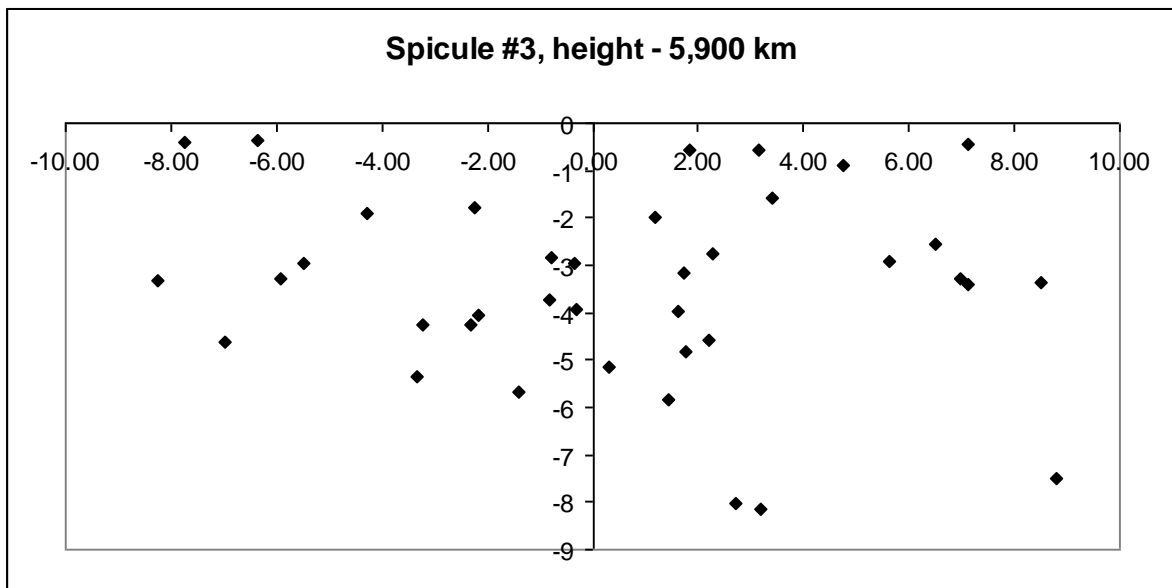
ნახ.8. სპიკული #2 (სპიკულები პირობითად დავნომრეთ 1, 2, 3, ...), სივრცული მოძრაობის ტრაექტორია, ქრომოსფეროს 5200კმ სიმაღლეზე. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია ტანგენციალური, ხოლო ორდინატა ღერძზე დოპლერის სიჩქარეები.



ნახ.9. სპიკული #2, სივრცული მოძრაობის ტრაექტორია, ქრომოსფეროს 5900კმ სიმაღლეზე. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია ტანგენციალური, ხოლო ორდინატა ღერძზე დოპლერის სიჩქარეები.

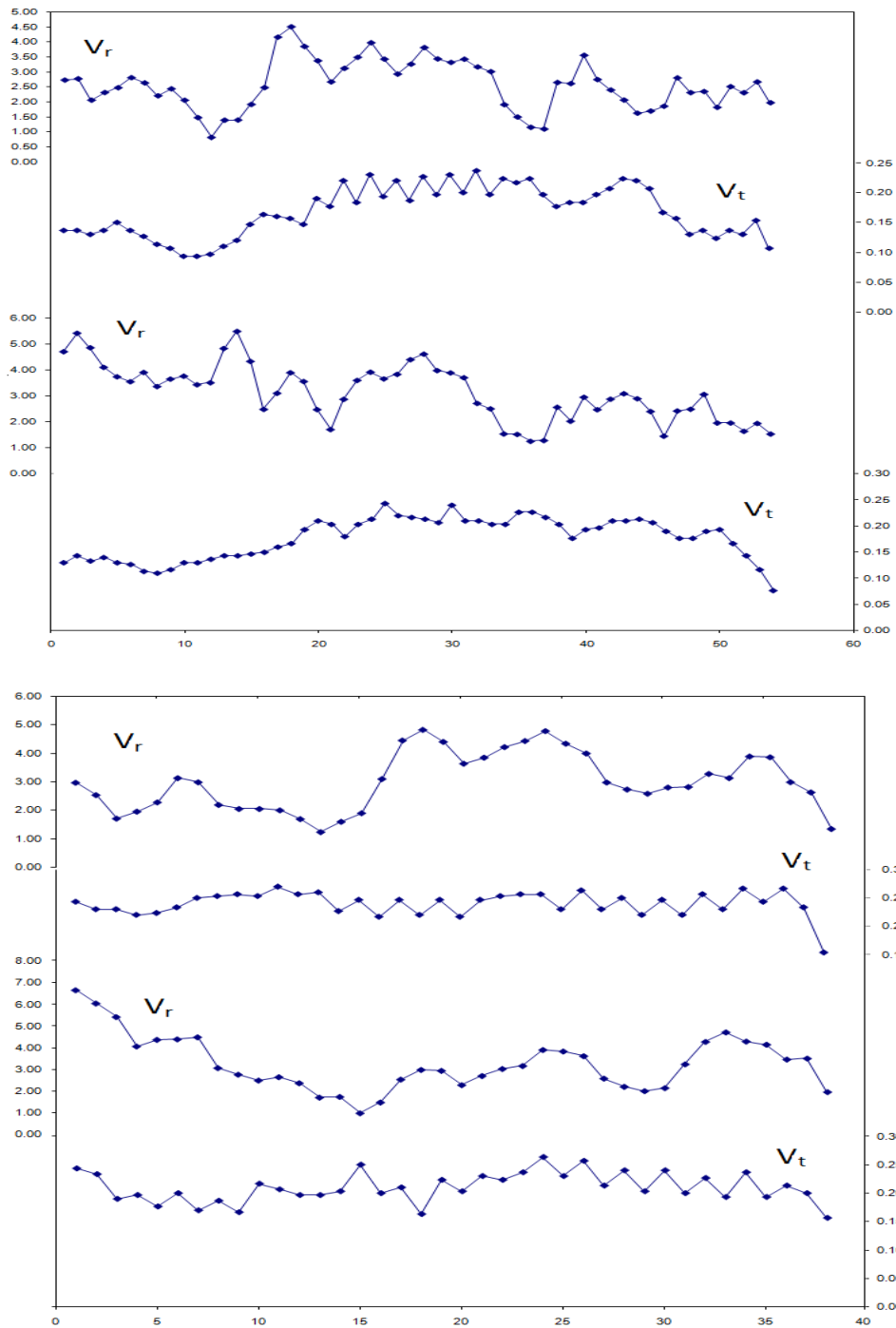


ნახ.10. სპიკული #3, სივრცული მოძრაობის ტრაექტორია, ქრომოსფეროს 5200კმ სიმაღლეზე. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია ტანგენციალური, ხოლო ორდინატთა ღერძზე დოპლერის სიჩქარეები.



ნახ.11. სპიკული #3, სივრცული მოძრაობის ტრაექტორია, ქრომოსფეროს 5900კმ სიმაღლეზე. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია ტანგენციალური, ხოლო ორდინატთა ღერძზე დოპლერის სიჩქარეები.

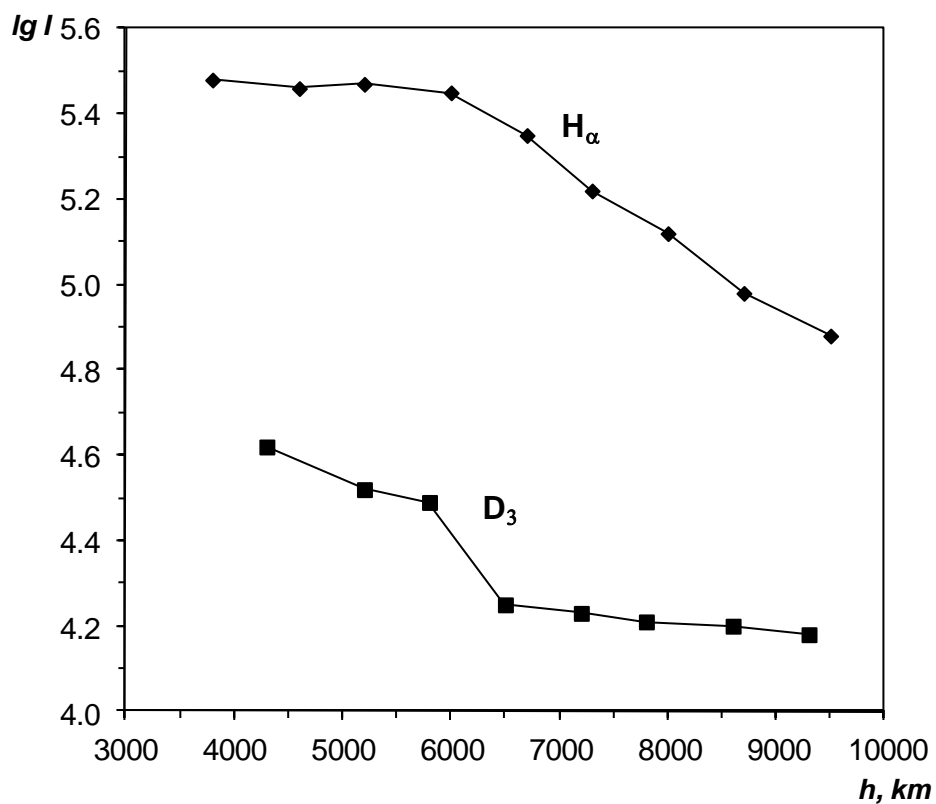
გაზომილი სპიკულებიდან ორი სხვადასხვა სიმაღლისათვის (5200კმ და 9200კმ) ნახ. 12 - ზე ილუსტრირებულია ორი სპიკულის დოპლერის და ტანგენციალური სიჩქარეების დროში ცვლილების გრაფიკი.



ნახ.12. ნახაზზე მოცემული დოპლერის და ტანგენციალური სიჩქარეების ცვლლება დროში. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია დრო, ორდინატთა ღერძზე კი სიჩქარეები.

უმრავლეს შემთხვევაში ერთ ჯგუფში გაერთიანებული სპიკულების დოპლერის სიჩქარეები დაახლოებით ერთნაირად იცვლება, ხოლო ტანგენციალური სიჩქარეები არა. როგორც ნახაზებიდან ჩანს, არც ერთიდაიგივე და არც სხვადასხვა სიმაღლისათვის დოპლერის და ტანგენციალურ სიჩქარეებს შორის არ არის რაიმე დამახასიათებელი კავშირი. ტანგენციალური სიჩქარეების დროში ცვლილების შუალედი მცირეა, ვიდრე დოპლერის სიჩქარეების.

ქრომოსფერულ $H\alpha$ ($H\alpha$ - სპიკულებს დააკვირდნენ 9 სიმაღლეზე) და D_3 -სპიკულების (D_3 -სპიკულებს დააკვირდნენ 8 სიმაღლეზე) ინტენსივობისა და ნახევარსიგანეების შესასწავლად ამოვარჩიეთ 01.09.1981 წელს მიღებული დაკვირვებებით მიღებული მონაცემები.



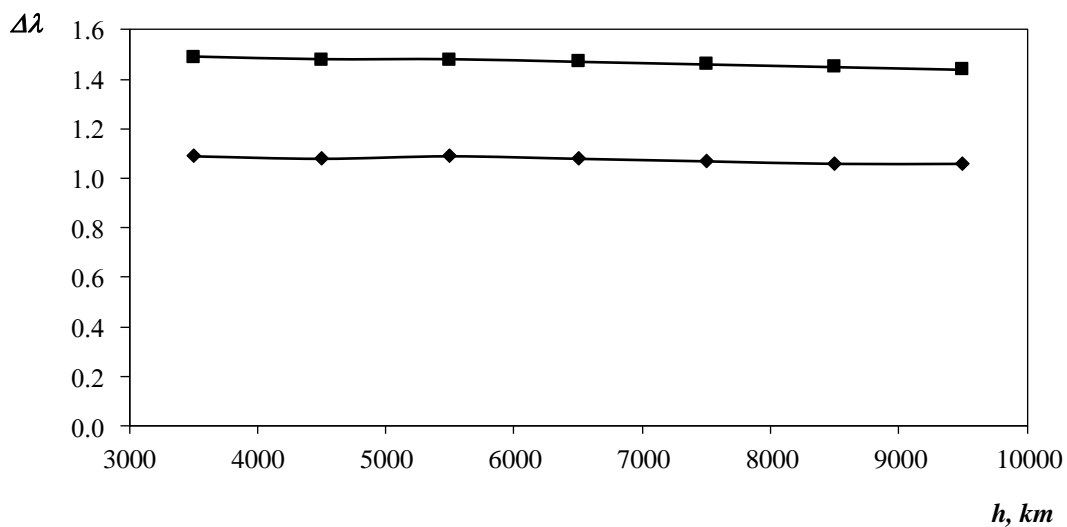
ნახ.13. სპიკულების საშუალო ინტენსივობის ცვლილება ქრომოსფეროს სიმაღლის მიხედვით. $H\alpha$ -სპიკულები დაკვირვებული იქნა ქრომოსფეროს 9 სიმაღლეზე, D_3 -სპიკულებს დააკვირდნენ 8 სიმაღლეზე. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია ქრომოსფეროს სხვადასხვა სიმაღლე, ხოლო ორდინატთა ღერძზე საშუალო ინტენსივობა.

დაკვირვებული სპექტროგრამებიდან გაზომილ იქნა 28 და 20 სპიკულები, შესაბამისად. ამოვარჩიეთ ისეთი სპიკულები, რომლებიც დროის ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში დაიკვირვებოდნენ. ადრინდელი დაკვირვებების მონაცემების თანამედროვე მეთოდული დამუშავების შედეგად მივიღეთ

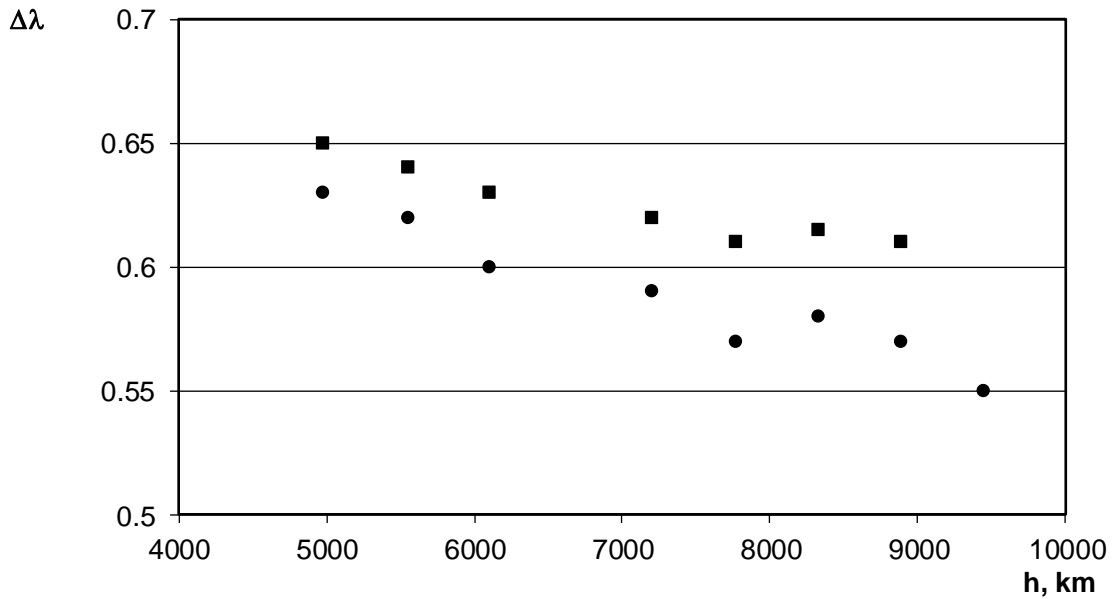
სპიკულის საშუალო ინტენსივობისა და ქრომოსფეროს სიმაღლის შორის დამოკიდებულება, რომელიც მოცემულია ნახ. 13-ზე.

როგორც ნახაზიდან ჩანს სპიკულების საშუალო ინტენსივობა იცვლება/მცირდება უმნიშვნელოდ სიმაღლის მიხედვით.

ნახ. 14,15-ზე ნაჩვენებია $H\alpha$ და D_3 -სპიკულების ნახევარ სიგანეების ცვლილება სიმაღლის მიხედვით. ნახაზებზე მოყვანილი მრუდები შეესაბამება სპიკულებს, რომლებიც ჩანან ქრომოსფეროს რაც შეიძლება მაღალ სიმაღლეებზე (7 სიმაღლეზე).



ნახ.14. ნაჩვენებია $H\alpha$ და D_3 -სპიკულების ნახევარ სიგანეების ცვლილება სიმაღლის მიხედვით. აბსისათა ღერძზე გადაზომილი ქრომოსფეროს სხვადასხვა სიმაღლე, ხოლო ორდინატთა ღერძზე სპიკულების ნახევარსიგანე. (ოთხკუთხედი ნიშნულები შეესაბამებათ $H\alpha$ -სპიკულებს, ხოლო რომბები D_3 -სპიკულებს).



ნახ.15. ნაჩვენებია $H\alpha$ და D_3 -სპიკულების ნახევარ სიგანეების ცვლილება სიმაღლის მიხედვით. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია ქრომოსფეროს სხვადასხვა სიმაღლე, ხოლო ორდინატთა ღერძზე სპიკულების ნახევარსიგანე. (ოთხკუთხედი ნიშნულები შეესაბამებათ $H\alpha$ - სპიკულებს, ხოლო წრიული D_3 -სპიკულებს).

ნახ. 14 - დან ჩანს, რომ როგორც მცირე ნახევარსიგანეების სპიკულებისათვის ($\Delta\lambda \leq 1.2\text{\AA}$), ასევე დანარჩენი ($\Delta\lambda \geq 1.2\text{\AA}$) სპიკულებისათვის ნახევარსიგანეები მნიშვნელოვნად არ იცვლება სიმაღლის ზრდის მიხედვით. ასევე D_3 -სპიკულების ნახევარ სიგანეების ცვლილება სიმაღლის მიხედვით უმნიშვნელოა (ნახ. 15). როგორც აღვნიშნეთ D_3 -სპიკულები აღწევენ შედარებით მაღალ სიმაღლეებს, ვიდრე $H\alpha$ -სპიკულები. ნახ. 15 ამის თვალნათელი მაგალითია (ოთხკუთხედი ნიშნულები შეესაბამებათ $H\alpha$ -სპიკულებს, ხოლო წრიული D_3 -სპიკულებს).

ჩვენ ვთვლით, რომ მიღებული შედეგი (მცირე ნახევარსიგანეებისათვის) სინამდვილესთან უფრო ახლოა იმიტომ, რომ ამ შემთხვევაში $H\alpha$ - ხაზის გაფართოვება თვითშთანთქმის დროს მინიმალურია.

შეგვიძლია დავასკვნათ/ავლნიშნოთ, რომ:

ა) $H\alpha$ და D_3 -სპიკულების მოძრაობების ტრაექტორიები შეკუმშულია იმ ღერძის მიმართ, სადაც გადაზომილია დოპლერის სიჩქარეები;

ბ) უმრავლეს შემთხვევაში ერთ ჯგუფში გაერთიანებული სპიკულების დოპლერის სიჩქარეები დაახლოებით ერთნაირად იცვლება, ხოლო ტანგენციალური სიჩქარეები არა. დოპლერის და ტანგენციალურ სიჩქარეებს შორის არ არის რაიმე დამახასიათებელი კავშირი. ტანგენციალური სიჩქარეების დროში ცვლილების შუალედი მცირეა ვიდრე დოპლერის სიჩქარეებისა;

გ) $H\alpha$ და D_3 -სპიკულების საშუალო ინტენსივობა იცვლება/მცირდება უმნიშვნელოდ სიმადლის ზრდის მიხედვით;

დ) $H\alpha$ - სპიკულების ნახევარსიგანები მნიშვნელოვნად არ იცვლება (უმნიშვნელოდ მცირდება) სიმადლის ზრდის მიხედვით;

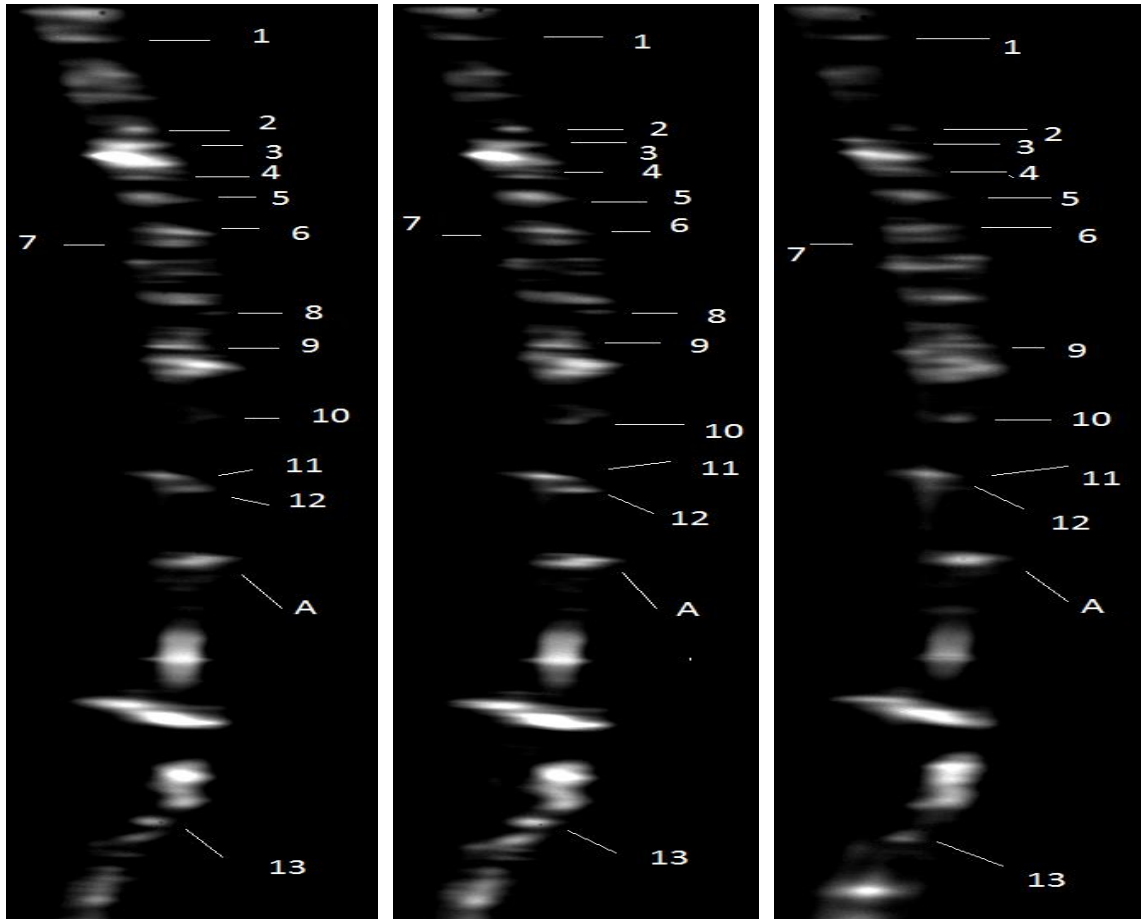
ე) D_3 -სპიკულების ნახევარ სიგანების ცვლილება სიმადლის მიხედვით უმნიშვნელოა (უმნიშვნელოდ მცირდება).

§ 3.2. ქრომოსფერული სპიკულების დოპლერის სიჩქარეების კვაზიპერიოდული ცვალებადობა, რხევები

მშვენიერი მიმოხილვა სპიკულების (და ლაქების) შესახებ თითქმის 40 წლის წინ წარმოადგინა Beckers (1968, 1972). მოგვიანებით Suematsu (1998) და Sterling (2000), ხოლო უფრო ახალი მიმოხილვა დაკვირვებით და თეორიულ ასპექტში გამოქვეყნდა Zaqarashvili & Erdélyi (2009) მიერ. როგორც უკვე ავლინებთ სპიკულებზე დაკვირვებით მიღებული ფიზიკური პარამეტრები საკმარისად განსხვავდებიან ერთმანეთისაგან. ძირითადი მიზეზად დაკვირვებითი მონაცემების განსხვავებებისა შეიძლება ჩათვალოს სპიკულების ერთმანეთზე ზედდება და ვიწრო სპიკულების დანახვის/გარჩევის სიძნელე, ეს კი დამოკიდებულია ინსტრუმენტის/ტელესკოპის გარჩევადობის უნარზე (Erdélyi and James, 2004). თანამედროვე კვლევების ჩასატარებლად, ცხადია დაკვირვებითი მასალა მიღებული უნდა იქნეს მაღალი სივრცული და დროითი გარჩევადობით.

ახასთუმნის ასტროფიზიკურ ობსერვატორიის დიდ დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის დახმარებით 21.11.2011 წელს ჩვენს მიერ მიღებული იქნა წყალბადის H α -სპიკულების სპექტროგრამების ორი სერია, მზის კიდიდან ქრომოსფეროს 5000 და 5500 კილომეტრის სიმაღლეზე დროის ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში. ორივე დაკვირვებისას ექსპოზიციის ხანგრძლივობა 0.3 წამია, სპექტროგრამებს შორის დროის შუალედი საშუალოდ 4.5 წამია, ხოლო დაკვირვების ხანგრძლივობა შეადგენს დაახლოებით 5-6 წუთს. სერიებს შორის დროის შუალედი დაახლოებით ტოლია 18 წთ.

დიდი დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფით მზის ნატიფ სტრუქტურაზე დაკვირვებების და დამუშავების მეთოდი ზემოთ არის აღწერილი. დაკვირვება მიმდინარეობს შემდეგნაირად: სპექტროგრაფის ჭვრიტე წრიულია, აქვს რკალის 60 $^{\circ}$ - ფორმა, მისი რადიუსი ტოლია მზის გამოსახულების და ხელოვნური მთვარის გამოსახულების რადიუსის (სპექტროგრაფის ჭვტიტეზე მზის გამონასახის გამოსახულების 125 სმ). დამკვირვებელი მზისა და მთვარის გამონასახს ხდის სპექტროგრაფის ჭვრიტის კონცენტრულს, რის შემდეგაც სპექტროგრაფის ფოკალურ სიბრტყეში, სადაც დამონტაჟებულია CCD კამერა, მიიღება სპიკულების სპექტრი/სპექტროგრამა და იწყება დაკვირვება. CCD მატრიცის ზომების შეზღუდვის გამო კადრში არ ეტევა ჭვრიტის სრული გამოსახულება (60 $^{\circ}$), ეტევა მისი მხოლოდ ნაწილი (მესამედი), კუთხური ზომით 20 $^{\circ}$. სპიკულების სხვადასხვა სიმაღლეზე დაკვირვების საშუალებას იძლევა ჭვრიტის გადაადგილება, რაც შესაბამისი მოწყობილობით ხორციელდება. კუდეს ფოკუსში მზის გამონასახის მასშტაბი არის 16"მმ., სპექტროგრაფის გარჩევის უნარია 1Å/მმ. ჩვენი დაკვირვებების სივრცული და დროითი გარჩევადობა საკმარისად მაღალია, სპიკულების დოპლერის სიჩქარეების დროის მიხედვით ცვალობადობის შესამჩნევად/შესასწავლად. ორივე სერიის დაკვირვება მიმდინარეობდა მზის



ნახ. 16. მოყვანილია H α სპიკულების სამი სპექტროგრამა მეორე სერიიდან, კადრების გადაღების დროა TU=07^h01^m30^s, TU=07^h02^m56^s, TU=07^h05^m23^s. ვერტიკალური ღერძის მიმართულებით სპექტროგრამა ამოჭრის მზის აღმოსავლეთი კიდეის $\pm 10^\circ$ ეკვატორის სიმეტრიულად, ხოლო ჰორიზონტული ღერძის მიმართ დისპერსიაა მიმართული (0.96 Å/mm).

აღმოსავლეთ კიდეზე ეკვატორიდან დაახლოებით $\pm 10^\circ$ ფარგლებში. პირველ სერიაში მიღებულია 80 სპექტროგრამა, ხოლო მეორეში 75. ორივე სერიაში ამორჩეული და გაზომილ იქნა 21, და 13 სპიკულის დოპლერის სიჩქარეები. როგორც პირველ, ასევე მეორე სერიაში სპიკულებს მივანიჭეთ ნომრები 1–21–მდე და 1–13–მდე შესაბამისად. მთლიანობაში შესწავლილია 21+13 = 34 სპიკული. დაკვირვებული სპექტროგრამების ტიპიური სურათი/სპექტროგრამა მოცემულია ნახ. 16-ზე.

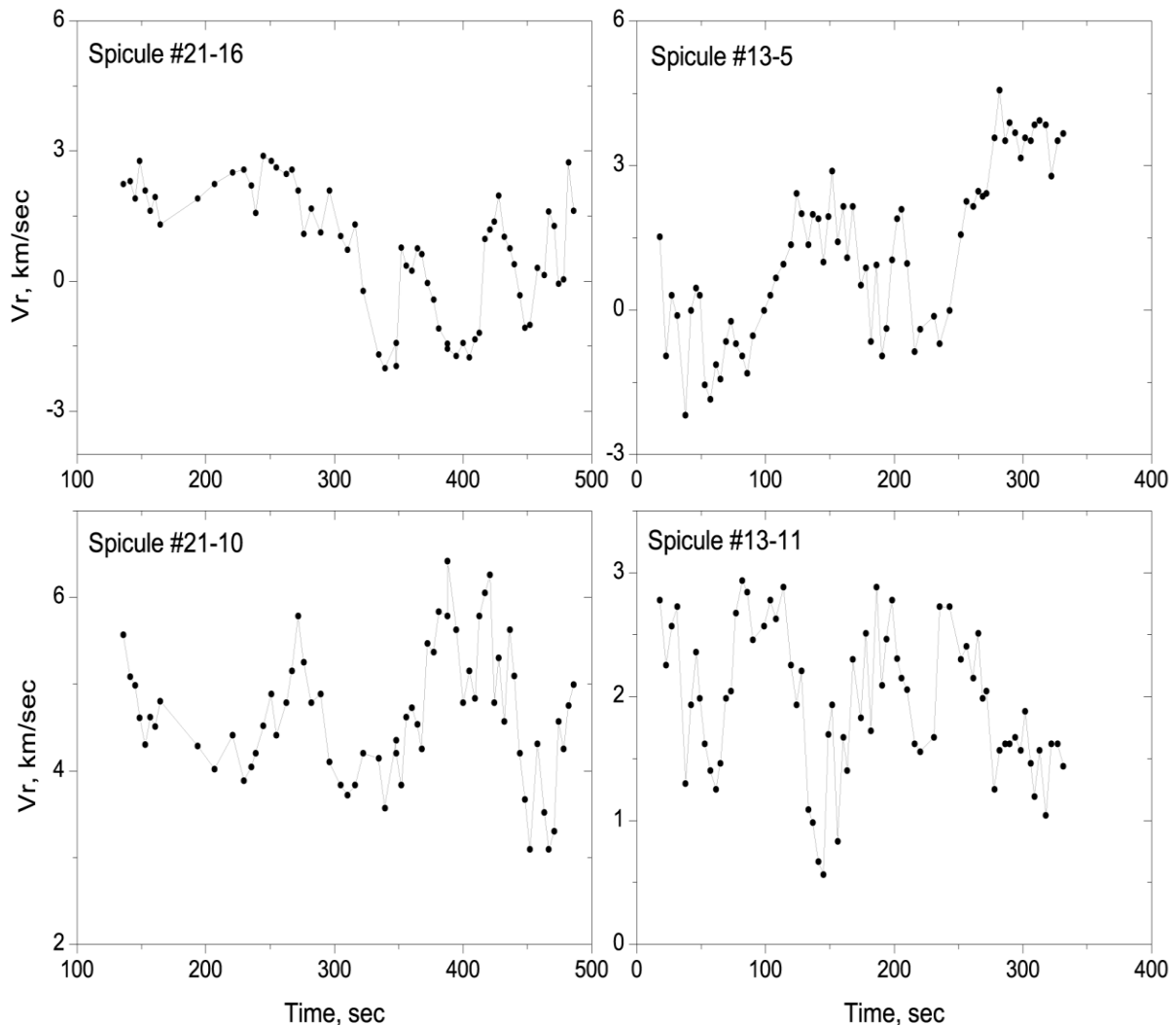
დოპლერის სიჩქარის განსაზღვრის სიზუსტე მკვეთრად არის დამოკიდებული სპიკულების გაიგივების სიზუსტეზე (de Moortel and Pascoe, 2012). დედამიწიდან მიღებულ დაკვირვებით მასალაში სპიკულების გაიგივება კი საკმარისად პრობლემატურია მათი ერთმანეთზე ზედდების გამო. სპიკულების სიმაღლე დაახლოებით იცვლება 6 500-15 000 კმ., ხოლო სიგანე 660 ± 200 კმ., მათი რიცხვი სიმაღლის ზრდასთან ერთად კლებულობს. ცხადია მაღალ სიმაღლეებზე ისინი

უფრო განცალკევებულები არიან და მათი გაიგივებაც შედარებით ცალსახაა და სანდო. ჩვენ სპიკულების სპექტროგრამებიდან შემღებებისდაგვარად ამოვარჩიეთ ისეთი განცალკევებული სპიკულები, რომელთა გაიგივებაც დროის მიხედვით შესაძლებელი იყო, თუმცა ასეთი მიდგომაც არ იძლევა სრულ გარანტიას, რომ ამ შემთხვევაში სპიკულების ზედდება გამორიცხულია.

მიუხედავად ამისა დედამიწის ზედაპირიდან დაკვირვებებიდან, რაც ბოლო პერიოდში არც თუ ისე ბევრია, დოპლერის სიჩქარის განსაზღვრის სიზუსტე დამაკმაყოფილებელია სპიკულებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესების პარამეტრების განსაზღვრისათვის. რათქმაუნდა დაკვირვებითი მასალა მიღებული უნდა იყოს მაღალი დროითი და სივრცული გარჩევით, რაც აბასთუმნის ობსერვატორიაში შეიძლება განხორციელდეს დიდი დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფზე დაკვირვებებით. ასეთი ტიპის დაკვირვებები აბასთუმნის ასტროფიზიკურ ობსერვატორიაში განხორციელდა (Khutsishvili, et al., 2014).

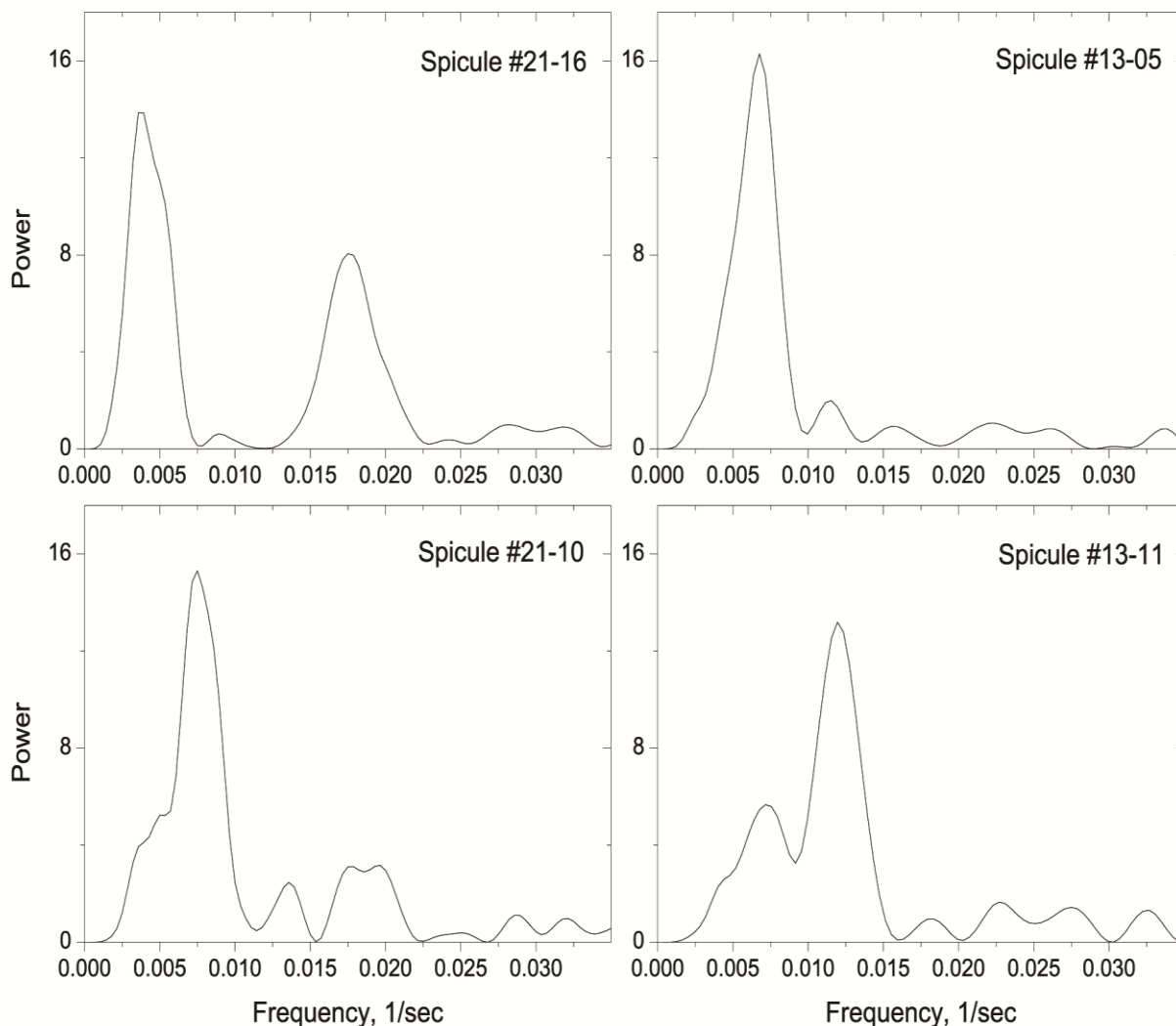
ნახ. 16-ზე მოყვანილი სპექტროგრამებიდან ნათლად ჩანს სპიკულების ცალსახა გაიგივების შესაძლებლობა. მაგალითად უხეშად, მაგრამ თვალითაც შეიმჩნევა 2 და 3 სპიკულების საპირისპირო გადაადგილება/დოპლერის სიჩქარეების. იგივე შეიძლება ვთქვათ 11 და 12 სპიკულებზე. ბოლო კადრზე 8 –სპიკული გაქრა. A ნიშნით მონიშნული სპიკულს თუ დავაკვირდებით სპიკულების ზედდება კარგად ჩანს და სხვა.

დოპლერის სიჩქარეების რხევების ამპლიტუდების მორფოლოგიური ანალიზი თვალნათლივ გვიჩვენებს ქრომოსფეროს სპიკულების დროის მიხედვით კვაზიპერიოდულ ცვლილების არსებობას. თუმცა პერიოდულად ზოგჯერ „შემთხვევითი“ ცვლილებები შეიმჩნევა. დოპლერის სიჩქარის დროის მიხედვით ცვლილების გრაფიკი გამოსახულია ნახ. 17-ზე.



ნახ.17. დოპლერის სიჩქარის დროის მიხედვით ცვლილების გრაფიკი. ნაჩვენებია დამუშავებული სპიკულებიდან ნებისმიერად აღებული 4 სპიკულისათვის.

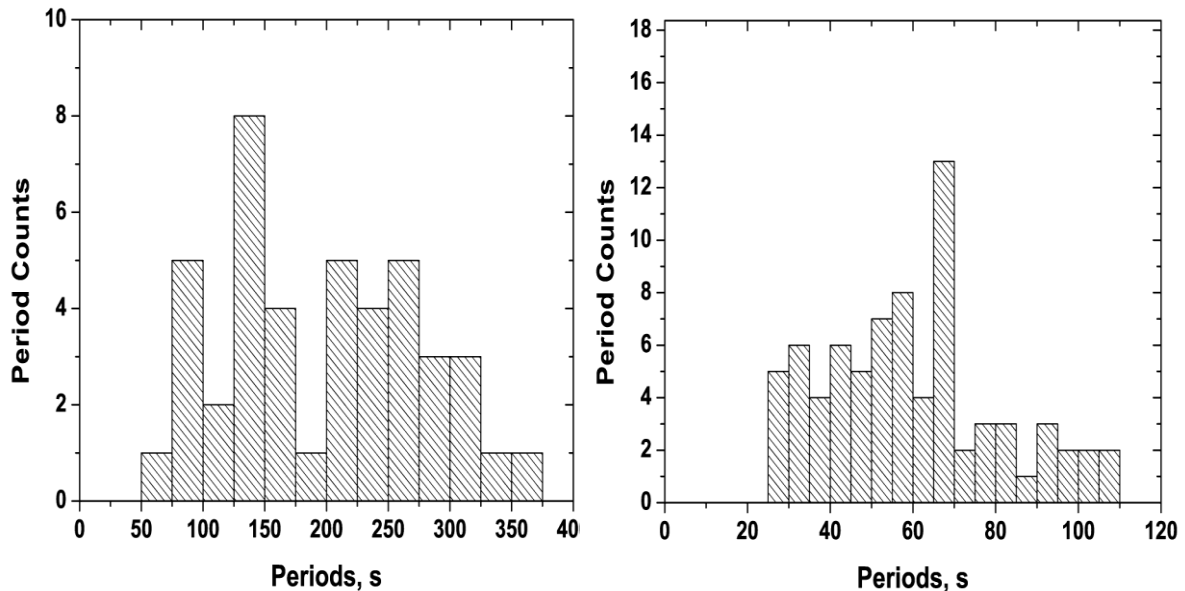
დაკვირვებული სპიკულების (~80-85 %) დოპლერის სიჩქარეები სპიკულის მთელი სიცოცხლის განმავლობაში განიცდიან რხევებს ნულოვანი სიჩქარის ირგვლივ. თუმცა მცირე რაოდენობის სპიკულების დოპლერის სიჩქარეები ირხევიან ნულოვანი სიჩქარისგან განსხვავებული სიჩქარეების ირგვლივ (მაგ. სპიკულები #21-10 და #13-11, ნახ. 17), რაც მიუთითებს სპიკულებში პლაზმის შედარებით არაპერიოდულ რხევებზე. დოპლერის სიჩქარეების ასეთი მცირერიცხოვანი ტენდენცია შეიძლება გამოწვეულ იქნეს ქრომოსფერული პლაზმის საერთო მოძრაობებით, რადიალური მიმართულებიდან გადახრილი სპიკულების მიმართ. საილუსტრაციოდ ამ ნახაზზე მარცნივ მოყვანილია პირველი სერიის 21 კადრზე/სპექტროგრამაზე გაზომილი 16 და 10 სპიკულის დოპლერის სიჩქარის ცვლილების გრაფიკი დროის მიხედვით, ხოლო მარჯვნივ მეორე სერიის 13 კადრზე/სპექტროგრამაზე გაზომილი 5 და 11 სპიკული, შესაბამისად.



ნახ.18. სპიკულების დოპლერის სიჩქარეების სიხშირის ცვლილების გრაფიკები

დამზერითი მასალის დასამუშავებლად ფურიეს მეთოდის მაგივრად გამოვიყენეთ ე. წ. "ლომბის პერიოდოგრამების მეთოდი" (Press et al. 1992). ეს მეთოდი განსაკუთრებით კარგია არათანაბარი ინტერვალების მქონე პერიოდულობის შესწავლისას, რაც ჩვენ შემთხვევას/დაკვირვებებს კარგად მიესადაგება (ჩვენს მიერ დაკვირვებულ სპექტროგრამებს შორის დროითი ინტერვალი არათანაბარია). თითოეული პერიოდოგრამიდან შევარჩიეთ პერიოდები, რომელთა სიმძლავრე მეტი იყო 1-ზე, ანუ თუნდაც ოდნავ გამოირჩეოდა თეთრი ხმაურისაგან. როგორც ჩვენი შეფასებებით გამოდის, დოპლერის სიჩქარის განსაზღვრის სიზუსტე ამ მასალაში აღწევს ± 0.3 კმ/წმ-ს. ამდენად, 3 სიგმიანი ამპლიტუდა აღწევს სწორედ პერიოდის ასეთ სიმძლავრეს. ამ მასალაში 95% სანდობის დონე არის 7.8 სიმძლავრის, ხოლო 99% - 9.5. ამგვარად ნახ.17. გამოსახულ სპიკულებისათვის პერიოდების სიზუსტის გაზრდისათვის ორივე ჯგუფში იდენტური დისკრეტული სიხშირეებისათვის გამოვითვალეთ საშუალო სიმძლავრეები და ავაგეთ საშუალო პერიოდოგრამა (იხ. ნახ. 18).

ნახ.18-ზე (მარცხნივ) მოყვანილ პიკებს, პერიოდის ერთეულებში აქვთ სტატისტიკა, რაც მიუთითებს პიკის საშუალო წერტილზე, მის შესაბამის სტანდარტულ ცდომილებაზე და პიკების პროფილების შესაბამის სტანდარტულ ცდომილებაზე. სპიკული #21-16 - (1) 271 ± 6 s; (2) 57 ± 1 s; სპიკული #21-10 - 136 ± 1 s; სპიკული #13-05 - 151 ± 1 s; სპიკული #13-11 - 84 ± 1 s.



ნახ.19. დოპლერის სიჩქარეების პერიოდების ცვლილების ჰისტოგრამა. მონაცემები ფილტრაციის გარეშე (მარცხნივ), მონაცემები ფილტრაციის შემდეგ (მარჯვნივ). გაფილტვრა მოვახდინეთ ორ დიპაზონში 0.009-0.016 (111-63 წმ) და 0.016-0.035 (63-28წ მ).

ნახ.19-ზე (მარცხნივ) მოყვანილია სპიკულების დოპლერის სიჩქარეების რხევის სიხშირეები მიღებული "ლომბის პერიოდოგრამების მეთოდით" (Press et al. 1992). ამ მასალაში სანდოობის დონე არის 95%. აქ დოპლერის სიჩქარეების მონაცემები დამუშავებული იყო ფილტრაციის გარეშე.

შემდეგ გამოვიყენეთ ფილტრაციის ცნობილი FFT მეთოდი დოპლერის სიჩქარეების მონაცემების ანალიზის სიზუსტის ასამაღლებლად. გაფილტვრა მოვახდინეთ ორ დიპაზონში 0.009-0.016 (111-63 წმ) და 0.016-0.035 (63-28 წმ). გაფილტვრული მონაცემები თავიდან იქნა დამუშავებული "ლომბის პერიოდოგრამების მეთოდით" (Press et al. 1992) და გამოვითვალეთ სიხშირეები. ამოვარჩიეთ ისეთი სიხშირეები, რომელთა სანდოობა იყო მეტი ვიდრე 95 %. მიღებული შედეგი მოყვანილია ნახ. 19- ზე (მარჯვნივ).

როგორც ნახაზიდან (19) ჩანს გამოიკვეთა განსხვავებული/ახალი პერიოდი, რომელის მოთავსებულია 75 – 50 წმ შუალედში, საშუალოდ დაახლოებით 65 წმ. ნახაზიდან ჩანს სხვა პერიოდებიც, მაგრამ ისინი, როგორც ჩანს (ჩვენი მოსაზრებით), სტატისტიკურად სანდოონი არ არიან.

დაკვირვებული მონაცემების ანალიზის საფუძველზე ჩვენ მივიღეთ დაჯგუფების ოთხი სიხშირე. ამ ჯგუფების პერიოდულობის ინტერვალი მოყვანილია ცხრილ 1-ში. ამ ცხრილის ბოლო სვეტი N მიუთითებს სპიკულების რაოდენობას. მაქსიმალური პიკის პერიოდია 167 – 358 წმ, საშუალოდ 254 წმ. 50 – 76 წმ საშუალოდ 65 წმ, დაიკვირვება 22 სპიკულში. მაშინ როცა 114 – 156 წმ, საშუალოდ 136 წმ, და 81 – 108 წმ, საშუალოდ 94 წმ, დაიკვირვება 12 სპიკულში.

ცხრილი 1.

##	სიხშირის ინტერვალი		პერიოდის ინტერვალი, წმ		საშუალო პერიოდი, წმ	სპიკულის რაოდენობა
1	0.00279	0.00598	358	167	254	22
2	0.00643	0.00876	156	114	136	12
3	0.00929	0.01235	108	81	94	12
4	0.01315	0.02001	76	50	65	22

ამგვარად ჩვენს მიერ შესწავლილი 34 სპიკულის დოპლერის სიჩქარეების მონაცემების ანალიზის საფუძველზე, შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ სპიკულების დოპლერის სიჩქარეების ცვლილება კვაზიპერიოდული ხასიათისაა:

- a) 167 – 358 წმ, (საშუალოდ 263) პერიოდი მკვეთრად გამოიყოფა ყველა დანარჩენი პერიოდებისაგან და მისი საშუალო სიმძლავრე მნიშვნელოვნად აღემატება 95% -იანი საიმედოობის ზღვარს. რაც შეიძლება გამოწვეული იყოს ფოტოსფეროში არსებული გლობალური რხევების ზემოქმედებით;
- b) ნათლად შეიმჩნევა 114 – 156 წმ (საშუალოდ 135) წამიანი პერიოდი, რომლის საშუალო სიმძლავრე ახლოსაა 95% - იან საიმედოობის ზღვართან; რაც შეიძლება გამოწვეული იყოს სპიკულების მაგნიტურ მილში გავრცელებული გრეხვითი ტალღების რხევებთან.
- გ) პერიოდი 81 – 108 წმ (საშუალოდ 95) სიდიდით, რომლის საშუალო სიმძლავრე არ არის მაღალი, სპიკულების ორივე ჯგუფისათვის სიხშირის თანაბარ მნიშვნელობას იძენს;
- დ) პერიოდების 50 – 76 წმ (საშუალოდ 63) საშუალო სიმძლავრეები იმდენად მცირეა, რომ მათი აღბათობა შედარებით დაბალია.

ბოლო ორი რხევის პერიოდი შეიძლება დაკავშირებულია სპიკულებში გავრცელებულ ტალღებთან. ცნობილია, რომ სპიკულების საშუალო სიციცხლის ხანგრძლივობაა 5-6 წთ, ან ცოტა მეტია, ამიტომ ისინი მიეკუთვნებიან კლასიკურ I სპიკულებს.

§ 3.3. ქრომოსფერული სპიკულების დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების დროში ცვლილება, ასიმეტრია

მზის სპექტრული დაკვირვებების საფუძველზე მზის წარმონაქმნების და აქტიური არეების მოდელების შექმნას მრავალი სამუშაო მიეძღვნა. მათ შორის, მრავალი მოდელის ძირითად არასრულფასოვნებას წარმოადგენს მზის ატმოსფეროში სიმაღლის შემოსაზღვრულობა. გარდა ამისა, სხვადასხვა აქტიური არეებისთვის არც თუ ისე ხშირად განიხილება მოდელების ცვლილება.

ქრომოსფერული და კორონალური სპექტრული ხაზის სიგანის ცვლილების მექანიზმის გარკვევა სიმაღლის ზრდის მიხედვით ერთ-ერთ ძირითად ამოცანას წარმოადგენს (მაგ., Nikolsky and Platova, 1971, Kulidzanishvili, Nikolsky, 1978), თუმცა არსებობს ამ პროცესის ახსნის რამდენიმე მოდელი. აღნიშნული ამოცანის შესწავლა აბასთუმნის ასტროფიზიკურ ობსერვატორიაში გასული საუკუნის სამოცდაათიან წლების მეორე ნახევარში დაიწყო და დღესაც გრძელდება (მაგ., Kulidzanishvili, 1978, 1983, 1982, Khutsishvili, 1986, 1995, Zaqarashvili, 2003, Kukhianidze, Zaqarashvili, Khutsishvili, 2006).

მზის სპიკულები არიან კორონასთან შედარებით ცივი ამონატყორცნები ქრომოსფეროს პლაზმისა, რომლებიც ვრცელდებიან კორონაში მზის კიდიდან რამდენიმე ათეულ ათას კილომეტრზე. მათი შესწავლა მიმდინარეობს თითქმის ერთი საუკუნის განმავლობაში, მაგრამ მათ ფორმირება და დინამიკა ჯერ კიდევ ბოლომდე არ არის შესწავლილი. კლასიკური გაგებით სპიკულების (სპიკული I) საშუალო სიციცხლის ხანგრძლივობა დაახლოებით 3-15 წუთს შეადგენს, ხოლო დიამეტრი და აღმავალი სიჩქარეები დაახლოებით 500-600კმ და 15-40 კმ/წმ. შესაბამისად (მაგ., Beckers 1968; Pereira et al. 2012; Pasachoff et al. 2009).

ჩვენს მიერ ადრეც იყო აღნიშნული, რომ გარეატმოსფერულმა დაკვირვებებმა (მაგ., Hinode) აღმოაჩინა ახალი ტიპის სპიკულები (სპიკული II), რომელთა საშუალო სიციცხლის ხანგრძლივობა დაახლოებით 10-150 წამია, ხოლო დიამეტრი და სპიკულებში პლაზმის აღმავალი სიჩქარეები დაახლოებით 200 კმ და 50-100 კმ/წმ, შესაბამისად (მაგ., De Pontieu et al. 2007a; Pereira et al. 2012, 2013; Sekse et al. 2013; Zhang et al. 2012). აქედან გამომდინარე, სპიკულ-II ბევრად უფრო სწრაფებია და მათ ბევრად უფრო მოკლე სიციცხლის ხანგრძლივობა აქვთ, ვიდრე სპიკულ-I-ს. ეს შეიძლება აიხსნება სპიკული-II-ის მაღალი ტემპერატურით, ვიდრე სპიკული-I-ისა (მაგ., IRIS დაკვირვებები, Pereira et al. 2014), მაგრამ გაცხელების მექანიზმი ჯერ კიდევ ბოლომდე არ არის შესწავლილი, შეიძლება ითქვას უცნობია.

ცოტა ხნის წინ ქურიძემ და მისმა კოლეგებმა (2015, 2016) წამოაყენეს იდეა, რომ მეორე ტიპის სპიკულების Kelvin-Helmholtz (KH)-ის არამდგრადობა გამოწვეულია მაღალი სიჩქარეების ნაკადით და მათი მაღალი ტემპერატურით, რაც გამოწვეულია ნეიტრალური იონების დაჯახებებით, ამან კი შეიძლება გამოიწვიოს

სპექტრული ხაზების არა-თერმული გაფართოვება. ამიტომ დროში სპექტრული ხაზის ნახევარსიგანის ცვლილების შესწავლას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება.

სპიკულებში გავრცელებულმა მაგნიტოჰდროდინამიკურმა ტალღებმა (MHD) დაკვირვებით ასპექტში შეიძლება გამოიწვიოს განსხვავებული რხევითი პროცესები. სპიკულებზე დაკვირვებითი მონაცემების ანალიზის შედეგად ნიკოლსკიმ და პლატოვამ (1971) მიიღეს, რომ სპიკულების ღერძის კვაზი-პერიოდული გადაადგილების/რხევის პერიოდს შეადგენს 1 წუთს. მკვლევარებმა (Kukhianidze et al., 2006 and Zaqarashvili et al., 2007) მიიღეს, რომ დროში დოპლერის სიჩქარეების რხევის პერიოდი დაახლოებით მოთავსებულია 30-100 წამის შუალედში (იხ. აგრეთვე Kimet al. 2008; Ebadi et al. 2012; Khutshishvili et al. 2014). მსგავსი პერიოდები დაფიქსირა მაღალი სივრცული და გარჩევით მიღებულმა გარეატმოსფერულმა (Hinode / SOT) დაკვირვებებით მიღებულმა მონაცემებმა (მაგ., De Pontieu et al. 2007a, 2007b; He et al. 2009a, 2009b; Morton et al. 2012). დოპლერის სიჩქარეების პერიოდული ცვლილება გამოწვეულია (MHD) ტალღებით, მიუთითებენ მკვლევარები (Zaqarashvili and Murawski 2007; Erdelyi and Fedun 2007).

შდარებით ადრე მკვლევარებმა (Kulidzanishvili and Nikolsky 1978; Kulidzanishvili 1980; Kulidzanishvili and Zhugzhda 1983; Khutsishvili 1986; De Pontieu et al. 2003; Xia et al. 2005; Ajabshirizadeh et al. 2008) აღმოაჩინეს დოპლერის სიჩქარეების რხევის პერიოდები 3-7 წუთის შუალედში (პიკი 5 წთ). ასეთი პერიოდულობა შეიძლება აიხსნას ფოტოსფერული p-მოდის გაჟონვით დახრილი მაგნიტური ძალწირების გასწვრივ (მაგ., De Pontieu и др. 2004) ან დარტყმითი ტალღების კვაზი-პერიოდული ცვლილებით (მაგ., Murawski and Zaqarashvili 2010; Murawski et al. 2011), რაც შეიძლება გახდეს ქრომოსფერული პლაზმის გაფართოების მიზეზი (იხ. აგრეთვე Judge et al., 2011). სპიკულებში არსებული რხევები და ტალღების გავრცელების ბუნება განხილულია ნაშრომში (Zaqarashvili and Erdelyi 2009).

ადრინდელმა დედამიწისზედა სპექტრული დაკვირვებებით მიღებულმა მონაცემებმა უჩვენა სპიკულების (სპიკული I) ღერძის დახრა, რაც სპიკულების ბრუნვით ახსნეს (მაგ., Pasachoff и др. 1968). როგორც სპიკული-II-ში, ასევე მაკრო-სპიკულებში დაფიქსირებულია ბრუნვითი ხასიათის მოძრაობები (მაგ., Kamio et al. 2010; Curdt et al. 2012; De Pontieu et al. 2012, 2014), რაც შეიძლება დამთავრდეს კორონაში მათი გაბნევით (მაგ., Kamio et al. 2010; Curdt et al. 2012; De Pontieu et al. 2012, 2014; Nistico et al. 2009; Morton et al. 2012; Raouafi et al. 2016).

სპექტროსკოპული დაკვირვებებით ვლინდება, რომ სპიკულებში გრეხვითი ტალღები იწვევენ პერიოდულ განივ მოძრაობებს, რაც შეიძლება გახდეს მიზეზი დოპლერის სიჩქარეების პერიოდული ცვლილებისა. სპიკულებში გავრცელებული ტალღები ხასიათდებიან აზიმუტალური სიჩქარეებით, რაც შეიძლება გახდეს მიზეზი სპექტრული ხაზის ნახევარსიგანის პერიოდული არასითბური გაგანივრებისა (მაგ., Goossens et al. 2014). ალფენის ტალღებმაც შეიძლება იგივე პროცესი გამოიწვიოს (მაგ., Zaqarashvili 2003; Zaqarashvili and Murawski 2007; djec et

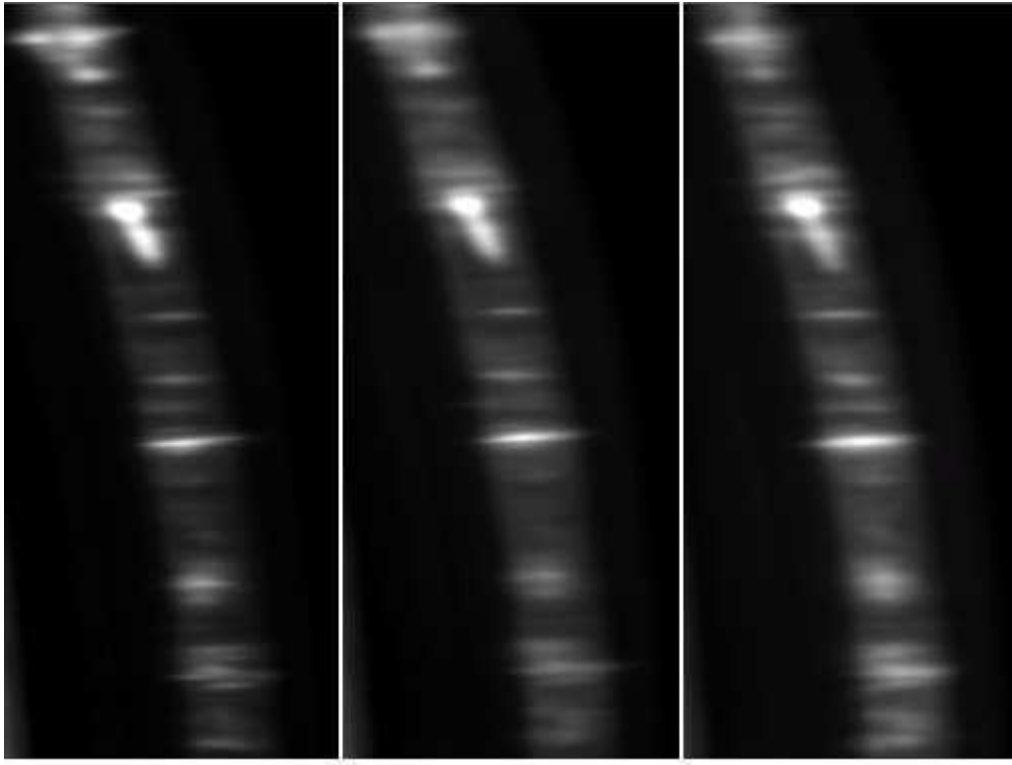
al. 2009). ამიტომ კიდევ ერთხელ გვინდა ავღნიშნოთ, რომ დროში დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების ცვლილების შესწავლას დიდი მნიშვნელობა ენიჭება.

აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის 53 სმ ლიოს ტიპის კორონოგრაფის, მაღალი დისპერსიის სპექტროგრაფის (6 000 Å ტალღის სიგრძეზე მეორე რიგში დისპერსია 0. 96 Å/მმ) და მუხტკავშირიანი სინათლის მიმღების Apogee CCD U9000 (პიკსელების რაოდენობა 3056 x 3056; პიკსელების ზომა 12 x 12 მიკრონი; გამოსახულების ზომა 36.7 x 36.7მმ; გამოსახულების დიაგონალი 51.9 მმ;) გამოყენებით 24,25-09-2012 და 17,18,19.10.2012 პერიოდში დაკვირვებულ იქნა ქრომოსფერული სპიკულები.

ტელესკოპის ებერტა-ფასტის (Ebert-Fastie) სისტემის სპექტროგრაფი, აღჭურვილია 230მმx250მმ ფართის დიფრაქციული მესერით. მესერის 1მმ დამტრიხულია 600 შტრიხით, რომელსაც ხილულ არეში (4 000 – 6 000 Å) მაქსიმალური კონცენტრაცია აქვს სპექტრის მე-2-ე რიგში. ინსტრუმენტის გარჩევის უნარი სპექტროგრაფის ფოკალურ სიბრტყეში 25 ხაზია ერთ მილიმეტრში. მეორე რიგში სპექტროგრაფის გარჩევის უნარია-0.04 Å /მმ.

კორონოგრაფის სპექტროგრაფის ჭვრიტეზე კუდეს ფოკუსში მზის გამონასახის დიამეტრია 125 მმ, ექვივალენტური საფოკუსო მანძილი ტოლია 13 მეტრის. სპექტრის კუთხური მასშტაბი ტოლია 16 რკალის სეკუნდისა მილიმეტრში.

დაკვირვების და დამზერითი მასალის მეთოდოლოგია აღწერილია § 2.2 და § 2.3. ჩვენს მიერ მიღებული H α -სპიკულების სპექტროგრამები მიღებულია მზის კიდიდან ქრომოსფეროს დაახლოებით 7 500 კმ სიმაღლეზე. ყველა დაკვირვებებისათვის ექსპოზიციის ხანგრძლივობა 0.3 წამია, სპექტროგრამებს შორის დროის შუალედი საშუალოდ 4.5 წამია, ხოლო დაკვირვების ხანგრძლივობა შეადგენს დაახლოებით 17-19 წუთს. სერიებს შორის დროის შუალედი დაახლოებით ტოლია 15-20 წთ. სივრცული და დროითი გარჩევადობა ჩვენს დაკვირვებებში საკმარისად მაღალია, რათა დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეები გაზომილი იყოს საკმარისად ზუსტად. დაკვირვება მიმდინარეობდა მზის აღმოსავლეთ კიდეზე ეკვატორიდან $\pm 10^\circ$ ფარგლებში. ნახ.20. მოყვანილია H α -სპიკულების ტიპიური სპექტროგრამები.



a. UT=5h 52m 08s, $t=+3s$ b. UT= 5h 52m 37s, $t=+32s$ c. UT=5h 52m 55s, $t=+50s$

ნახ.20. მოყვანილია 24.09.2012 დამზერილი H α სპიკულების ტიპური სპექტროგრამები, რომლებიც გადაღებულია დროის გნსხვავებულ შუალედში. ილუსტრაციის ქვეშ ნაჩვენებია დაკვირვების დრო (UT) და სპექტროგრამებს შორის დროითი ინტერვალი (t). ვერტიკალური ღერძის მიმართულებით სპექტროგრამა ამოჭრის მზის აღმოსავლეთი კიდის $\pm 10^\circ$ ეკვატორის სიმეტრიულად, ხოლო ჰორიზონტული ღერძის მიმართ დისპერსიაა (0.96 Å/mm) მიმართული. სპექტროგრამები გადაღებულია ქრომოსფეროს 7500კმ სიმაღლეზე მზის კიდიდან. სპექტროგრამებზე განფენილი შედარებით კაშკაშა წარმონაქმნები წარმოადგენს პროტუბერანცებს. დაკვირვებითი მასალიდან ნათლად ჩანს სპიკულების გაიგივების კარგი შესაძლებლობა.

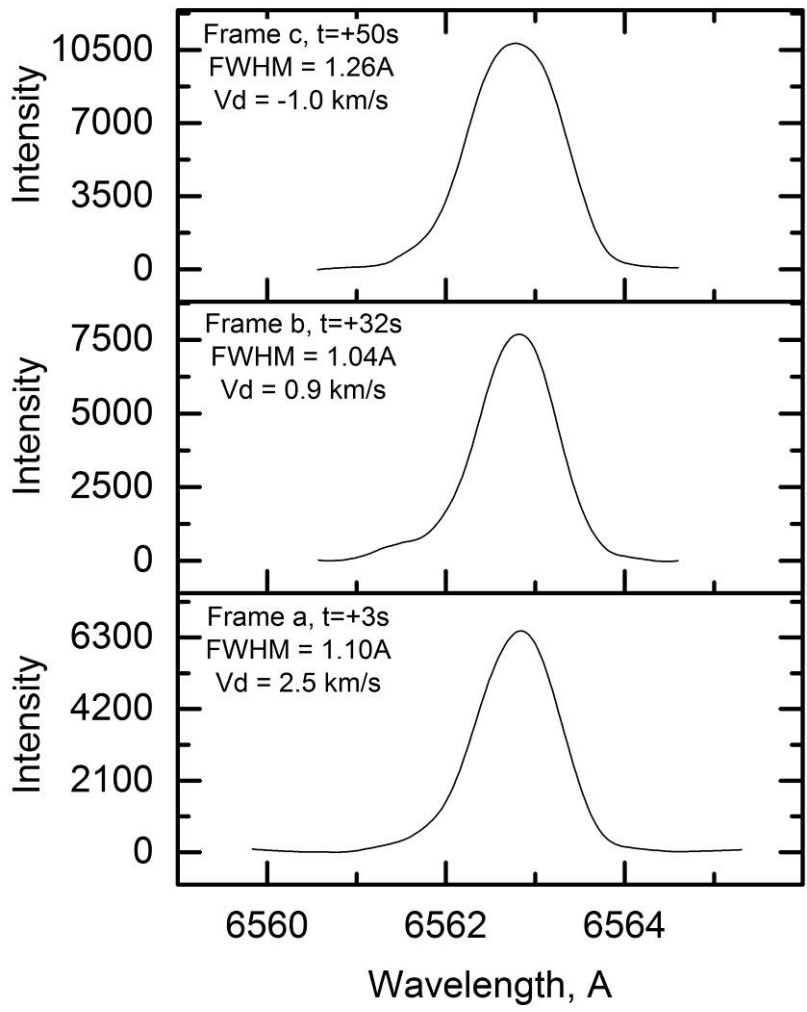
ცნობილია, რომ მზის კიდიდან სიმაღლის ზრდასთან ერთად სპიკულების, როგორც რაოდენობა, ასევე ინტენსივობა მცირდება, ასევე მცირდება რამდენიმე სპიკულის ერთმანეთზე ზედდების ალბათობა. როგორც აღვნიშნეთ სპიკულებს დავაკვირდით 7500 კილომეტრზე მზის კიდიდან. აღნიშნულ სიმაღლეს H α სპიკულების გარკვეული რაოდენობა ვერ აღწევს (სპიკულები სხვადასხვა სიმაღლისანი არიან). აღნიშნულ სიმაღლეზე სპიკულების ერთმანეთის ზედდების/გადაფარვის ალბათობა შედარებით ნაკლებია, ვიდრე დაბალ სიმაღლეზე (მაგალითად 4 000კმ). ამიტომ ისინი შედარებით „განცალკევებულნი“ ჩანან, რასაც შემდგომში „იზოლირებულად“ მოვიხსენიებთ. გამორიცხული არ არის, რომ გაზომილი სპიკულებიდან ზიგიერთი ცალკეული სპიკულებია. დასამუშავებლად პირველ სპექტროგრამაზე ამოვარჩიეთ ისეთი სპიკულები, რომლებიც შედარებით „განცალკევებულად“ ჩანდა და თვითეული დავნომრეთ. მომდევნო სპექტროგრამაზეც იგივე სპიკულები ამოვარჩიეთ დ. ა. შ.

დასამუშავებლად დაკვირვებითი მასალიდან შერჩეული იქნა 35 სპიკული, რომლებიც დამაჯერებლად/ცალსახად იგივდება ყველა სპექტროგრამაზე.

როგორც უკვე აღვნიშნეთ დაკვირვებულ სპექტროგრამებს შორის დროით ინტერვალი არის 4.5 წამი. სინამდვილეში სპექტროგრამებს შორის დროითი ინტერვალი 2-3 წამია, რომელიც მოიცავს დაკვირვების ექსპოზიციასა (0.3 წმ) და გამონასახის გადატვირთვის სიჩქარეს CCD მატრიციდან კომპიუტერში. ჩვენს მიერ მიღებულ დაკვირვებით მასალაში ყველა სპექტროგრამა ერთნაირად მაღალი ხარისხის არ არის (როგორც ყოველთვის ხდება დაკვირვებებში, მიზეზი შეიძლება მზის სხივებზე დედამიწის ატმოსფეროს ტურბულენტობის გავლენა იყოს ან ტელესკოპის ოპტიკა და ა.შ.), ამიტომ შედარებით დაბალი ხარისხის სპექტროგრამები არ დავამუშავეთ (ეს დაახლოებით დაკვირვებითი მასალის 30%-ს შეადგენს), რამაც გამოიწვია სპექტროგრამებს შორის დროითი ინტერვალის გაზრდა და გახდა დაახლოებით 4.5 წამი. ამიტომ დაკვირვებითი მონაცემების დასამუშავებლად გამოვიყენეთ მონაცემების არათანაბარი ინტერვალების მქონე პერიოდულობის შესასწავლი ცნობილი "ლომბის პერიოდოგრამების მეთოდი", რათა შეგვესწავლა დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების დროის მიხედვით ცვლილების ბუნება.

მეორეს მხრივ, თუ მხედველობაში მივიღებთ, რომ $H\alpha$ ოპტიკურად საკმარისად განიერი ხაზია, მაშინ შესაძლებელია, რომ პლაზმურ ემისიას ჩვენ ვხედავთ სპიკულის ზედაპირიდან და არა მის შიგნიდან. ამ შემთხვევაში ჩვენს მიერ გაზომილი დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეები იქნება სპიკულის ზედაპირის პლაზმური ელემენტების შესაბამისი. ამან შესაძლებელია იმოქმედოს დოპლერის სიჩქარეების და ნახევარსიგანეების ბუნებაზე. ამიტომ დასკვნების გაკეთებაში ჩვენ ფრთხილად უნდა ვიყოთ. გარდა ამისა $H\alpha$ ხაზის პროფილიც გარკვეულ წილად რთული და დამახინჯებულია (მაგ., სპიკულების სისქის გამო და სხვა), რომელსაც შეიძლება ჰქონდეს გარკვეული თავისებურებები (სპიკულების ზედდება იწვევს სპექტრის ასიმეტრიას), რაც დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების განსაზღვრის სიზუსტეზე გარკვეულ გავლენას მოახდენს და სხვა. ამიტომ აუცილებელია ცდომილებების ყველა შესაზლო დამახინჯებების გათვალისწინება.

ნახ.21 -ზე მოცემულია ჩვენს მიერ გაზომილი დაკვირვებითი მასალიდან სპონტანურად ამორჩეული $H\alpha$ - სპიკულების სპექტრის პროფილები, რომელსაც, როგორც გრაფიკიდან ჩანს საკმარისად კარგი სახე აქვს და აქედან გამომდინარე ჩვენს მიერ მიღებულ დაკვირვებით ფიზიკურ პარამეტრებიც საკმარისად სანდოა.



ნახ.21. ნაჩვენებია ზოგიერთი დამუშავებული სპიკულების კორექტირებული პროფილები. აქ გამორიცხულია ფონის მიერ გამოწვეული შესაძლო ცდომილებები.

დაკვირვებულ სპექტროგრამებზე გაზომვები ჩატარებული იქნა ჩვენს მიერ ამორჩეულ ყველა სპიკულზე, რის შედეგადაც მივიღეთ დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების განაწილება დროის მიხედვით.

დაკვირვებული სპიკულების სპექტროგრამების დამუშავების მეთოდიკა აღწერილია §2.3-ში. დაკვირვებული მასალის გაზომვით მიღებული დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების მონაცემები გავფილტრეთ ზემოთ აღწერილი ფილტრაციის ცნობილი FFT მეთოდით და დავადგინეთ მათი განსაზღვრის სიზუსტე. მივიღეთ, რომ დოპლერის სიჩქარეების გაზომვის სიზუსტეა ± 0.3 კმ/წმ, ხოლო ნახევარსიგანეების ± 0.03 Å. H α - სპიკულების ნახევარსიგანეების FWHM და დოპლერის სიჩქარეების დროის მიხედვით პერიოდულობის დასადგენად გამოვიყენეთ მონაცემების არათანაბარი ინტერვალების მქონე პერიოდულობის

ცხრილი 2

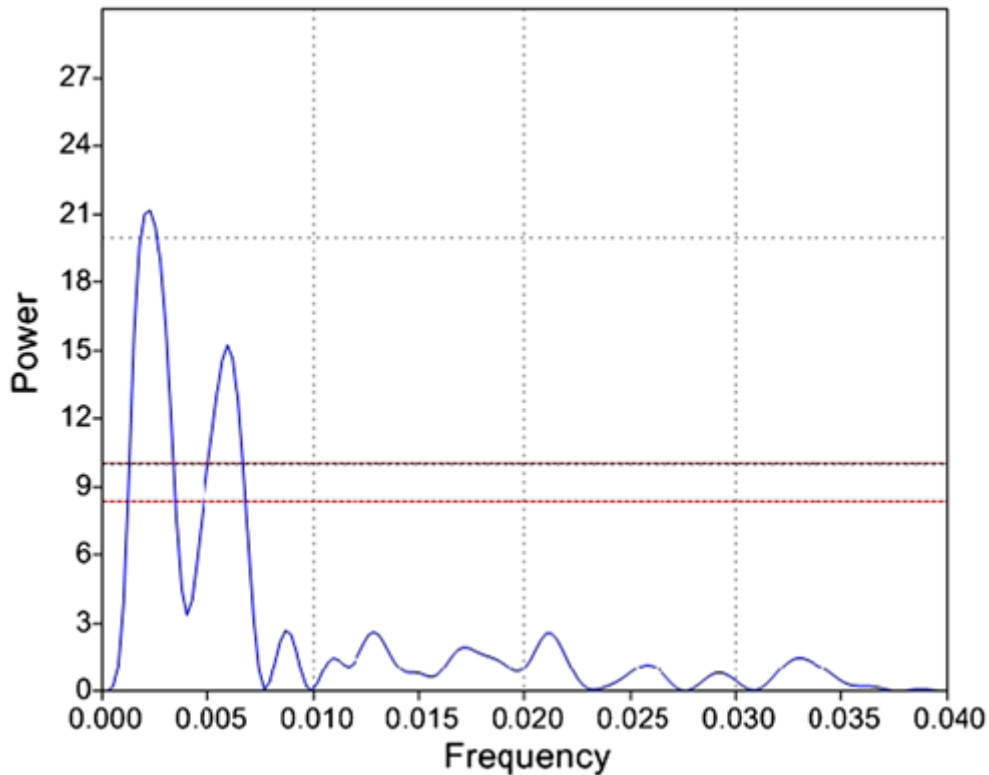
სპიკულის დაკვირვების თარიღი და ნომერი		ნახევარსიგანე			დოპლერის სიჩქარე		
		პერიოდი, წმ	ფაზა	ამპლიტუდა, Å	პერიოდი, წმ	ფაზა	ამპლიტუდა, კმ/წმ
17-10-12	#1	529	-1.6	0.05	700	-0.3	1.8
		306	-2.3	0.03	368	-2.1	6.3
					356	1.2	5.6
17-10-12	#6	736	-1.9	0.06	734	2.6	1.9
		409	0.7	0.03	394	1.0	0.7
					300	-1.2	0.5
18-10-12	#1	505	1.6	0.05	505	-2.9	1.0
		238	2.4	0.03	197	1.0	0.8
		116	0.0	0.02	84	-1.5	0.3
18-10-12	#2	645	-1.5	0.10	645	1.0	1.4
		534	2.2	0.05	534	-2.1	0.9
					278	1.5	0.4
18-10-12	#3	265	-3.0	0.07	244	0.4	3.1
		95	-0.3	0.01	168	-0.7	1.4
					92	-2.8	1.1
					69	-0.5	0.7
18-10-12	#6	879	1.5	0.11	880	-2.2	6.7
		512	1.2	0.07	814	1.3	5.7
		350	1.6	0.04	279	0.1	0.7
					141	0.9	0.3
19-10-12	#5	538	-1.6	0.17	483	1.7	8.5
		384	2.9	0.10	342	-0.3	38.1

		137	3.0	0.04	330	3.0	33.6
		111	0.6	0.05	175	-1.1	0.6
25-09-12	#1	451	0.4	0.05	451	2.4	1.6
		233	1.7	0.08	238	-1.4	1.1
		140	0.2	0.02	147	-0.3	0.9
25-09-12	#4	612	0.7	0.02	612	-2.6	1.9
		387		0.02	283	-1.6	0.8
					168	-2.7	0.7
					152	2.4	0.8
25-09-12	#5	547	1.9	0.07	547	-0.6	1.2
		269	-2.1	0.04	255	-2.7	0.8
		166	0.3	0.03	139	2.7	0.3

შესასწავლი "ლომბის პერიოდოგრამების მეთოდი" (Press et al. 1992). როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ჩვენ დაკვირვებებს ეს მეთოდიკა კარგად შეესაბამება.

ჩვენს მიერ მიღებული დაკვირვებების გაზომვებით მიღებული შედეგები (მოყვანილია ზოგიერთი სპიკულის მონაცემები) მოყვანილია ცხრილ 2-ში. პირველ სვეტში მოცემულია დაკვირვების თარიღი და სპიკულისათვის ჩვენს მიერ პირობითად მინიჭებული ნომერი. ხოლო მეორე (ნახევარსიგანები) და მესამე (დოპლერის სიჩქარეები) სვეტებში მოცემულია პერიოდები, ფაზები და ამპლიტუდები შესაბამისად. ამ მასალაში 95% სანდოობის დონე არის 9.0 სიმძლავრის, ხოლო 99% - 10.7, შესაბამისად. ამგვარად თითქმის მიღებული ყველა შედეგისათვის სანდოობის დონე საკმარისად მაღალია.

დოპლერის სიჩქარეების პერიოდოგრამის გრაფიკი მოყვანილია ნახ.22 - ზე. აბსცისათა ღერძზე გადაზომილია სიხშირე, რომელიც მოიცავს 6560 - 6565 Å დიაპაზონში, ხოლო ორდინატთა ღერძზე გადაზომილია სიმძლავრე.



ნახ.22 - ზე მოცემულია ერთ-ერთი H α - სპიკულის (#1, 18.10.12) დოპლერის სიჩქარის რხევის პერიოდოგრამა.

ორი ჰორიზონტული ხაზი მიუთითებს 95% (ქვედა ხაზი) და 99% (ზედა ხაზი) სანდოობის დონეს. ნახაზზე გამოკვეთილია ორი პიკი (505 წმ და 197წმ). რომელებიც აჭარბებენ სანდოობის დონეს.

ჩვენს მიერ მიღებული დაკვირვებითი შედეგები მიუთითებენ, რომ დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეები განიცდიან პერიოდულ რხევებს.

დაკვირვებული პერიოდები ძირითადად მეტია 3 წუთზე (> 180 წმ). პერიოდები განაწილებულია 4 – 9 წუთიან (240-540 წმ) შუალედში. პერიოდულობის მექანიზმის ასახსნელად ჩვენ გავანალიზეთ, ფაზის მიხედვით თუ რა დამოკიდებულება არსებობს დოპლერის სიჩქარეებსა და ნახევარსიგანეებს შორის. ამიტომ მოვახდინეთ ფილტრაცია სხვადასხვა პერიოდის (60წმ, 100წმ, 200წმ) მიხედვით.

შესწავლილი H α სპიკულების დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების რხევები ძირითადად ანტიკორელაციაშია ან ფაზაში წანაცვლებულიები არიან და იშვიათ შემთხვევაში არიან კორელაციაში; ანტიკორელაცია მატულობს გრძელპერიოდის ცვლილებებისათვის ანუ ანტიკორელაცია უფრო მეტად არის გამოხატული გრძელპერიოდის ცვლილებებისათვის.

არსებობს სპიკულების მცირე ჯგუფი რომლებისთვისაც დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების დროის მიხედვით ცვლილება, კერძოდ ანტიკორელაცია

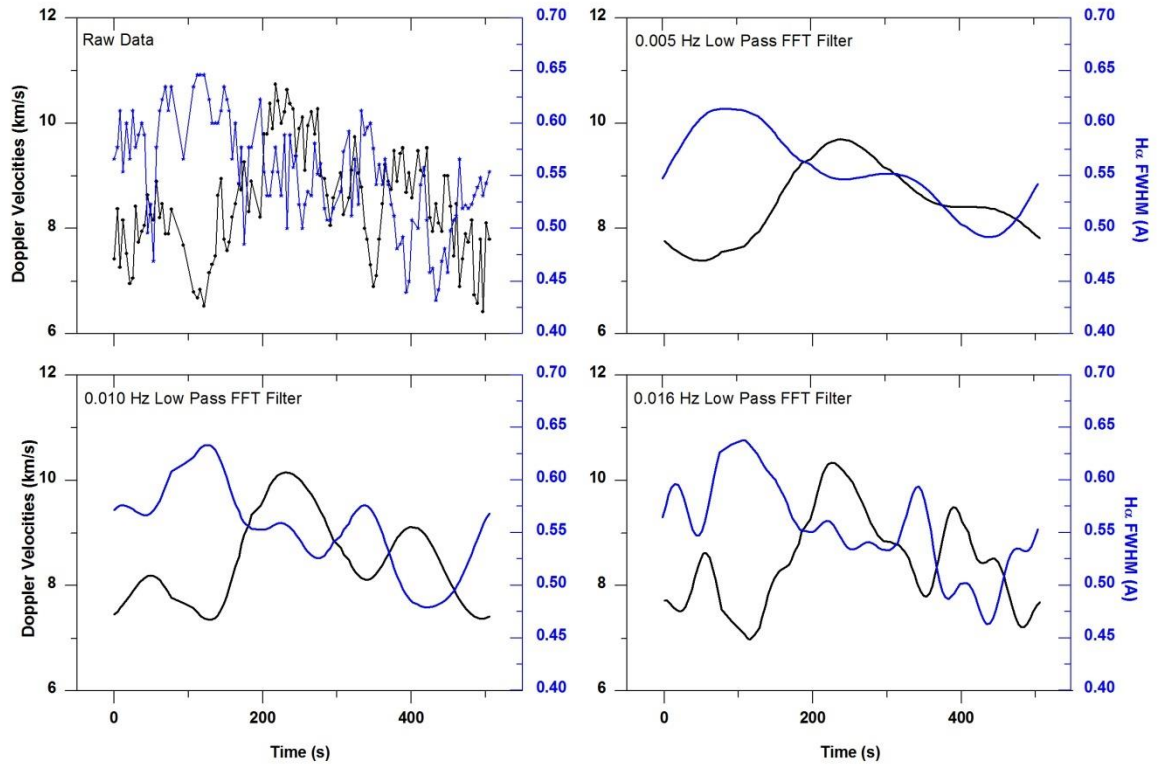
შედარებით ნაკლებად არის გამოხატული, გარდა ამისა ცვლილების მაქსიმუმებს და მინიმუმებს შორის დროის მიხედვით მცირე წანაცვლება შედარებით მეტად არის გამოხატული. ასეთი სპიკულების რაოდენობა ჩვენ გაზომვებში საკმარისად მცირეა. იშვიათ შემთხვევაში დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების დროის მიხედვით ცვლილება არიან კორელაციაში.

შესწავლილი ყველა 35 სპიკულებიდან მეტ ნაკლებად უჩვენებენ დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების დროის მიხედვით ცვლილების ანტიკორელაციას. ნახ.23-30-ებზე მოგვყავს სპონტანურად აღებული 8 სპიკულის დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების დროის მიხედვით ცვლილების, როგორც გაუფილტრავი, ასევე გაფილტრული გრაფიკები.

სპიკულების დოპლერის სიჩქარეების და ნახევარსიგანეების პერიოდული ცვლილებების შესადარებლად გამოვიყენეთ ფილტრაციის ცნობილი FFT მეთოდი სხვადასხვა სიხშირეებისათვის: 0.016ჰც (60 წმ), 0.01 ჰც (100 წმ) და 0.005ჰც (200 წმ).

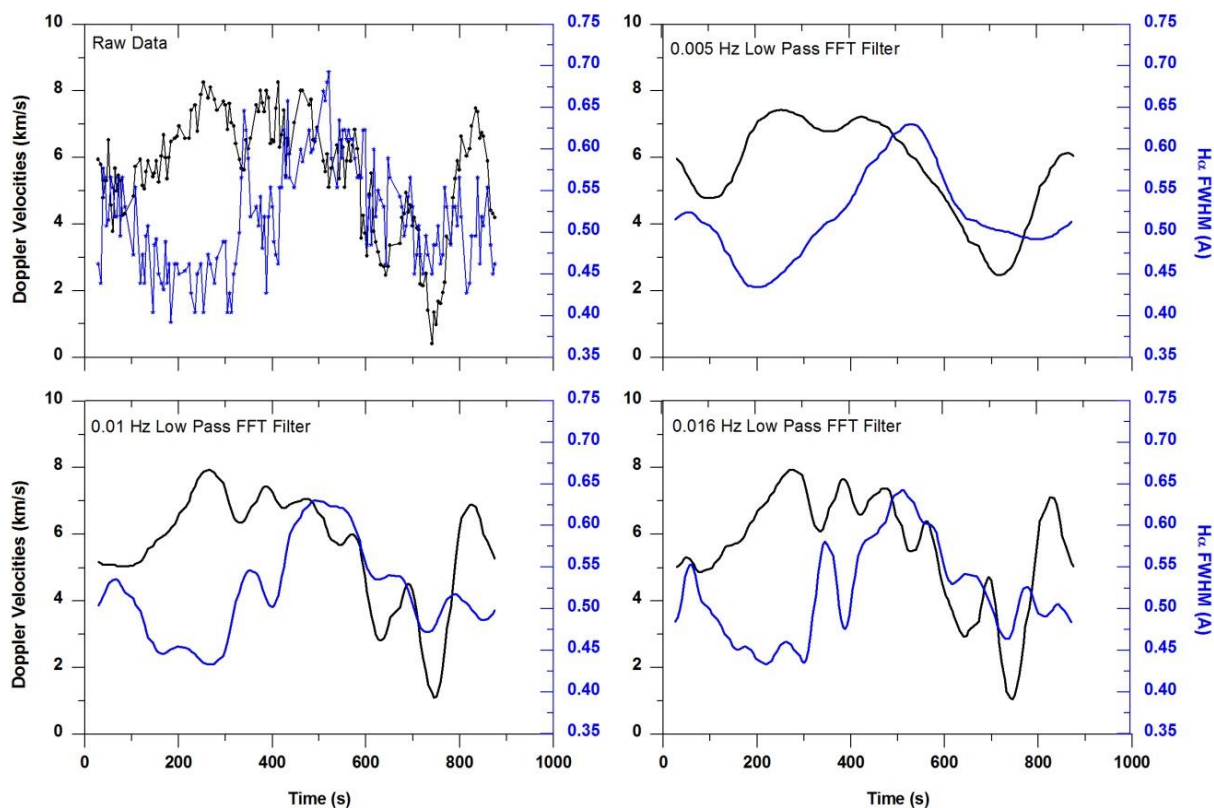
გრაფიკებიდან ნათლად ჩანს, რომ დოპლერის სიჩქარეების დროის მიხედვით ცვლილების მაქსიმუმებს შეესაბამება ნახევარსიგანეების დროის მიხედვით ცვლილების მინიმუმები. ყველა დანარჩენი (27) სპიკულების უმრავლესობა უჩვენებს მსგავს დინამიკას.

Spicule #1, 18-10-2012



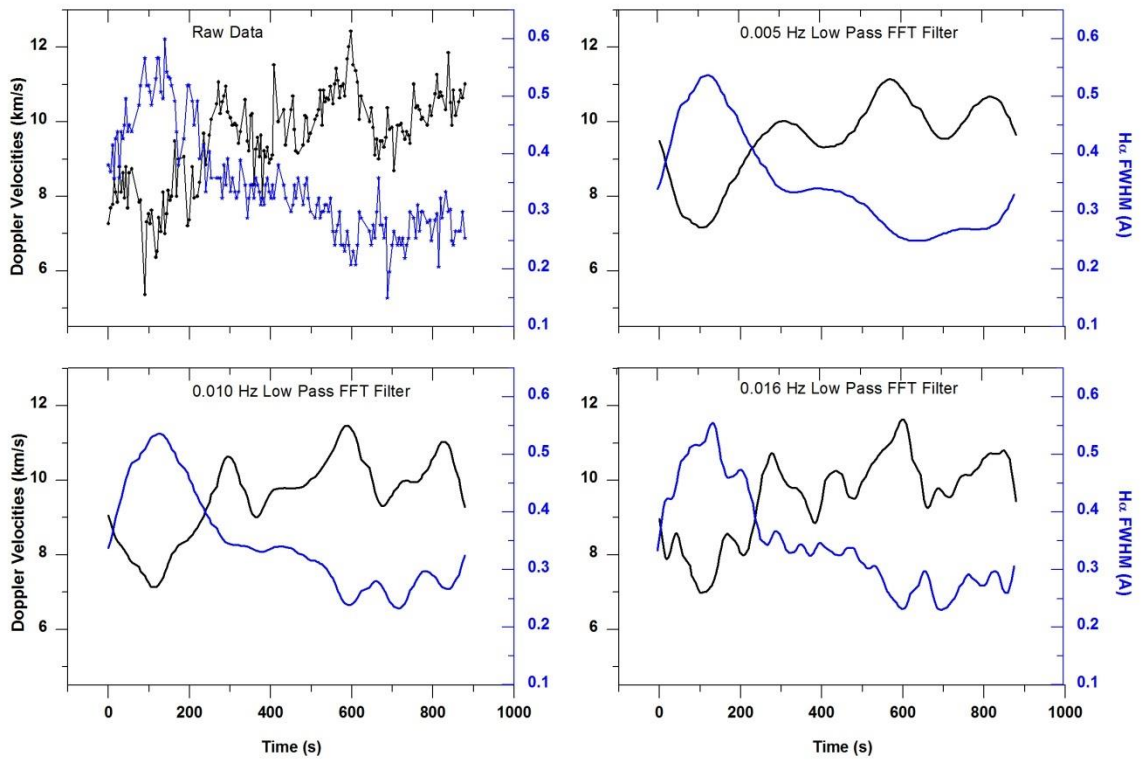
ნახ.23. ნახაზზე მოცემულია დოპლერის სიჩქარეებისა (შავი ხაზი) და ნახევარსიგანეების (ლურჯი ხაზი) ცვლილებების გრაფიკი დროის მიხედვით. ზედა მარცხენა ნაწილში გამოხატულია გრაფიკი ფილტრაციის გარეშე, ხოლო დანარჩენი ფილტრაციის (FFT) შემდეგ არის აგებული. სურათის თავზე მოცემულია სპიკულის ნომერი და დაკვირვების თარიღი. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია დრო, ხოლო ორდინატთა ღერძზე - დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეების სიდიდეები, შესაბამისად.

Spicule #6, 17-10-2012



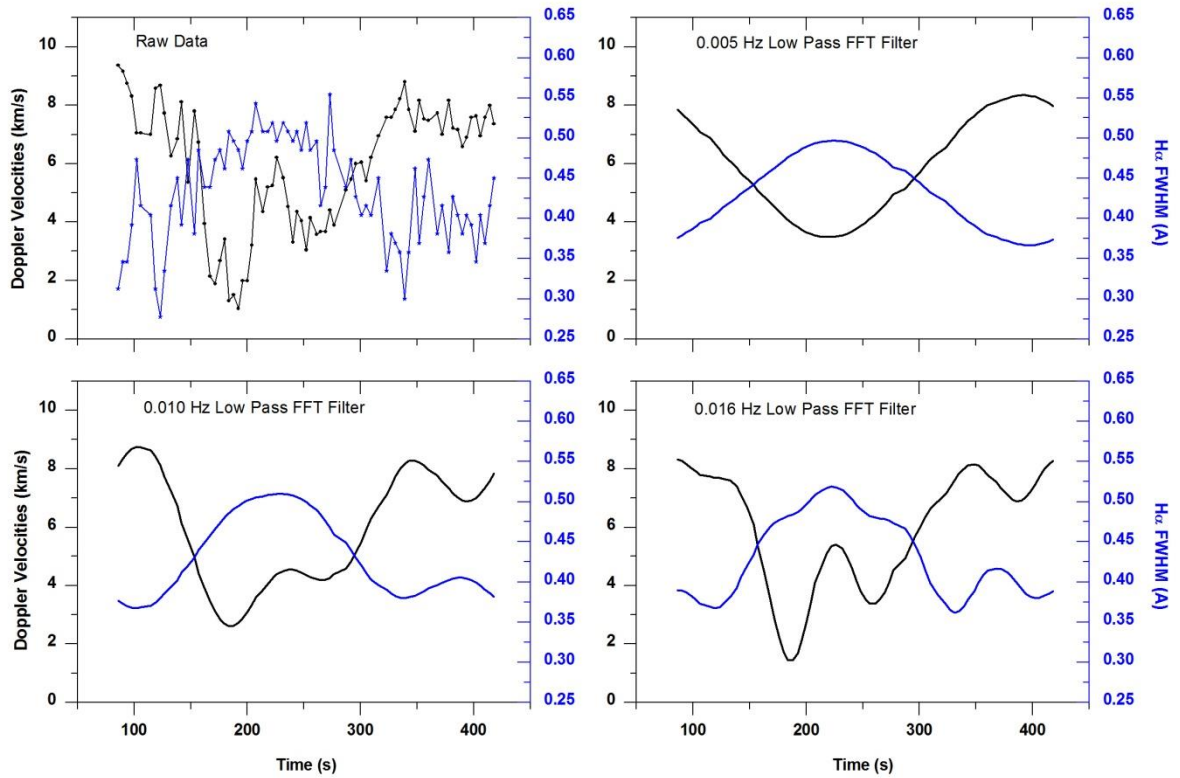
ნახ.24. ნახაზზე მოცემულია დოპლერის სიჩქარეებისა (შავი ხაზი) და ნახევარსიგანეების (ლურჯი ხაზი) ცვლილების გრაფიკი დროის მიხედვით. ზედა მარცხენა ნაწილში გამოხატულია გრაფიკი ფილტრაციის გარეშე, ხოლო დანარჩენი ფილტრაციის (FFT) შემდეგ არის აგებული. სურათის თავზე მოცემულია სპიკულის ნომერი და დაკვირვების თარიღი. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია დრო, ხოლო ორდინატთა ღერძზე დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეების სიდიდეები, შესაბამისად.

Spicule #6, 18-10-2012



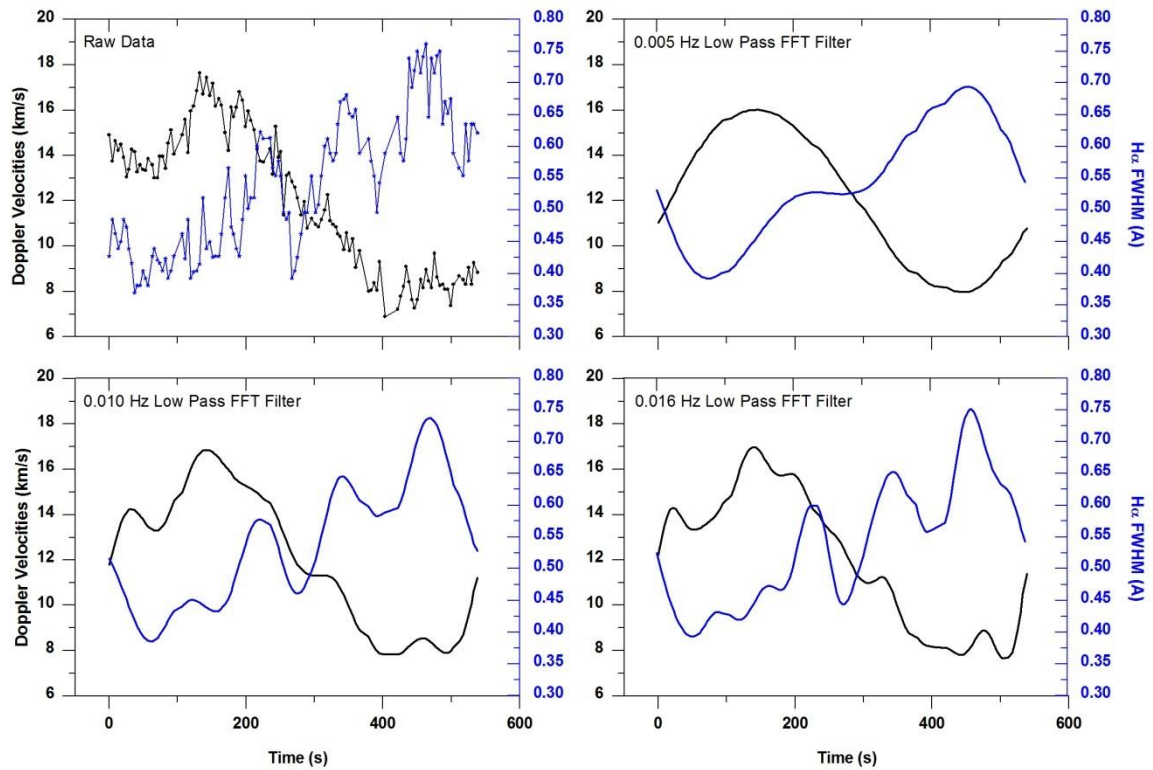
ნახ.25. ნახაზზე მოცემულია დოპლერის სიჩქარეებისა (შავი ხაზი) და ნახევარსიგანეების (ლურჯი ხაზი) ცვლილების გრაფიკი დროის მიხედვით. ზედა მარცხენა ნაწილში გამოხატულია გრაფიკი ფილტრაციის გარეშე, ხოლო დანარჩენი ფილტრაციის (FFT) შემდეგ არის აგებული. სურათის თავზე მოცემულია სპიკულის ნომერი და დაკვირვების თარიღი. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია დრო, ხოლო ორდინატთა ღერძზე - დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეების სიდიდეები, შესაბამისად.

Spicule #3, 18-10-2012



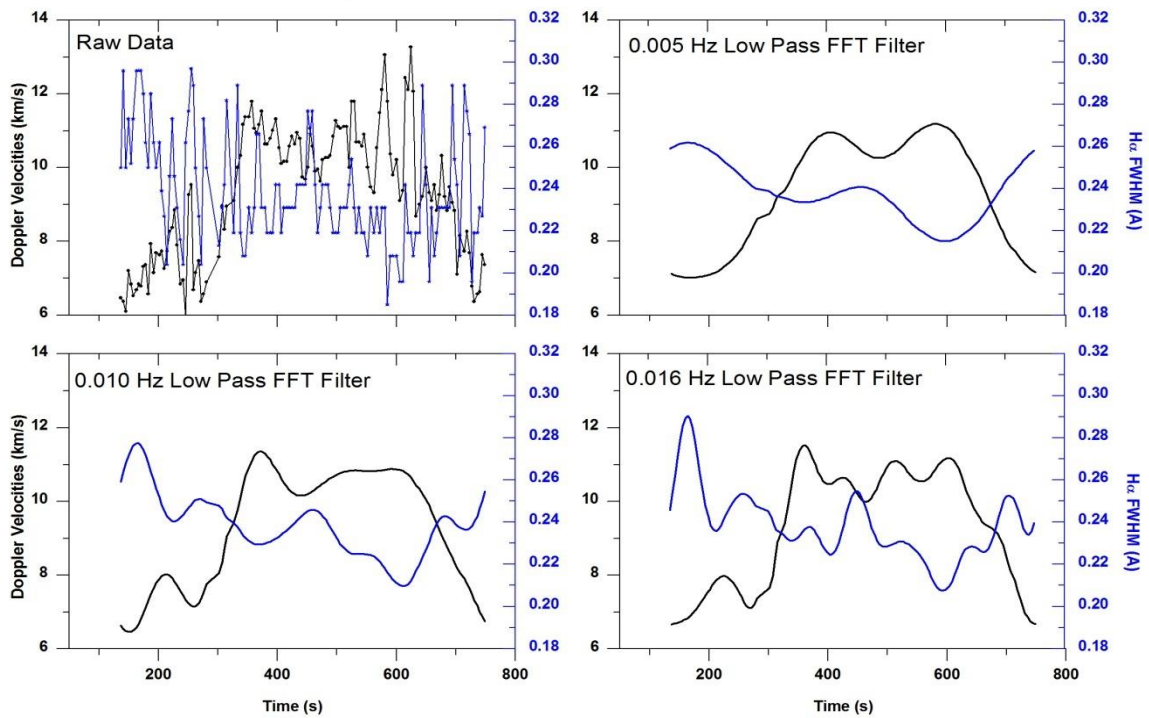
ნახ.26. ნახაზზე მოცემულია დოპლერის სიჩქარეებისა (შავი ხაზი) და ნახევარსიგანეების (ლურჯი ხაზი) ცვლილების გრაფიკი დროის მიხედვით. ზედა მარცხენა ნაწილში გამოხატულია გრაფიკი ფილტრაციის გარეშე, ხოლო დანარჩენი ფილტრაციის (FFT) შემდეგ არის აგებული. სურათის თავზე მოცემულია სპიკულის ნომერი და დაკვირვების თარიღი. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია დრო, ხოლო ორდინატთა ღერძზე დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეების სიდიდეები, შესაბამისად.

Spicule #5, 19-10-2012



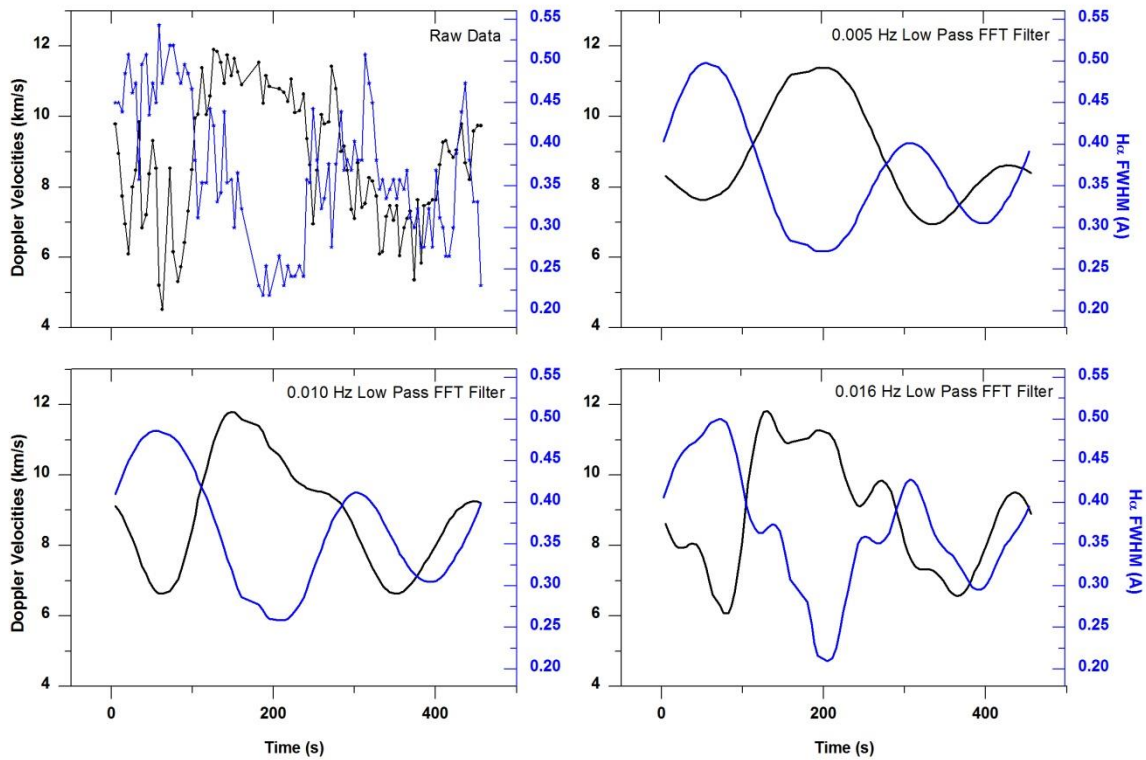
ნახ.27. ნახაზზე მოცემულია დოპლერის სიჩქარეებისა (შავი ხაზი) და ნახევარსიგანეების (ლურჯი ხაზი) ცვლილების გრაფიკი დროის მიხედვით. ზედა მარცხენა ნაწილში გამოხატულია გრაფიკი ფილტრაციის გარეშე, ხოლო დანარჩენი ფილტრაციის (FFT) შემდეგ არის აგებული. სურათის თავზე მოცემულია სპიკულის ნომერი და დაკვირვების თარიღი. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია დრო, ხოლო ორდინატთა ღერძზე დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეების სიდიდეები, შესაბამისად.

Spicule #4, 25-09-2012



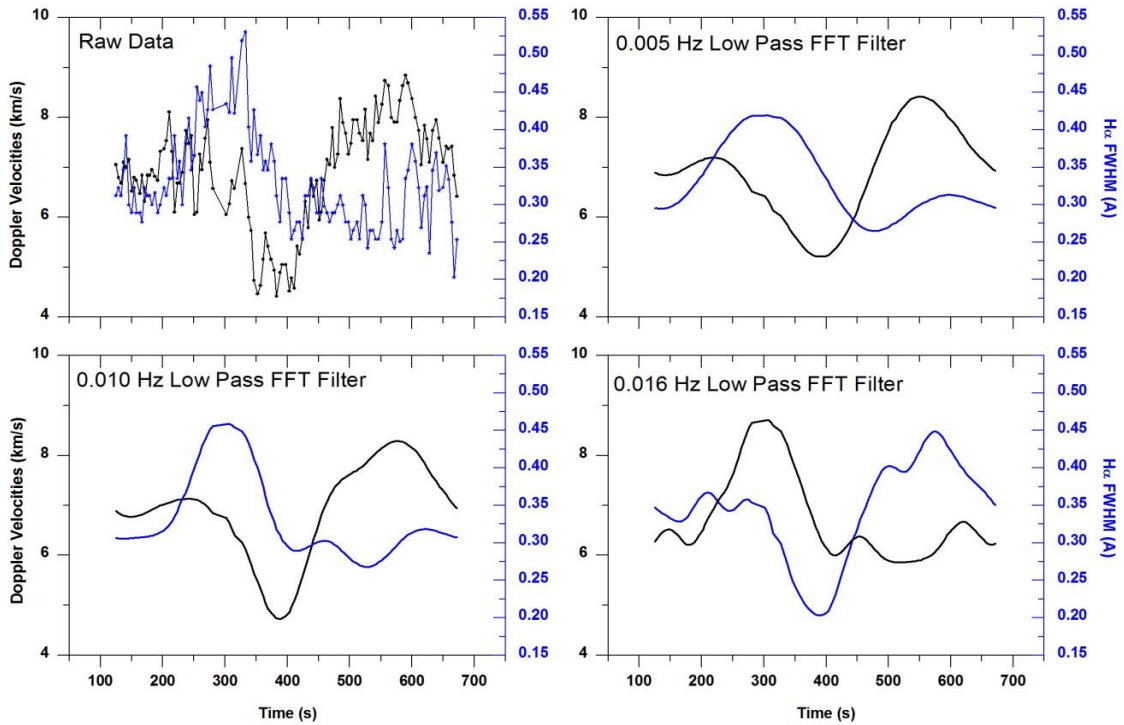
ნახ.28. ნახაზზე მოცემულია დოპლერის სიჩქარეებისა (შავი ხაზი) და ნახევარსიგანეების (ლურჯი ხაზი) ცვლილების გრაფიკი დროის მიხედვით. ზედა მარცხენა ნაწილში გამოხატულია გრაფიკი ფილტრაციის გარეშე, ხოლო დანარჩენი ფილტრაციის (FFT) შემდეგ არის აგებული. სურათის თავზე მოცემულია სპიკულის ნომერი და დაკვირვების თარიღი. აბსისთა ღერძზე გადაზომილია დრო, ხოლო ორდინატთა ღერძზე დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეების სიდიდეები, შესაბამისად.

Spicule #1, 25-09-2012



ნახ.29. ნახაზზე მოცემულია დოპლერის სიჩქარეებისა (შავი ხაზი) და ნახევარსიგანეების (ლურჯი ხაზი) ცვლილებების გრაფიკი დროის მიხედვით. ზედა მარცხენა ნაწილში გამოხატულია გრაფიკი ფილტრაციის გარეშე, ხოლო დანარჩენი ფილტრაციის (FFT) შემდეგ არის აგებული. სურათის თავზე მოცემულია სპიკულის ნომერი და დაკვირვების თარიღი. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია დრო, ხოლო ორდინატთა ღერძზე დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეების სიდიდეები, შესაბამისად.

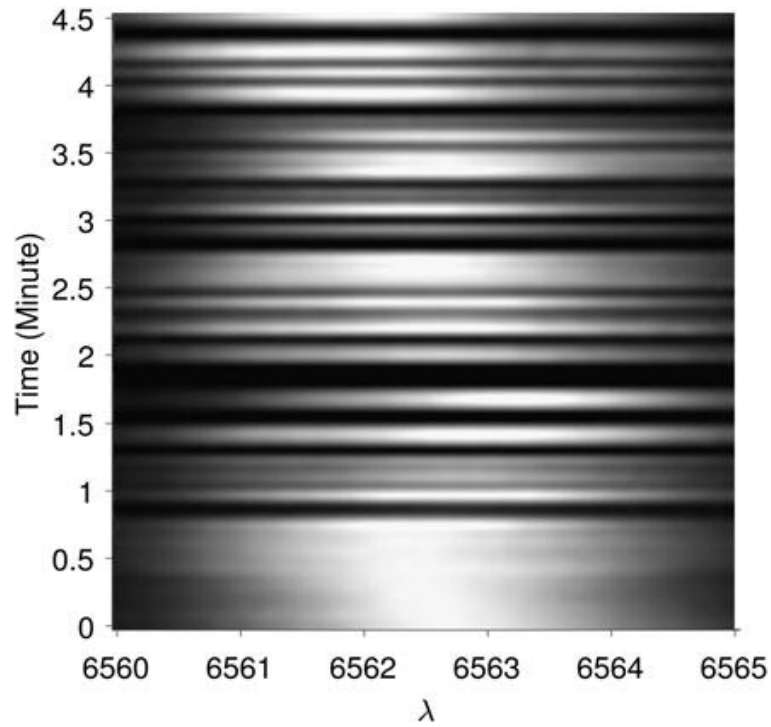
Spicule #5, 25-09-2012



ნახ.30. ნახაზზე მოცემულია დოპლერის სიჩქარეებისა (შავი ხაზი) და ნახევარსიგანეების (ლურჯი ხაზი) ცვლილების გრაფიკი დროის მიხედვით. ზედა მარცხენა ნაწილში გამოხატულია გრაფიკი ფილტრაციის გარეშე, ხოლო დანარჩენი ფილტრაციის (FFT) შემდეგ არის აგებული. სურათის თავზე მოცემულია სპიკულის ნომერი და დაკვირვების თარიღი. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია დრო, ხოლო ორდინატა ღერძზე დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეების სიდიდეები, შესაბამისად.

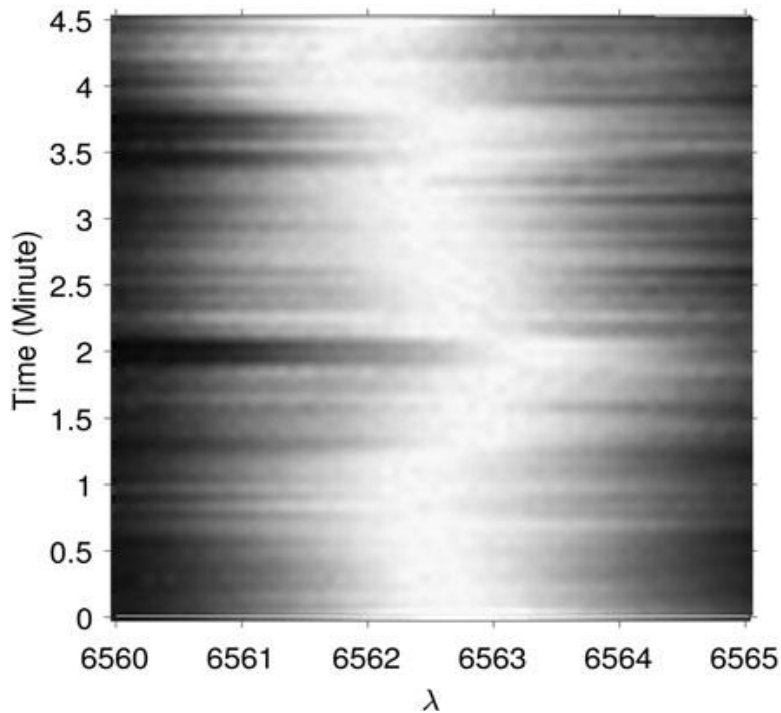
აღსანიშნავია, რომ ნახევარსიგანეების სიდიდის ცვლილების საშუალო დიაპაზონია $0.3\text{\AA} - 0.55\text{\AA}$, ხოლო დოპლერის სიჩქარეების $-2\text{ კმ/წმ} - 10\text{კმ/წმ}$.

ნახ. 31-ზე გამოსახულია ჩვენს მიერ H α -სპიკულებზე დაკვირვების დროითი სერიის ევოლუცია, სხვანაირად დაკვირვებული სპექტროგრამების პერსპექტივა. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია ტალღის სიგრძე, რომელიც მოიცავს $6560 - 6565\text{\AA}$, ხოლო ორდინატა ღერძზე გადაზომილია ექსპოზიცია (სპექტროგრამების დაკვირვების დრო). შავი ჰორიზონტული ზოლები შეესაბამება იმ სპექტროგრამებს, რომლებიც გაზომილი/დამუშავებული არ არის სპექტროგრამების დაბალი ხარისხის გამო.



ნახ.31. აბსისთა ღერძზე გადაზომილია ტალღის სიგრძეები, ორდინატთა ღერძზე სპექტოგრამების სტრუქტურის ხარისხი (ინტენსივობები).

სპიკულის რხევის კიდევ ერთ ნათელ მაგალითს წარმოადგენს ნახ.32-ზე წარმოდგენილი სურათი. როგორც უკვე აღვნიშნეთ დამუშავებული გვაქვს H α -სპიკულების 150 სპექტოგრამა.



ნახ.32 სპიკულის რხევის მაგალითი დროის მიხედვით. აბსისათა ღერძზე გადაზომილია 6560 – 6565 Å ტალღის სიგრძის შუალედში არსებული სპიკული, ხოლო ორდინატა ღერძზე გადაზომილია დროის ინტერვალი, სადაც კადრებს შორის დროის შუალედია 4.5 წამია.

მოყვანილი სურათი აგებულია შემდეგნაირად. პირველი სპექტროგრამიდან ამოვჭერთ გაზომილი 35 სპიკულიდან ერთი ნებისმიერი სპიკული და მოვათავსეთ ცალკე კადრზე. შემდეგ, მეორე სპექტროგრამიდან ამოვჭერთ იგივე სპიკული და მოვათავსეთ ჩვენს მიერ აღებულ ცალკე კადრზე პირველი სპიკულის თავზე, ცხადია ეს სპიკულები ერთმანეთს არ გადაფარავენ, რადგან მათ შორის დროითი ინტერვალი არის 4.5 წამი. ეს პროცედურა გავაგრძელებთ სხვა სპექტროგრამებზედაც (150 სპექტროგრამა). მივიღეთ ნახ. 32-ზე წარმოდგენილი სურათი, სადაც მკაფიოდ ჩანს სპიკულის რხევა დროის მიხედვით (ნათელი დაკლაკნილი ზოლი).

ჩვენი დაკვირვებები უჩვენებს, რომ H α სპიკულების დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეები განიცდიან კვაზიპერიოდულ ცვლილებებს პერიოდებით 120 – 700 წმ-ის შუალედში და ამპლიტუდებით 10 – 20 კმ/წმ და 0.30 – 0.75 Å შესაბამისად. H α სპიკულების დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების რხევები ძირითადად ანტიფაზაში არიან (დოპლერის სიჩქარის მაქსიმუმს შეესაბამება ნახევარსიგანეების მინიმუმი), ან ფაზაში გადანაცვლებულები არიან. იშვიათ შემთხვევაში დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეები იმყოფებიან კორელაციაში.

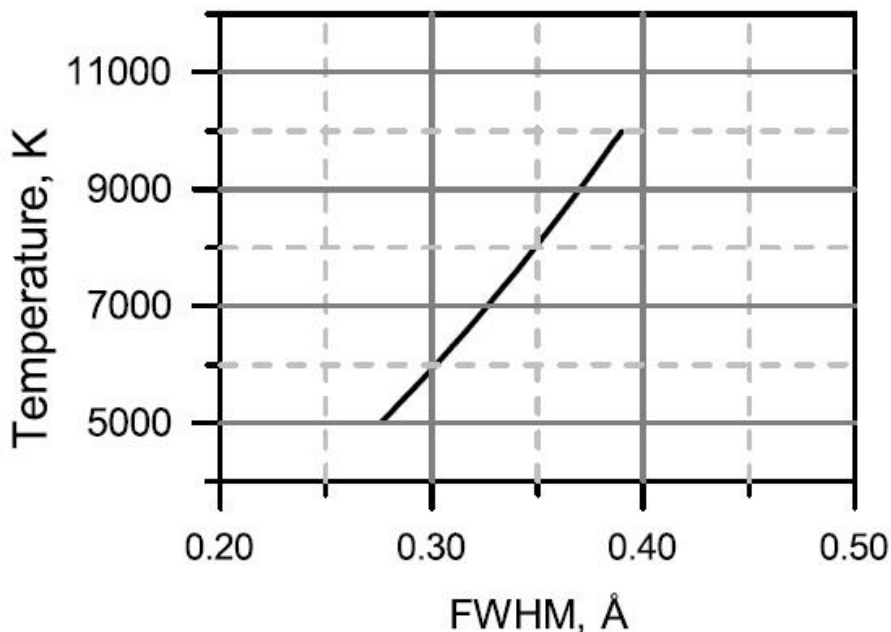
თუ დავუშვებთ, რომ სპიკულებში იონიზირებული პლაზმა იმყოფება თერმოდინამიკურ წონასწორობაში, მაშინ ნახევარსიგანეები შეგვიძლია გამოვხატოთ შემდეგი განტოლებით.

$$FWHM = 2\sqrt{\ln 2} \frac{\lambda_0}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m} + v_t^2}$$

სადაც λ_0 არის ტალღის სიგრძე, c სინათლეს სიჩქარე, k ბოლცმანის მუდმივაა, T იონის ტემპერატურაა, m ატომის მასაა და v_t სითბური სიჩქარეა.

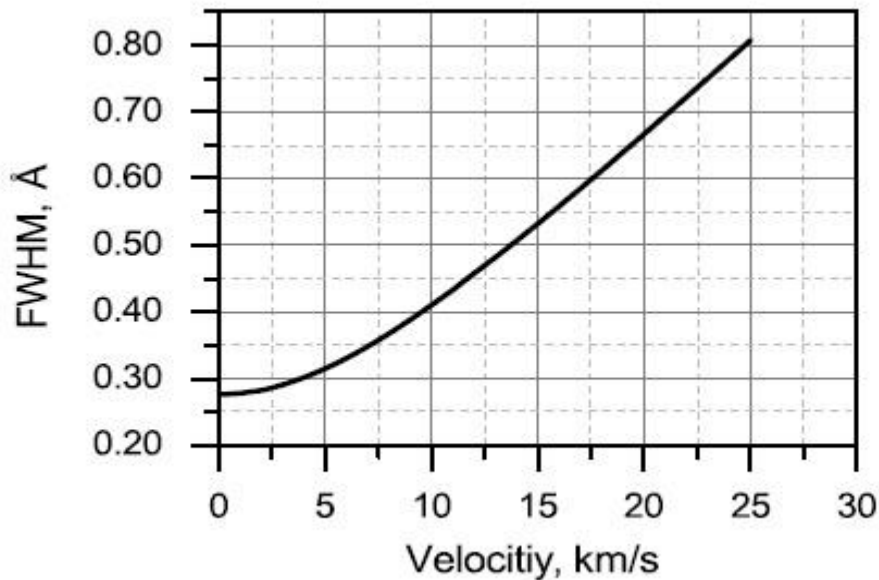
ეს დამოკიდებულება, გვიჩვენებს, რომ $H\alpha$ სპიკულების ნახევარსიგანეების ცვლილება დამოკიდებულია მის შიგნით არსებულ პლაზმის ტემპერატურაზე, ისევე, როგორც დინამიკური პროცესები, რომლებიც მიმდინარეობს სპიკულებში. სითბური და არასითბური გაფართოების ერთმანეთისაგან ცალკე გამოყოფა საკმარისად ძნელია.

როგორც აღვნიშნეთ, ჩვენმა დაკვირვებებმა აჩვენა, რომ $H\alpha$ სპიკულების დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეები განიცდიან კვაზიპერიოდულ ცვლილებებს პერიოდებით 120 – 700 წმ შუალედში და ამპლიტუდებით 10 – 20 კმ/წმ და 0.30 – 0.75 Å შესაბამისად. სპიკულების მარტივ სითბურ მოდელს თუ განვიხილავთ, ე. ი. არასითბური სიჩქარე ტოლია 0 კმ/წმ, მაშინ ჩვენი გაზომვების ნახევარსიგანეების მინიმალური სიდიდეს (0.28 Å), შეესაბამება ტემპერატურა $T=5000$ K (მაგ., Makita, 2003). ჩვენი გაზომვების ნახევარსიგანეების მაქსიმალურ სიდიდეს (0.75 Å) შეესაბამება არარეალური მაღალი ტემპერატურა $T=37\ 000$ K (იხ. სურათი 32).



ნახ.33. სპიკულების მარტივი სითბური მოდელი. მაკრო-ქარიშხალის სიჩქარეა 0 კმ/წმ

თუ ჩვენ განვიხილავთ სპიკულების იზოთერმულ მოდელს როცა $T=5000$ K, ნახევარსიგანეების იგივე ინტერვალისთვის სიჩქარე თავსდება 0 - 23 კმ/წმ შუალედში (იხ., ნახ. 34).



ნახ.34. H α -სპიკულების მაკრო-ქარიზმების სიჩქარეების ცვლილება პლაზმის $T=5000$ K ტემპერატურის დროს.

მიღებული შედეგები კარგ თანხმობაშია სხვა ავტორების მიერ გაკეთებულ შეფასებებებთან (მაგ., Kulidzanishvili and Nikolsky, 1978, Hasan and Keil, 1984).

H α ხაზის არასითბური გაფართოვება სპიკულებისა შეიძლება გამოწვეული იქნეს სხვადასხვა მიზეზებით. არასითბური გაფართოვება პირველ რიგში შეიძლება გამოწვეული იქნეს სპიკულების ბრუნვით მათი ღერძის გარშემო. ადრინდელმა სპექტრალურმა დაკვირვებებმა უჩვენა I-სპიკულების გადახრა მზის კიდის ვერტიკალური მიმართულებიდან, რაც ახსნილი იყო მათი ბრუნვით (მაგ., Pasachoff et al. 1968). მაკროსპიკულები და II-სპიკულები ასევე უჩვენებენ ღერძის გარშემო ბრუნვას (მაგ., Kamio et al. 2010, Curdt et al. 2012, De Pontieu et al. 2012, 2014). თუმცა ხაზის სიგანის პერიოდული ცვალებადობა დროის მიხედვით ძნელი ასახსნელი აღმოჩნდა ასეთი მარტივი ბრუნვის ეფექტით.

ხაზის სიგანის პერიოდული ცვალებადობა დროის მიხედვით შეიძლება გამოწვეული იყოს ალფენის ტალღის გავრცელებით/ჩაგრეხვით სპიკულების მაგნიტურ მილში (მაგ., Zaqarashvili 2003, Zaqarashvili и Murawski 2007, Jess et al. 2009). მაგრამ დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების ერთდროული რხევები გამორიცხავენ ასეთი ჩაგრეხილი ტალღების არსებობას იმდენად, რამდენადაც

ისინი ვერ მოახდენენ ბრუნვის ღერძის გადანაცვლებას მაგნიტურ მილში. სხვა ტიპის ტალღებს, მაგალითად მაგნიტოჰიდროდინამიკურმა (MHD) გრეცვით ტალღებს, შეუძლიათ გამოიწვიონ, როგორც განივი, ასევე აზიმუტალური მოძრაობები, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების რხევების ერთდროული არსებობა (მაგ., Goossens et al., 2014). თუმცა დოპლერის სიჩქარეების და ნახევარსიგანეების რხევების ერთნაირ ფაზაში იმყოფებიან (მაგ., Soler 2017). ამიტომ ამ სიტუაციაშიც დაკვირვებულ რხევებს ანტიფაზაში ვერ მივიღებთ, მაგრამ შეიძლება ავხსნათ რომელიმე მომენტები რხევების ფაზებისა.

დოპლერის გაგანივრების მიზეზი შეიძლება გახდეს ეგრედწოდებული „Kelvin-Helmholtz (KH)“ არამდგრადობა, რაც გამოიწვევს ტურბულენტობის გაძლიერებას და სპიკულების გაცხელებას (მაგ., Kuridze et al. 2015, 2016). პლაზმის გრეხვითმა მოძრაობამ, რომელიც მიმართულია მზის ზედა ფენებისაკენ ფიქსირებულ სიმაღლეზე შეიძლება გამოიწვიოს სპექტრული ხაზის კვაზიპერიოდული გაფართოება.

პერიოდი შეიძლება შეფასდეს, როგორც რადიალური ტალღის სიდიდის და არამუდმივი ჰარმონიული ღერძული ნაკადის სიჩქარის თანაფარდობა. KH არამდგრადობის ყველაზე არასტაბილური ჰარმონიკა შეიძლება ჰქონდეს 70-270 კილომეტრი სიგრძის ტალღას (მაგ., Kuridze et al. 2016), რომელიც გავრცელებულია სპიკულში 20 კმ/წმ სიჩქარით და აქვს 3.5 – 13.5 წმ რხევის პერიოდი. აქედან გამომდინარე, KH არამდგრადობით საეჭვოა დაფიქსირდეს ზემოთ ნახსენები რხევების ანტიფაზები.

შეგვიძლია შემოგთავაზოთ ორი განსხვავებული მექანიზმი, რომელებმაც შეიძლება გამოიწვიოს დაკვირვებით მიღებული დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების რხევების ანტიკორელაცია/ანტიფაზები:

ა) სპიკული-I-ის პარაბოლურმა ტრანექტორიამ შეიძლება გამოიწვიოს დაკვირვებით მიღებული დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების რხევების ანტიკორელაცია/ანტიფაზები. უფრო ზუსტად, პლაზმის აღმავალმა და დაღმავალმა მოძრაობებმა (მაგ., Pereira et al., 2012). რადგან სპიკული ვერტიკალური მიმართულებიდან გადახრილია მისი ბრუნვის შედეგად, სიჩქარის კომპონენტი მხედველობის სხივის გასწვრივ შეიცვლება, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს დოპლერის სიჩქარეების ცვლილება;

ბ) სპიკულებში პლაზმურმა დინებებმა შეიძლება გამოიწვიოს ტურბულენტობის/ქარიშხლის გაზრდა (მაგ., Kuridze et al. 2015), რის შემდეგაც

შეიძლება მივიღოთ არა თერმული გაფართოვება. თუ ტურბულენტობა/ქარიშხლი (შესაბამისად ხაზის სიგანე) სპიკულის ღერძის გასწვრივ არაერთგვაროვანია, მაგ., სპიკულის წვეროსთან შედარებით მცირეა, მაშინ ხაზის სიგანე ანტიკორელაციაში იქნება დოპლერის სიჩქარესთან. როდესაც სპექტროგრაფის ჭვრიტე ამოკვეთს სპიკულის ზედა ნაწილს, მაშინ ხაზის სიგანე შედარებით მცირე მნიშვნელობის იქნება. ხაზის სიგანე უფრო გაიზრდება, თუ სპექტროგრაფის ჭვრიტე ამოჭრის სპიკულის შედარებით დაბალ (უფრო მღელვარე არეს) სიმაღლეს. როცა სპიკული მიაღწევს განვითარების/ევოლუციის მაქსიმუმს ხაზის სიგანეს ექნება მაქსიმალური მნიშვნელობა (ამ მოცემულ მომენტში დოპლერის სიჩქარეების ცვლილება მინიმალურია).

სპიკული თავის განვითარების მაქსიმუმის შემდეგ იწყებს დაცემას ქრომოსფეროსკენ და ზედა ნაწილში კვლავ წარმოიქმნება სპექტრული ხაზი ნაკლები სიგანით. ასეთმა პროცესმა შეიძლება გამოიწვიოს ანტიკორელაცია დოპლერის სიჩქარეებსა და ნახევარსიგანეებს შორის, რაც ნათლად ჩანს ნახ., 20-27-ზე. ანტიკორელაციის ახსნის ამგვარი მიდგომა თანხმობაშია ქურიძის (2016) ნაშრომში გამოხატულ მოსაზრებასთან. სპიკულის გასწვრივ ხაზის გაფართოვების მექანიზმის საბოლოო ასახსნელად, მომავალში დაკვირვებების ჩატარება აუცილებელია.

ზაქარაშვილიმა და სხირტლაძემ (Zaqarashvili and Skhirtladze, 2008) აჩვენეს, რომ წრფივი სუპერპოზიციის ორი გაორმაგებული/გამრავლებული ტალღის მარყუჟმა შეიძლება გამოიწვიოს სპირალური ტალღა, რომელიც ფიქსირებულ სიმაღლეზე გამოხატულია წრიული ან ელიფსური სპიკულის ღერძის მიმართ მოძრაობით. სპიკულების მაგნიტურ მილზე ფოტოსფერულმა გრანულების შეჯახებამ შეიძლება გამოიწვიოს ტალღის (გრეხვითი) წარმოშობა (ვერტიკალური მიმართულების იდიალურ შემთხვევაში).

პირველად სპირალური მოძრაობა სპიკულისა დაკვირვებულ იქნა გაჯიევი და ნიკოლსკის (Gadzhiev and Nikolsky, 1982) მიერ. მათ ჩაატარეს დოპლერის სიჩქარისა და ვიზუალური გადაადგილების ერთდროული დაკვირვება. მოგვიანებით ანალოგიური დაკვირვებები ჩაატარეს კოზამ და სხვებმა (Koza et al, 2007). თანამედროვე Hinode/SOT დაკვირვებმაც დაადასტურა სპიკულების ბრუნვითი მოძრაობები, ისინი გვანან სუემატსუს და სხვების დაკვირვებებს (Suematsu et al. 2008; Stangalini et al. 2017). გრეხვითმა მოძრაობებმა შეიძლება მიგვიყვანოს დოპლერის სიჩქარეების და ნახევარსიჩქარეების ანტიკორელაციამდე. დაკვირვების მომენტში, როცა სპიკული მოძრაობს დამკვირვებლის მხედველობის ხაზის გასწვრივ ან დამკვირვებლისაკენ ან პირიქით საწინააღმდეგო მიმართულებით, მაშინ აქვს დოპლერის სიჩქარეს მაქსიმალური მნიშვნელობა/სიდიდე. მეორეს მხრივ, როცა სპიკული იწყებს მოძრაობას

მხედველობის ხაზის მიმართ ვერტიკალური მიმართულებით, მაშინ დოპლერის სიჩქარე ხდება მინიმალური, მაგრამ ხაზის გაფართოვება შეიძლება გახდეს მნიშვნელოვანი სპიკულის შიგნით არსებული აზიმუტალური მოძრაობების გამო. გრეხვითი მოძრაობების მექანიზმის ასახსნელად აუცილებელია დეტალური თეორიული კვლევების წარმართვა, რა თქმა უნდა ექსპერიმენტთან ერთად. რადგან დაკვირვებულ ტალღებს აქვთ ხანმოკლე პერიოდი (Zaqarashvili et al. 2007; Zaqarashvili and Erdelyi, 2009), ამიტომ გრეხვითმა ტალღებმა შეიძლება მიგვიყვანოს ანტიკორელაციამდე, რაც ნაჩვენებია ნახ. 20-27 ზე.

სპიკულებში რხევითი მოძრაობების უფრო სანდო ახსნისათვის აუცილებელია, როგორც დედამიწისზედა, ასევე კოსმოსური დაკვირვებების ჩატარება მაღალი გარჩევადობით. ამ პრობლემის საფუძვლიან გადაწყვეტაში დაგვეხმარება ქრომოსფეროს ერთიდაიგივე სიმაღლეზე ერთდროული დაკვირვებების ჩატარება ორ სხვადასხვა სპექტრულ ხაზში (მაგ., $H\alpha$ და D_3 ხაზებში ან $H\alpha$ და იონიზირებულ კალციუმის ხაზებში და სხვა). ეს ხაზები სპიკულებიდან გამოსხივდებიან სხვადასხვა ტემპერატურის არეებიდან/შრეებიდან და სხვადასხვა ხაზში ერთდროული დაკვირვებები საშუალებას მოგვცემს გამოვიკვლიოთ სპიკულებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესები, რომლებიც მიმდინარეობენ განსხვავებულ ფიზიკურ პირობებში. მათ შორის იმ პრობლემის, რომელზედაც ზემოთ ვისაუბრეთ, რაც გარკვეულ წვლილს შემოიტანს არამართო სპიკულების შესწავლის სფეროში. სპიკულებში სპირალური მოძრაობების უკეთ ასახსნელად აუცილებელია თეორიული კვლევები, მათი მოდელირება, რაც ხელს შეუწყობს დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების დაკვირვებული რხევების ანტიფაზების ახსნას.

აღნიშნული დაკვირვებითი მასალის დამუშავების შედეგად მივიღეთ შემდეგი დაკვირვებითი შედეგები:

1. $H\alpha$ სპიკულების დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების რხევები ძირითადად ანტიკორელაციაშია ან ფაზაში წანაცვლებულები არიან და იშვიათ შემთხვევაში არიან კორელაციაში.
2. რხევის პერიოდები ძირითადად მეტია 3 წუთზე (> 180 წმ).
3. პერიოდების უმრავლესობა მოთავსებულია 4 – 9 წუთიან (240-540 წმ) შუალედში.
4. $H\alpha$ სპიკულების დოპლერის სიჩქარეები და ნახევარსიგანეები განიცდიან კვაზიპერიოდულ ცვლილებებს პერიოდებით 120 – 700 წმ შუალედში და ამპლიტუდებით 10 – 20 კმ/წმ და 0.30 – 0.75 Å შესაბამისად.

დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების დროის მიხედვით ცვლილების ასიმეტრია/ანტიკორელაციას ჩვენს მიერ პირველად არის დაფიქსირებული.

თავი 4. მზის სპიკულეზზე დაკვირვებების შედეგად მიღებული ფიზიკური პარამეტრების ანალიზი და შედეგები

§ 4. 1. მზის სპიკულეზის დაკვირვებითი შედეგები/დისკუსია

მზის ატმოსფეროში მიმდინარე ფიზიკური პროცესებზე ადრინდელ დაკვირვებებით ძალიან ძნელია, რომ გაკეთდეს მზეზე მიმდინარე ფიზიკური პროცესების რეალობასთან ახლოს მყოფი დასკვნები. სწორი/ზუსტი ანალიზისათვის საჭიროა თანამედროვე მაღალი შეღწევადობის და გარჩევის დაკვირვებები, დაკვირვებითი მონაცემების სწორი/თანამედროვე დამუშავება, ანალიზი და ინტერპრეტაცია. მზის პლაზმაში ენერჯის გადადატანა ანიზოტროპულია. მასის, იმპულსის, და ენერჯის მზის ატმოსფეროში გადატანის სწორი გაგება და მათი ჰელიოსფეროში გადატანის მექანიზმის ახსნა ძალიან მნიშვნელოვანია, რაც დიდ გავლენას ახდენს დედამიწაზე არსებულ გარემოზე.

ბეკერსის (Beckers, 1972) მიმოხილვაში დაწვრილებით არის აღწერილი I - სპიკულეზზე დაკვირვებით მიღებული ფიზიკური პარამეტრები. მიმოხილვაში აღწერილია, რომ ადრინდელი კლასიკური დაკვირვებები რამდენიმე ათეული წელი გრძელდებოდა და იყო დაკვირვებით მიღებული ფიზიკური პარამეტრები, რომლებიც ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან. 2000 წლის შემდეგ გაიხსნა „ახალი ეპოქა“, სადაც მოთხოვნილი/გაკეთებული იყო დაკვირვების ახალი მიდგომა, ტელესკოპის მაღალი გარჩევის უნარი და სპექტროპოლარიმეტრული (spectropolarimetry) ახალი დიაგნოსტიკური შესაძლებლობა.

მზის სპიკულეზი-მაგნიტური წარმონაქმნებია, რომლებმაც შეიძლება ითამაშოს ფუნდამენტური როლი მზის ქვედა ფენებიდან ენერჯის გადატანისა ქრომოსფეროში და კორონაში, ყოველივე ეს ხდის მათ საინტერესო კვლევის ობიექტად. სპიკულეზი არიან გრძელი, წვრილი ცილინდრის მაგვარი წარმონაქმნები, რომლებიც ჩანან მზის ლიმბის/კიდის ზემოთ და რომლებიც კარგად დაიკვირვებიან ქრომოსფეროს ემისიურ ხაზებში. სპიკულეზი იმართებიან მილის შიგნით არსებული მაგნიტური ნაკადებით. სპიკულეზს აკვირდებიან მრავალ სპექტრულ ხაზებში H α , Ca II H და K, HeI D3 და 10830 Å , ძირითადად აკვირდებიან H α , D3, და Ca II H ხაზებში (მაგ. Socas-Navarro I. H. and D. Elmore, 2005). H α , He D3, ან Ca H და K, ხაზებში, სპიკულეზს ანიჭებენ დიდ როლს მზის ატმოსფეროს ნივთიერების ბალანსის შესასწავლად. სპიკულეზი დაბალ სიმაღლეებზე, მზის ეკვატორის სიახლოვეს, საშუალოდ გადახრილები არიან ვერტიკალური მიმართულებიდან, ხოლო პოლუსებთან სპიკულეზის მიმართულება ძირითადად კორონალური პოლარული სხივების გასწვრივაა მოგებული. იგულისხმება, რომ მათი ორიენტაცია დიდადაა დაკავშირებული გარშემორტყმული მაგნიტურ ტოპოლოგიასთან (მაგ., Centeno Rebecca, et al., 2010).

როგორც კი დაკვირვებების სივრცული გარჩევადობა გაიზარდა, შეიცვალა სპიკულების დაკვირვებითი მონაცემები. კერძოდ: სიმაღლე, სიგანე, სიცოცხლის ხანგრძლივობა, დოპლერის სიჩქარეები, ნახევარსიგანეები და სხვა. კლასიკური დაკვირვებითი მონაცემებისა და თანამედროვე მონაცემების განსხვავების ერთ-ერთ ძირითად მიზეზად შეიძლება ჩაითვალოს სპიკულების ზედდება და წვრილი/ვიწრო სპიკულების დანახვის/გარჩევის სიძნელე, რაც დამოკიდებულია ინსტრუმენტის/ტელესკოპის გარჩევის უნარზე, დედამიწის ატმოსფეროს გამჭირვალობაზე და სხვა. ეს არის ერთ - ერთი ძირითადი მიზეზი სხვადასხვა მკვლევარის მიერ მიღებული დაკვირვებითი მონაცემების განსხვავებებისა, რაც ზემოთ განვიხილეთ.

მაღალი გარჩევით 17 GHz NoRH (Nobeyama Radio Heliograph), მიღებული თითქმის მზის ყველა გამონასახეზე შეიმჩნევა დისკოს სიკაშკაშის მომატება. ეს შეიძლება გამოწვეული იყოს დადებითი ტემპერატურული გრადიენტით ქრომოსფეროსა და კორონაში. მკვლევარების (Selhorst et al., 2003) მიერ ჩატარებული დაკვირვებებით შეისწავლეს ეს პრობლემა და მივიდნენ შემდეგ დასკვნამდე: (1) ინტენსივობის მატება არც დროის და არც ადგილის მიხედვითაა მუდმივი; (2) გაკაშკაშება პოლუსის მიმართულებით მეტია (25%) ვიდრე მზის ზედაპირის სხვა ადგილებში, იგი ეკვატორის მიდამოებში აღწევს 15% და 10%; (3) პოლარულ არეებთან სიკაშკაშის მატება ანტიკორელაციაშია მზის აქტივობის ციკლთან და კორელაციაში პოლარული ჩირაღდნების რიცხვთან.

ავტორების (Murawski1 და Zaqarashvili, 2010) მიერ რიცხვითი მოდელირებით მიღებულმა შედეგებმა უჩვენეს, რომ ორმაგი მოდელი ახლოა I-სპიკულების მოდელთან. სპიკულების დაკვირვებული სიჩქარის, სიგანის და სიგრძის ზრდა შეიძლება განაპირობოს დასაწყისში საკმარისად მაღალი სიჩქარის იმპულსმა. 1D მოდელიც შეიძლება განპირობებული იყოს იგივე პირობით. მეორე (2D) მოდელის უპირატესობა მდგომარეობს იმაში, რომ მან შეიძლება გამოყოს განსხვავებული დაკვირვებითი თვისება სპიკულის, ისეთი როგორცაა ორმაგი (ზოგჯერ მეტი) სტრუქტურა (მაგ., Tanaka 1974; Dara et al. 1998; Suematsu et al. 2008) და სხვადასხვა მიმართულებით (ორი მიმართულების) გავრცელებული ნაკადი (მაგ., Tsiropoula et al. 1994, 2012, Tziotziou et al. 2003, 2004; Pasachoff et al. 2009). მულტი სტრუქტურა და ორმიმართულებიანი ნაკადი წარმოიშვებიან, როცა ქრომოსფერული ნივთიერება, რომელიც იქნა ზემოთ ამოტყორცნილი საწყისი „დარტყმებით“, გარკვეული დროის შემდეგ დაბლა ეშვება მიზიდულების ძალის ზემოქმედებით, მაშინ როცა მეორადი დარტყმა მაღლა წევს მეზობლად არსებულ ქრომოსფეროს ნივთიერებას. ამიტომ „დარტყმები“ ვრცელდებიან უფრო მაღალი სიჩქარით, რომელიც იმყოფება ახლოს კორონის ბგერითი სიჩქარესთან, მაშინ როცა ქრომოსფეროს პლაზმა ზემოთ მოძრაობს უფრო დაბალი სიჩქარით, როგორც ეს დაკვირვებულია სპიკულში.

სიჩქარე, სიმაღლე, და სიგანე გამოიხატებიან ერთეულებში 1 კმ-ს, 1 მმ და 0.1 მმ, შესაბამისად. სიჩქარე და სიმაღლე დიდად არის დამოკიდებული A_v - პულსის ამპლიტუდაზე (pulse amplitude A_v) და ორივე იზრდება A_v ზრდასთან ერთად. აღმოჩნდება, რომ დაკვირვებული აღმავალი სიჩქარე I სპიკულისა კორონაში არის (25 კმ/წმ) და სიმაღლეზე ~ 7 მმ (შეფასებული ფოტოსფეროს დონიდან) როცა $A_v = 30$ კმ/წმ. საწყისი ამპლიტუდის სიჩქარის იმპულსი იქნება ძალიან დიდი ქრომოსფეროს დაბალ ფენებისათვის. იმპულსმა გრანულების მოძრაობისას ან p-მოდამ (p-modes) არ შეუძლიათ მიაღწიონ ასეთ მაღალ ამპლიტუდას ~ 0.5 მმ; თუმცა რეზონანსური დარტყმები გრანულების მაგნიტურ მილის ფსკერზე (მაგ., Roberts 1979) და/ან მაგნიტურმა გადაერთებამ შეიძლება გამოიწვიოს ასეთი ძლიერი იმპულსი.

ავტორების (Murawski1 და Zaqarashvili, 2010) მოდელში საწყისი იმპულსი იწყება ქრომოსფეროს საზღვრებში, სადაც ფოტოსფერული მაგნიტური მილები უკვე არსებობენ. არე არის თითქმის ვერტიკალური სუპერგრანულების საზღვრებთან და აქვთ თითქმის ჰორიზონტული სტრუქტურა სუპერგრანულაციის ზემოთ. ამიტომ ავტორების მოდელი კარგადაა მიახლოებული სინამდვილესთან ამ არეში. ჰორიზონტული მაგნიტური ველი ხელს უშლის ქრომოსფერული ნივთიერების ზემოთ სვალს, ამიტომ სპიკულები შეიძლება წარმოიშვან მხოლოდ სუპერგრანულების საზღვრებთან, სადაც მაგნიტური ველი ძირითადად არის ვერტიკალური. საინტერესო იქნებოდა გვემსჯელა, როცა იმპულსი დაწყებულიყო ფოტოსფერული არიდან, მაგრამ ეს მოითხოვს უფრო რთულ სტრუქტურის განხილვას მაგნიტური ველის, რაც მომავალი კვლევების საგანია.

ავტორები (Murawski1 და Zaqarashvili, 2010) აღნიშნავენ, რომ ზემოთ აღნიშნული მოდელი გამარტივებულია, იმიტომ რომ განტოლებაში არ არის ჩართული ისეთი სიდიდეები, როგორცაა პლაზმის ნაწილობრივი იონიზაცია, სითბური გამტარიანობა და რადიაცია. ნეიტრალური ატომების არსებობა პლაზმაში, როგორც ცნობილია, ცვლის მის დინამიკურ და ფიზიკურ მახასიათებლებს მნიშვნელოვნად (მაგ., Braginskii 1965; Haerendel 1992; Khodachenko & Zaitsev 2002; Khodachenko et al.. 2004). ელექტრონების, იონების და ნეიტრალური ატომების ურთიერთმოქმედება მაგნიტურ ველთან სპეციფიკურ/განსაკუთრებულ პროცესებს იწვევენ, რომელიც საკმარისად განსხვავდება მთლიანად იონიზებული პლაზმის შემთხვევაში. რადიაციამ და სითბურმა გამტარიანობამ შეიძლება დიდად შეცვალოს სცენარი (მაგ., Sterling 1990, 1993; Cheng 1992a,b,c; Heggland et al. 2007); ამიტომ ისინი ჩართული უნდა იქნენ მომავალ მოდელებში, რომ გვეჩვენოს სპიკულების ყოველმხრივი აღწერა მისი ჩამოყალიბების დროს.

სპიკულებში დოპლერის სიჩქარეების რხევა სხვადასხვა ფიზიკური მექანიზმებით შეიძლება იყოს გამოწვეული. ზაქარაშვილმა კოლეგებთან ერთად (Zaqarashvili and Erdelyi 2009) სპიკულებში დაკვირვებული რხევები ფორმალურად დაყო ორ ჯგუფად: რხევები პერიოდით 2 წთ-ზე ნაკლები და რხევები პერიოდით

2 წთ-ზე მეტი. ჩვენი ანალიზიც მსგავს შედეგებზე მიუთითებს (ნახეთ ცხრილი 1). ამის დამაჯერებელი ფიზიკური ახსნა არ არსებობს, მაგრამ ცხადია, რომ დოპლერის სიჩქარეების „დიდი“ და „პატარა“ პერიოდები გამოწვეულია მზის ატმოსფეროში მიმდინარე სხვადასხვა ფიზიკური პროცესებით, რაც დაწვრილებით შესწავლილი უნდა იქნას მომავალში.

ჩვენს კვლევაში გამოიკვეთა დოპლერის სიჩქარეების რხევის ოთხი პერიოდი 263 წმ, 135 წმ, 95 წმ, და 63 წმ. რომელთა სანდოობის დონე მეტია ვიდრე 95%. დოპლერის სიჩქარეების გრძელპერიოდიანი ცვლილებები/რხევები, რომლებსაც აქვთ უფრო მეტი ამპლიტუდები შედარებით კარგადაა შესწავლილი, ვიდრე მოკლეპერიოდიანი რხევები. ამ ჯგუფს აქვთ პერიოდების დიდი დიაპაზონი, 165 – 358 წმ, საშუალოდ დაახლოებით 4.4 წუთი, რაც ფოტოსფეროში არსებულ გლობალურ 5 წუთიან რხევებისგან მცირედ განსხვავდება. ჩვენ ვუშვებთ, რომ სპიკულების დოპლერის სიჩქარეების ხანგრძლივი პერიოდების არსებობა აუცილებელი არ არის გამოწვეული იყვნენ ფოტოსფეროს გლობალური რხევებით.

სპიკულებში არსებული რხევები პერიოდებით 2 წუთზე მეტი ხშირია სტატისტიკურად და შედარებით კარგად არის შესწავლილი. ჩვენს კვლევებში გამოიკვეთა, საკმარისი რაოდენობა სპიკულებისა, რომლებისთვისაც დოპლერის სიჩქარეების რხევების პერიოდები 2 წუთზე ნაკლებია, მაგალითად 63 წამი, რაც სტატისტიკის თვალსაზრისით მნიშვნელოვანია. კიდევ უფრო ნაკლები რხევის პერიოდები (30 – 50 წმ) იქნა დაფიქსირებული სპიკულების არც თუ ისეთი მცირე რაოდენობაში, მაგრამ დომინირებული პერიოდი ვერ შევამჩნიეთ. აქედან გამომდინარე ცხადია, რომ სპიკულებზე დაკვირვების, დამუშავების და დამუშავებითი მონაცემების ინტერპრეტაცია/ანალიზი მოითხოვს შემდგომ განვითარებას.

მომავალი კვლევებისათვის გამოყენებული უნდა იყოს, როგორც მიწისზედა, ასევე გარეატმოსფერული/კოსმოსური დაკვირვებითი მასალები. კერძოდ, Solar Dynamic Observatory (SDO)-ზე არსებული ტელესკოპები Atmospheric Imager Assambly (AIA) და Heliospheric and Magnetic Imager (HMI), აგრეთვე ახალი თანამგზავრი Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS) და ESA-ს მომავალი თანამგზავრი Solar Orbiter. უნდა მოხდეს დაკვირვებით მიღებული მონაცემების თანამედროვე მეთოდებით დამუშავება, ანალიზი და მოდელირება.

დაფიქსირებული რხევები 263 წმ (>2 წთ) შეიძლება იყოს დაკავშირებული ან ფოტოსფერული p-მოდის შესაბამის გაჟონვასთან (მაგ., De Pontieu et al. 2004) ან ფოტოსფერული იმპულსების კვაზიპერიოდული ბიძგებთან (მაგ., Hollweg 1982; Murawski and Zaqarashvili 2010). p-მოდის გაჟონვაში იგულისხმება ფოტოსფეროში არსებული გლობალური რხევების გავრცელება ქრომოსფეროს მაგნიტური ველის მიმართ გარკვეული კუთხით, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს სპიკულებში 5 წთ-იანი რხევები. მეორეს მხრივ, დარტყმითი ტალღის ანუ აღმავალი კვაზიპერიოდული ნაკადი სწრაფად ეცემა ფოტოსფეროსკენ სიმაღლის ზრდასთან ერთად სიმკვრივის

სწრაფად შემცირების გამო. აღმავალი ნაკადის საშუალო პერიოდი დაახლოებით 3 წუთია. თუმცა მურავსკი და ზაქარაშვილი მიუთითებენ (Murawski and Zaqarashvili 2010), რომ მომდევნო დარტყმით იმპულსებს შორის დროითი ინტერვალი დამოკიდებულია იმპულსის საწყის ამპლიტუდაზე, რომელიც იზრდება ძლიერი იმპულსების დროს. ძლიერმა საწყისმა იმპულსმა შეიძლება გაზარდოს ზევით მიმართული დინების რხევა 5 წუთამდე (მაგ., Zaqarashvili et al. 2011). ამგვარად ასეთმა მოდელმა შეიძლება გამოიწვიოს პერიოდები, რომლებიც თავსდებიან 3 და 5 წუთიან შუალედში. აქედან გამომდინარე, დაკვირვებით დაფიქსირებული დოპლერის სიჩქარეების რხევების პერიოდები, რომლებიც მოთავსებულია 167-358 წმ შუალედი შეიძლება შეესაბამებოდეს ქრომოსფერში არსებულ დარტყმით ტალღებს.

დაფიქსირებული რხევები 114 – 156 წმ (საშუალოდ 135) შეიძლება იყოს დაკავშირებული სპიკულების მაგნიტურ მილში გავრცელებული გრეხვითი ტალღების რხევებთან;

მეორე მხრივ, მოკლევადიანი პერიოდები (<2 წუთი) როგორც ჩანს შეესაბამება გრეხვითი ტალღების გავრცელებას სპიკულებში (მაგ., Kukhianidze et al. 2006; Zaqarashvili et al. 2007; Ajabshirizadeh et al. 2008; Kim et al. 2008; He et al. 2009; Tavabi et al. 2011; Pietarila et al. 2011; Ebadi et al. 2012; Yurchyshyn et al. 2013) or ალფენის waves (De Pontieu et al. 2007b; Okamoto and De Pontieu 2011; Tian et al. 2012). პრინციპში მაგნიტური ველის ძალწირებს გრეხვითი ტალღები და ალფენის ტალღები გადაადგილებენ განივად. განსხვავება ის არის, რომ გრეხვითი ტალღები გადაადგილებენ სპიკულის მაგნიტური მილის ღერძს, ხოლო ალფენის ტალღები ღერძს კი არ გადაადგილებენ, არამედ იწვევენ მის ჩახვევას/გრეხვას. ალფენის ტალღამ შეიძლება მიგვიყვანოს დოპლერის სიგანის გაგანივრებამდე. ამის ახსნას სივრცული მაღალი გარჩევის დაკვირვებები ესაჭიროება (მაგ., Sekse et al. 2013a). ამგვარად, როცა განიხილება სპიკულების განივი გავრცელებული ტალღები, ჩვენ ვიზიარებთ მოსაზრებას, რომელიც სპიკულების მაგნიტურ მილში გრეხვითი ტალღების გავრცელებას და მათში არსებულ რხევებზე მიუთითებს.

პერიოდების მესამე ჯგუფის 81 – 108 წმ, საშუალოდ 95 წმ. შეესაბამება დოპლერის სიჩქარეების მსგავსი პერიოდები (75 – 110 წმ) დაფიქსირებული ნაშრომში ზაქარაშვილი და სხვები (Zaqarashvili et al. 2007). რხევები პერიოდებით 81 – 108 წმ - ის შუალედში სტატისტიკუტად შესწავლილი შედარებით კარგად არის.

პერიოდების მეოთხე ჯგუფის 50 – 76 წმ, საშუალოდ 63წმ, შემთხვევაში შეიძლება დავუშვათ, რომ ის შეესაბამება (ახლოს არის) მკვლევარების (Zaqarashvili et al. 2007, Okamoto and De Pontieu 2011, Sekse et al. 2013b), მიერ მიღებულ 20 – 55 წმ მონაცემებს, რომელთა დაზუსტებული ახსნა შესაძლებელი იქნება მომავალში, მაღალი სივრცული გარჩევით მიღებული დაკვირვებების თანამედროვე მეთოდებით დამუშავებული შედეგების შესწავლის საფუძველზე.

გამორიცხული არ არის, რომ ნახ. 20 - ზე დაფიქსირებული სპექტროგრამიდან ამორჩეული და შემდეგ გაზომილი ზოგიერთი სპიკულები წარმოადგენენ რამდენიმე მათგანის ზედდების (ურთიერთგადაფარვის) ფაქტს. მაშინ ჩვენი აღმოჩენილი დოპლერის სიჩქარეების რხევები შეიძლება წარმოადგენდნენ რამდენიმე სპიკულის რხევების გასაშუალებულ რხევებს. ამ შემთხვევაში ჭეშმარიტი რხევის პერიოდებს ვერ დავაფიქსირებთ (მაგ., De Moortel and Pascoe 2012). ჩვენი დაკვირვებების სივრცული გარჩევა დაახლოებით არის 1 სეკუნდი. პერირას (Pereira et al. 2012) მიერ Ca II H ხაზში შეფასებული II სპიკულების სიგანე დაახლოებით ტოლია 300 – 350 კილომეტრის, რაც დაახლოებით ნახევარია ჩვენი დაკვირვებების გარჩევის უნარისა. მეორეს მხრივ შვედეთის მაღალი გარჩევის 1 მეტრიანი მზის ტელესკოპით მიღებულმა H α ხაზში დაკვირვებითმა შედეგებმა უჩვენა, რომ სპიკულის დიამეტრია 660 კმ (მაგ., Pasachoff et al. 2009) , რაც დაახლოებით ჩვენი დაკვირვებების გარჩევის უნარის რიგისაა. როგორც აღვნიშნეთ, ჩვენ გავაანალიზეთ სპიკულები, რომლების სპექტროგრამაზე (ნახ. 20) ჩანან, როგორც ცალკეული წარმონაქმნები. ჩვენ უგულვებელყავით ყველა საეჭვო სპიკული, რომელსაც აქვს მულტირეფექტურობის ტენდენცია; ეს ფაქტი ცხადყოფს, რომ გაზომილი სპიკულების უმრავლესობას არ გააჩნია სუბსტრაქცია და, შესაბამისად, მიღებული დაკვირვებითი შედეგი ცალკეულ სპიკულებს უკავშირდება.

დოპლერის სიჩქარეების მცირე პერიოდიანი (<2 წთ) ცვლილება შეიძლება შეესაბამოდეს II-სპიკულების არსებობას, რომელთა სიცოცხლის ხანგრძლივობაც შეადგენს 10 – 150 წამს. ჩვენს მიერ გაზომილი ყველა სპიკული ფიქსირდებოდა დაკვირვების მთელი ხანგრძლივობის დროს (5 – 6 წთ), ამიტომ ისინი მიეკუთვნებიან I-სპიკულების რიგს და ჩვენ დაკვირვებებში II-სპიკულების გამოვლენის არსებობა საეჭვოა. მიწისზედა დაკვირვებები II-სპიკულებზე ჯერჯერობით ვერ ხერხდება, ტელესკოპების შდარებით (კოსმოსურ დაკვირვებებთან შედარებით) დაბალი გარჩევის უნარის გამო (Pereira et al. 2012), თუმცა ბოლო დროს მათზე დაკვირვება თანდათან შესაძლებელი ხდება. ჩვენი კორონოგრაფის მაღალი გარჩევის გამო ზოგადად გამორიცხული არა არის მათი გამოვლენა. აქედან გამომდინარე დოპლერის სიჩქარეების რხევების პერიოდული ცვლილება შეიძლება გამოწვეული იყოს სხვა მიზეზების გამო. ამ პრობლემის ახსნა წარმოადგენს ერთ - ერთ აქტუალურ ამოცანას.

თავი 5. ძირითადი შედეგები

აბასთუმნის ასტროფიზიკურ ობსერვატორიაში 53 სმ-იანი დიდი დაბნელებაგარეშე კორონოგრაფის დახმარებით 1980-1982 წლებში ქრომოსფეროს სხვადასხვა სიმაღლეზე დროის ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში მიღებული იქნა H α და D $_3$ -სპიკულების სპექტროგრამები. H α და D $_3$ -სპიკულების 250 და 110 უწყვეტ სიმაღლეთა სერია მიღებული იქნა 44 და 30 წუთის განმავლობაში, შესაბამისად. გაზომილ იქნა, 28 (H α) და 20 (D $_3$) სპიკულების, როგორც დოპლერის, ასევე ტანგენციალური სიჩქარეები.

აღნიშნული დაკვირვებების ადრინდელი გაზომვების მონაცემების თანამედროვე მეთოდით დამუშავებისა და ანალიზის საფუძველზე მივიღეთ:

1. H α და D $_3$ -სპიკულების მოძრაობების ტრაექტორიები შეკუმშულია იმ ღერძის მიმართ, სადაც გადაზომილია დოპლერის სიჩქარეები;
2. უმრავლეს შემთხვევაში ერთ ჯგუფში გაერთიანებული სპიკულების დოპლერის სიჩქარეები დაახლოებით ერთნაირად იცვლება, ხოლო ტანგენციალური სიჩქარეები არა.
3. დოპლერისა და ტანგენციალურ სიჩქარეებს შორის არ არის რაიმე დამახასიათებელი კავშირი. ტანგენციალური სიჩქარეების დროში ცვლილების შუალედი მცირეა ვიდრე დოპლერის სიჩქარეებისა.
4. H α და D $_3$ -სპიკულების საშუალო ინტენსივობა იცვლება/მცირდება უმნიშვნელოდ სიმაღლის ზრდის მიხედვით;
5. როგორც H α , ასევე - D $_3$ -სპიკულების ნახევარსიგანეები მნიშვნელოვნად არ იცვლება (უმნიშვნელოდ მცირდება) სიმაღლის ზრდის მიხედვით.

შესწავლილ იქნა აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის 53 სმ ლიოს ტიპის კორონოგრაფის, მაღალი დისპერსიის სპექტროგრაფის და მუხტკავშირიანი სინათლის მიმღების Apogee CCD U9000 გამოყენებით თანამედროვე მეთოდით მიღებული ქრომოსფერული სპიკულების სპექტროგრამები (2014წ.). დაკვირვებული თითოეული სპექტროგრამის ექსპოზიციის ხანგრძლივობას შეადგენდა 0.3 წამი, ხოლო სპექტროგრამებს შორის დროის შუალედი საშუალოდ შეადგენდა 4.5 წამი. დაკვირვებას ჰქონდა დროითი მაღალი გარჩევადობა და შეღწევადობა. დამზერითი მასალის დასამუშავებლად გამოყენებულ იქნა სახეცვლილება ერთ-ერთი AlmaP359 კომპიუტერული პროგრამების მოდულისა, რაც გრაფიკული წესით, დოპლერის სიჩქარეების განსაზღვრის მაღალი

სიზუსტის საშუალებას იძლევა. მიღებული იქნა დოპლერის სიჩქარეების დროში ინტერვალით 4,5 წმ განაწილებული სიდიდეები. დაკვირვებითი მონაცემების დასამუშავებლად/ანალიზისათვის გამოვიყენეთ ე.წ. "ლომბის პერიოდოგრამების ალგორითმი არათანაბრად განაწილებული მონაცემებისათვის" (Press et al. 1992).

დაკვირვებითი მასალის დამუშავების შემდეგ ზემოთ აღწერილი თანამედროვე მეთოდით ნაპოვნი იქნა დოპლერის სიჩქარეების რხევითი პერიოდების ოთხი ჯგუფი:

ა) 167 – 358 წმ, (საშუალოდ 263წმ) პერიოდი მკვეთრად გამოიყოფა ყველა დანარჩენი პერიოდებისაგან და მისი საშუალო სიმძლავრე მნიშვნელოვნად აღემატება 95% - იან საიმედოობის ზღვარს. რაც შეიძლება გამოწვეული იყოს ფოტოსფეროში არსებული გლობალური რხევების ზემოქმედებით;

ბ) ნათლად შეიმჩნევა 114 – 156 წმ (საშუალოდ 135წმ) წამიანი პერიოდი, რომლის საშუალო სიმძლავრე ახლოსაა 95% - იან საიმედოობის ზღვართან; რაც შეიძლება გამოწვეული იყოს სპიკულების მაგნიტურ მილში გავრცელებული გრეხვითი ტალღების რხევებით;

გ) პერიოდი 81 – 108 წმ (საშუალოდ 95წმ) სიდიდით, რომლის საშუალო სიმძლავრე არ არის მაღალი, სპიკულების ორივე ჯგუფისათვის სიხშირის თანაბარ მნიშვნელობას იძენს;

დ) პერიოდების 50 – 76 წმ (საშუალოდ 63წმ) საშუალო სიმძლავრეები იმდენად მცირეა, რომ მათი ალბათობა საკმაოდ დაბალია.

ბოლო ორი რხევის პერიოდი შეძლება დაკავშირებულია სპიკულებში გავრცელებულ ტალღებთან. ცნობილია, რომ სპიკულების საშუალო სიციცხლის ხანგრძლივობაა 5-6 წთ, ან ცოტა მეტი, ამიტომ ისინი მიეკუთვნებიან კლასიკურ I ტიპის სპიკულებს.

აბასთუმნის ასტროფიზიკური ობსერვატორიის 53 სმ-იანი ლიოს ტიპის კორონოგრაფის, მაღალი დისპერსიის სპექტროგრაფის ($6\ 000\ \text{\AA}$ ტალღის სიგრძეზე მეორე რიგში დისპერსია $0.96\ \text{\AA}/\text{მმ}$) და მუხტკავშირიანი სინათლის მიმღების Apogee CCD U9000 (პიკსელების რაოდენობა 3056×3056 ; პიკსელების ზომა 12×12 მიკრონი; გამოსახულების ზომა $36.7 \times 36.7\text{მმ}$; გამოსახულების დიაგონალი 51.9მმ) გამოყენებით 24,25-09-2012 და 17,18,19.10.2012 პერიოდში დაკვირვებულ იქნა ქრომოსფერული სპიკულები.

ჩვენს მიერ მიღებული H α -სპიკულების სპექტოგრამები მიღებულია მზის კიდიდან ქრომოსფეროს დაახლოებით 7500 კმ სიმაღლეზე. ყველა დაკვირვებებისათვის ექსპოზიციის ხანგრძლივობა 0.3 წამია, სპექტოგრამებს შორის დროის შუალედი საშუალოდ 4.5 წამია, ხოლო დაკვირვების ხანგრძლივობა შეადგენს დაახლოებით 17-19 წუთს. სერიებს შორის დროის შუალედი დაახლოებით ტოლია 15-20 წთ-ის. დაკვირვება მიმდინარეობდა მზის აღმოსავლეთ კიდეზე ეკვატორიდან $\pm 10^\circ$ ფარგლებში.

დამზერითი მასალის დასამუშავებლად გამოყენებულ იქნა სახეცვლილება ერთ-ერთი AlmaP359 კომპიუტერული პროგრამების მოდულისა (განახლებული - გაიზომა ნახვარსიგანეები), რაც გრაფიკული წესით, ნახვარსიგანეების და დოპლერის სიჩქარეების განსაზღვრის მაღალი სიზუსტის საშუალებას იძლევა. მიღებულ იქნა დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახვარსიგანეების სიდიდეების დროში ინტერვალით 4,5 წმ განაწილებული სიდიდეები. დაკვირვებითი მონაცემების დასამუშავებლად/ანალიზისათვის გამოვიყენეთ ე.წ. "ლომბის პერიოდოგრამების ალგორითმი არათანაბრად განაწილებული მონაცემებისათვის" (Press et al. 1992).

დაკვირვებითი მასალის დამუშავებისა და ანალიზის შედეგად მიღებულია შემდეგი დაკვირვებითი შედეგები:

1. H α სპიკულების დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახვარსიგანეების რხევები ძირითადად ანტიკორელაციაშია ან ფაზაში წანაცვლებულები არიან და იშვიათ შემთხვევაში არიან კორელაციაში;
2. რხევის პერიოდები ძირითადად მეტია 3 წუთზე (> 180 წმ);
3. პერიოდების უმრავლესობა მოთავსებულია 4 – 9 წუთიან (240-540 წმ) შუალედში;
4. H α სპიკულების დოპლერის სიჩქარეები და ნახვარსიგანეები განიცდიან კვაზიპერიოდულ ცვლილებებს პერიოდებით 120 – 700 წმ შუალედში და ამპლიტუდებით 10 – 20 კმ/წმ და 0.30 – 0.75 Å შესაბამისად.

დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახვარსიგანეების დროის მიხედვით ცვლილების ასიმეტრია/ანტიკორელაციას ჩვენს მიერ პირველად არის დაფიქსირებული.

* * *

წარმოდგენილი სადისერტაციო ნაშრომის წარმატებით შესრულებაში დიდი წვლილი მიუძღვით ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტის და ე. ხარაძის აბასთუმნის ასტრობიზიკური ობსერვატორიის თანამშრომლებს, პროფესორებს და მკვლევარებს, რისთვისაც მინდა დიდი მადლობა გადავუხადო ქალბატონებს და ბატონებს: ჩემს სამეცნიერო ხელმძღვანელებს პროფესორ ნ. შათაშვილს და ფიზიკა მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორს ვ. ყულიჯანიშვილს, რომლებიც დამეხმარნენ, როგორც დაკვირვებითი მასალის მიღებაში ასევე მის დამუშავებაში, დაკვირვებითი მონაცემების ანალიზში/ინტერპრეტაციაში, მზის პლაზმის ფიზიკის შესწავლაში და სამუშაოსთან დაკავშირებული სიძნელეების გადაჭრაში. დიდი მადლობა მინდა გადავუხადო პროფესორ თ. ზაქარაშვილს, რომელმაც შემასწავლა მზის სპიკულებში მიმდინარე ფიზიკური პროცესები და გამაცნო მზის სპიკულებში უცხოეთში მიმდინარე კვლევები. დიდი მადლობა მინდა გადავუხადო პროფესორ თ. კვერნაძეს რომლებიც მომეხმარა დაკვირვებითი მონაცემების დამუშავებასა და მიღებული შედეგების ინტერპრეტაციაში. დიდი მადლობა მინდა გადავუხადო დოქტორ ვ. კახიანს დოპლერის სიჩქარეებისა და ნახევარსიგანეების გამოსათვლელ AlmaP400 კომპიუტერული პროგრამების მოდულის სახეცვლილების დაწერისთვის, რამაც მნიშვნელოვნად გამიაღვილა დაკვირვებითი მასალის დამუშავების პროცესი. დიდი მადლობა მინდა გადავუხადო ფიზიკა მათემატიკის მეცნიერებათა დოქტორს ე. ხუციშვილს, რომელიც დამეხმარა როგორც დაკვირვებითი მასალის მიღებაში, ასევე მის დამუშავებაში, დაკვირვებითი მონაცემების ანალიზში/ინტერპრეტაციაში.

ლიტერატურა

- Ajabshirizadeh A., Tavabi E., Koutchmy S., Wavelet analysis of solar macro-spicule recurrences, *New Astron.*, 2008, 13, 93
- Ajabshirizadeh, A.; Tavabi, E.; Koutchmy, S., Magneto-acoustic wave oscillations in solar spicules, *Astrophysics and Space Science*, 2009, Volume 319, Issue 1, pp.31-35
- Alphones C. Sterling, Solar Spicules: A Review of Recent Models and Targets for Future Observations – (Invited Review) *Solar physics*, 2000, 196, Issue 1, 79-111.
- Alphonse C. Sterling, Louise K. Harra, and Ronald L. Moore, Fibrilla Chromospheric Spicule-like Counterparts to an Extreme-ultraviolet and Soft X-ray Blowout Coronal Jet, *The Astrophysical Journal*, 2010, 722, Issue 2 1644–1653
- Alphonse C. Sterling, *Solar Physics*, 196, 79 (2000)
- Anan, Tetsu; Kitai, Reizaburo; Kawate, Tomoko; Matsumoto, Takuma; Ichimoto, Kiyoshi; Shibata, Kazunari; Hillier, Andrew; Otsuji, Kenichi; Watanabe, Hiroko; Ueno, Satoru; Nagata, Shin'ichi; Ishii, Takako T.; Komori, Hiroyuki; Nishida, Keisuke; Nakamura, Tahei; Iseobe, Hiroaki; Hagino, Masaoki, Spicule Dynamics over a Plage Region, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2012, Vol.62, No.4, pp.871—877
- Archontis, V., Tsinganos, K., & Gontikakis, C., Recurrent solar jets in active regions, *A&A*, 2010, Volume 512, id.L2, 4 pp
- Aschwanden. M.J., *Physics of the Solar Corona. An Introduction*, by Published by Praxis Publishing Ltd., Chichester, UK, and Springer-Verlag Berlin ISBN., 2004, 3-540-22321-5
- Athay R. G., Are spicules related to coronal heating? *Solar phys.*, 2000, 197, Issue 1, 31-42.
- Athay R. G., Menzel D, H., A Model of the Chromosphere from the Helium and Continuum Emissions. *Astrophysical Journal*, 1956, vol. 123, p.285
- Athay R. G., The number of the spicules in the middle chromosphere. *Astrophys. J.*, 1959, 129, 164-171
- Athay R. G., Tomas R. N., The numbers and motions of Solar spicules., *Astrophys. J.*, 1957, 125, 804-810.
- Athay, R. G., & Holzer, T. E., The role of spicules in heating the solar atmosphere, *ApJ*, 1982, Part 1, vol. 255, Apr. 15, p. 743-752
- Axford, W. I., McKenzie, J. F., Sukhorukova, G. V., Banaszkiwicz, M., Czechowski, A., Ratkiwicz, R., Acceleration of the High Speed Solar Wind in Coronal Holes, *Space Sci. Rev.*, 1999, v. 87, Issue 1/2, p. 25-41
- Banos G., Solar spicules observed through a K-Filter. *Solar phys.*, 1973, Volume 32, Issue 2, pp.337-344
- Beckers J. M., A Study of the Fine Structures in the Solar Chromosphere, Ph.D. Thesis, University of Utrecht (AFCRL-Environmental Research Paper, No.49), (1964), 131 pages
- Beckers J. M., On the relation between Solar Granules and spicules. *Astrophys. J.*, 1964, 140, 1339-1340.
- Beckers J. M., Solar spicules (Invited Review Paper). *Solar phys.*, 1968, Vol.3, Issue 3, 367-433
- Beckers, J. M., Solar Spicules, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1972, vol. 10, p.73
- Beckers, J. M., Temperature variation on the Sun with heliographic latitude, *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 1960, Vol. 15, p.85

- Braginskii, S. I. Transport processes in plasma, in Rev. Plasma Phys. (New York: Consultants Bureau), 1965, 1
- Braun D., Lindoe C., A solar chromosphere and spicule model based on farinfrared limb observations, *Astrophys. J.*, 1987, vol. 320, №2 pt 1, 898-903
- Budnik, F., Observational evidence for coronal mass injection by "evaporation" of spicular plasma, *Astronomy and Astrophysics*, 1998, v.334, p.L77-L80
- Cargill, P. J.; Spicer, D. S.; Zalesak, S. T., *The Astrophysical Journal*, Volume 488, Issue 2, pp. 854, (1997)
- Carlsson, M., Stein, Robert F., Does a nonmagnetic solar chromosphere exist?, *Astrophysical Journal*, Part 2 - Letters (ISSN 0004-637X), 1995, vol. 440, no. 1, p. L29-L32
- Carter B. K. and R. Erdélyi, Sausage and kink oscillations in incompressible annular magnetic cylinders, *A&A* , 2007, Volume 475, Issue 1, 2007, pp.323-331
- Centeno, R., *Chromospheric Modeling, Sunspot*, New Mexico, USA. Edited by J. Leibacher, R. F. Stein, and H. Uitenbroek. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2006, p.291
- Centeno, Rebecca; Trujillo Bueno, Javier; Asensio Ramos, Andrés, On the Magnetic Field of Off-limb Spicules, *The Astrophysical Journal*, 2010, Volume 708, Issue 2, pp. 1579-1584
- Cheng, Q.-Q., Fluid Motions in the Solar Atmosphere - Part Two - a Spicule Model with Emission Lines, *Astronomy and Astrophysics*, 1992b, Vol.266, NO. 1/DECI, P. 549,
- Cheng, Q.-Q., Fluid motions in the solar atmosphere. I - On the origin and decay of spicules. II - A spicule model with emission lines, *Astronomy and Astrophysics* (ISSN 0004-6361), 1992a, *A&A*, vol. 266, no. 1, p. 537-559
- Cheng, Q.-Q., Fluid motions in the solar atmosphere. III - A possible explanation of the downflows, *Astronomy and Astrophysics* (ISSN 0004-6361), 1992c, vol. 262, no. 2, p. 581-586
- Christopoulou E.B., A. A. Georgakilas and S. Kouchmy, Fine Structure of the Magnetic Chromosphere: Near-Limb Imaging, Data Processing and Analysis of Spicules and Mottles, *Solar physics*, 2001, v. 199, Issue 1, p. 61-80
- Coats R. J., A model of the chromosphere from millimeter wavelength observations. *Astrophys. J.*, 1958, 128, 89-91
- Cook, J. W.; Brueckner, G. E.; Bartoe, J.-D. F.; Socker, D. G., *Colloq.* 86, held in Washington, DC, 27-29 August, 1984. Naval Research Laboratory, 1984., p.32 (1984)
- Cranmer, S. R., van Ballegooijen, A. A., & Edgar, R. J., Self-consistent Coronal Heating and Solar Wind Acceleration from Anisotropic Magnetohydrodynamic Turbulence, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2007, Volume 171, Issue 2, pp. 520-551
- Curdt, W., Tian, H., Kamio, S.: *Sol. Phys.*, 2012, 280, 417
- Dara, H. C., Koutchmy, S., & Suematsu, Y., Properties of H α spicules from disk and limb high-resolution observations, *Solar Jets and Coronal Plumes*, Proceedings of an International meeting, Guadeloupe, France, 23-26 February 1998, Publisher: Paris: European Space Agency (ESA), 1998, ESA SP-421 . ISBN: 9290926848, p.255
- De Moortel and Pascoe D. J., The Effects of Line-of-sight Integration on Multistrand Coronal Loop Oscillations, *The Astrophysical Journal*, 2012, Volume 746, Issue 1, article id. 31, 6 pp
- De Moortel, I., Hood, A., W., Gerrard, C. L., and Brooks, S. J., The damping of slow MHD waves in solar coronal magnetic fields. III. The effect of mode coupling, *Astronomy and Astrophysics*, 2004, v.425, p.741-752
- De Pontieu B. & I. De Moortel & J. Martinez-Sykora & S. W. McIntosh *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 845, Issue 2, article id. L18, 7 pp. (2017b)

- De Pontieu B., Hansteen, V. H., Rouppe van der Voort, L., van Noort, M., Carlsson, M., High-Resolution Observations and Modeling of Dynamic Fibrils, *The Astrophysical Journal*, (2007c), Volume 655, Issue 1, pp. 624-641
- De Pontieu B., Haerendel G., Weakly damped Alfvén waves as drivers for spicules, *Astronomy and Astrophysics*, Weakly damped Alfvén waves as drivers for spicules, *Astronomy and Astrophysics*, 1998, v.338, p.729-736
- De Pontieu B., Numerical simulations of spicules driven by weakly-damped Alfvén waves. I. WKB approach, *Astronomy and Astrophysics*, 1999, v.347, p.696-710
- De Pontieu B., R. Erdelyi, The nature of moss and lower atmospheric seismology, *Royal Society of London Transactions Series A*, 2006, vol. 364, Issue 1839, p.383-394
- De Pontieu, B., Erdelyi, R., and De Wijn, A. G., Intensity Oscillations in the Upper Transition Region above Active Region Plage, *The Astrophysical Journal*, 2003, Volume 595, Issue 1, pp. L63-L66
- De Pontieu, B., et al.: *Science* 346(6207), 1255732, 2014
- De Pontieu, B., Hansteen, V. H., Rouppe van der Voort, L., van Noort, M., & Carlsson, M., High-Resolution Observations and Modeling of Dynamic Fibrils, *The Astrophysical Journal*, 2007, Volume 655, Issue 1, pp. 624-641
- De Pontieu, Bart; Erdélyi, Robert; James, Stewart P., Solar chromospheric spicules from the leakage of photospheric oscillations and flows, *Nature*, 2004, Volume 430, Issue 6999, pp. 536-539
- De Pontieu, Juan Mart, nez-Sykora, Georgios Chintzoglou, *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 849, Issue 1, article id. L7, 7 pp. (2017a).
- De Pontieu, Wijn, A. G., McIntosh, S. W., &, On the Propagation of p-Modes Into the Solar Chromosphere, *The Astrophysical Journal Letters*, 2009, Volume 702, Issue 2, pp. L168-L171
- De Pontieu, B.; Carlsson, M.; Rouppe van der Voort, L. H. M.; Rutten, R. J.; Hansteen, V. H.; Watanabe, H., Ubiquitous Torsional Motions in Type II Spicules, *The Astrophysical Journal Letters*, 2012, Volume 752, Issue 1, article id. L12, 6 pp
- De Pontieu, B.; McIntosh, S. W.; Carlsson, M.; Hansteen, V. H.; Tarbell, T. D.; Schrijver, C. J.; Title, A. M.; Shine, R. A.; Tsuneta, S.; Katsukawa, Y.; Ichimoto, K.; Suematsu, Y.; Shimizu, T.; Nagata, S., Chromospheric Alfvénic Waves Strong Enough to Power the Solar Wind, *Science*, 2007a, Volume 318, Issue 5856, pp. 1574
- De Pontieu, B.; McIntosh, S. W.; Carlsson, M.; Hansteen, V. H.; Tarbell, T. D.; Boerner, P.; Martinez-Sykora, J.; Schrijver, C. J.; Title, A. M., The Origins of Hot Plasma in the Solar Corona, *Science*, 2011, Volume 331, Issue 6013, pp. 55
- De Pontieu, Bart; McIntosh, Scott W.; Hansteen, Viggo H.; Schrijver, Carolus J., Observing the Roots of Solar Coronal Heating—in the Chromosphere, *The Astrophysical Journal Letters*, 2009, Volume 701, Issue 1, pp. L1-L6
- De Pontieu, Bart; McIntosh, Scott; Hansteen, Viggo H.; Carlsson, Mats; Schrijver, Carolus J.; Tarbell, Theodore D.; Title, Alan M.; Shine, Richard A.; Suematsu, Yoshinori; Tsuneta, Saku; Katsukawa, Yukio; Ichimoto, Kiyoshi; Shimizu, Toshifumi; Nagata, Shin'ichi, A Tale of Two Spicules: The Impact of Spicules on the Magnetic Chromosphere, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2007b, Vol.59, No.SP3, pp.S655--S662
- Dizer M.: Etude des films cinématographiques de la chromosphère solaire au bord du disque. *Cont. Red.*, 1952, 235, 1016-1018.
- Dunn R. B., H α chromosphere gradients., *Astron. J.*, 1957, Vol. 62, p. 141-142
- Dunn R. B., Solar limb darkening near λ 6563 from 0.9 to 100R. *Astrophys. J.*, 1959, 130, 972-984.

- Ebadi, H., Zaqarashvili, T.V., Zhelyazkov, I.: *Astrophys. Space Sci.*, 2012, 337, 33
- Ebadi, H.; Zaqarashvili, T. V.; Zhelyazkov, I., Observation of standing kink waves in solar spicules, *Astrophysics and Space Science*, 2012, Volume 337, Issue 1, pp.33-37
- Observation of standing kink waves in solar spicules, *Ap&SS*, 337, 33
- Ebadi, H.; Zaqarashvili, T. V.; Zhelyazkov, I., Wave Propagation in Solar Spicules, 3RD SCHOOL AND WORKSHOP ON SPACE PLASMA PHYSICS. AIP Conference Proceedings, 2011, Volume 1356, pp. 117-122
- Edl'én, B., Die Deutung der Emissionslinien im Spektrum der Sonnenkorona. Mit 6 Abbildungen, *Zeitschrift für Astrophysik*, 1943, Vol. 22, p.30
- Edwin P. and Roberts B., Wave propagation in a magnetic cylinder, *Solar Physics (ISSN 0038-0938)*, 1983, vol. 88, Oct. 1983, p. 179-191.
- Erdélyi, R.; Fedun, V., Are There Alfvén Waves in the Solar Atmosphere? *Science*, 2007, Volume 318, Issue 5856, pp. 1572
- Erdélyi, R.; James, S. P., Can ion-neutral damping help to form spicules? II. Random driver, *Astronomy and Astrophysics*, 2004, v.427, p.1055-1064
- Filippov, B., & Koutchmy, S., On the origin of the prolate solar chromosphere, *Solar Physics*, 2000, v. 196, Issue 2, p. 311-320
- Fontenla, J. M., Avrett, E. H., & Loeser, R., Energy balance in the solar transition region. III - Helium emission in hydrostatic, constant-abundance models with diffusion, *Astrophysical Journal*, 1993, vol. 406, no. 1, p. 319-345
- Gabriel, A. H., The Solar Corona, *The Sun: A Laboratory for Astrophysics*, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute, held in Crieff, Scotland. Dordrecht: Reidel, 1992, edited by J. T. Schmelz and J. C. Brown. NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C, 1992, Volume 373, p.277
- Goodman, Michael L., Acceleration of Type II Spicules in the Solar Chromosphere, *The Astrophysical Journal*, 2012, Volume 757, Issue 2, article id. 188, 8 pp
- Goossens, M., Soler, R., Terradas, J., Van Doorselaere, T., Verth, G.: *Astrophys. J.*, 2014, 788, 9
- Grossmann-Docrth. U., Uexküll M., Spectral investigation of chromospheric fine structure, *Solar phys.*, 1971, 20, 31-46.
- Grossmann-Docrth. U., Uexküll M.: Spectral investigation of chromospheric II. The nature of the mottles and a model of the overall structure. *Solar phys.*, 1973, 28, 319-332.
- Guerreiro, N.; Carlsson, M.; Hansteen, V., Numerical Simulations of Spicule Acceleration , *The Astrophysical Journal*, 2013, Volume 766, Issue 2, article id. 128, 12 pp.
- Haerendel, G., Weakly damped Alfvén waves as drivers of solar chromospheric spicules, *Nature*, 1992, vol. 360, no. 6401, p. 241-243
- Haerendel, G.; Shiokawa, K.; Baumjohann, W., Reply [to “Comment on ‘Braking of high-speed flows in the near-Earth Tail’ by K. Shiokawa, W. Baumjohann, and G. Haerendel”], *Geophysical Research Letters*, 1998, Volume 25, Issue 18, p. 3503-3503
- Hansteen, V. H.; De Pontieu, B.; Rouppe van der Voort, L.; van Noort, M.; Carlsson, M., Dynamic Fibrils Are Driven by Magnetoacoustic Shocks, *The Astrophysical Journal*, 2006, Volume 647, Issue 1, pp. L73-L76
- Harrison, R. A., Harra, L. K., Brković, A., & Parnell, C. E., A study of the unification of quiet-Sun transient-event phenomena, *Astronomy and Astrophysics*, 2003, v.409, p.755-764
- Hasan, S. S., and Kalkofen, W. Excitation of Oscillations in Photospheric Flux Tubes through Buffeting by External Granule, *The Astrophysical Journal*, 1999, Volume 519, Issue 2, pp. 899-910

- He, J.-S., Tu, C.-Y., & Marsch, E., Modeling of Solar Wind in the Coronal Funnel with Mass and Energy Supplied at 5 Mm, *Solar Physics*, 2008, Volume 250, Issue 1, pp.147-158
- He, J.-S., Tu, C.-Y., Marsch, E., et al.: *Astrophys. J.*, 2009b, **497**, 525
- He, Jansen; Marsch, Eckart; Tu, Chuanyi; Tian, Hui., Excitation of Kink Waves Due to Small-Scale Magnetic Reconnection in the Chromosphere?, *The Astrophysical Journal Letters*, 2009, Volume 705, Issue 2, pp. L217-L222
- Heggland L., B. De Pontieu, V.H. Hansteen, Numerical Simulations of Shock Wave-driven Chromospheric Jets, *The Astrophysical Journal*, 2007, Volume 666, Issue 2, pp. 1277-1283
- Hollweg, J. V., Alfvén waves in the solar atmosphere. II - Open and closed magnetic flux tubes, *Solar Physics*, 1981, vol. 70, Mar. 1981, p. 25-66
- Hollweg, J.V., Jackson, S., Galloway, D., Alfvén waves in the solar atmosphere. III - Nonlinear waves on open flux tubes, *Solar Physics*, 1982, vol. 75, Jan. 1982, p. 35-61
- Hollweg, J.V., On the origin of solar spicules, *Astrophysical Journal*, 1982, Part 1, vol. 257, June 1, p. 345-353
- Hollweg, Joseph V., Cyclotron resonance in coronal holes: 3. A five-beam turbulence-driven model, *Journal of Geophysical Research*, 2000, Volume 105, Issue A7, p. 15699-15714
- Isabel Lipartito, ; Judge, Philip G.; Reardon, Kevin; Cauzzi, Gianna, The Solar Chromosphere Observed at 1 Hz and 0."2 Resolution, *The Astrophysical Journal*, 2014, Volume 785, Issue 2, article id. 109, 17 pp.
- Isobe, H., Proctor, M. R. E., & Weiss, N. O., Convection-driven Emergence of Small-Scale Magnetic Fields and their Role in Coronal Heating and Solar Wind Acceleration, *The Astrophysical Journal*, 2008, Volume 679, Issue 1, pp. L57-L60
- J.-S. He^{1,2}, C.-Y. Tu¹, E. Marsch², L.-J. Guo¹, S. Yao¹, and H. Tian, Upward propagating high-frequency Alfvén waves as identified from dynamic wave-like spicules observed by SOT on Hinode, *Astronomy and Astrophysics*, 2009, Volume 497, Issue 2, 2009, pp.525-535
- James A., Klimchuk, Optics and mechanisms for the Extreme-Ultraviolet Imaging Spectrometer on the Solar-B satellite , *Applied Optics IP*, 2006, vol. 45, Issue 34, pp.8674-8688
- James, S. P.; Erdélyi, R.; De Pontieu, B., Can ion-neutral damping help to form spicules? *Astronomy and Astrophysics*, 2003, v.406, p.715-724
- Jess, David B.; Mathioudakis, Mihalis; Erdélyi, Robert; Crockett, Philip J.; Keenan, Francis P.; Christian, Damian J., Alfvén Waves in the Lower Solar Atmosphere, *Science*, 2009, Volume 323, Issue 5921, pp. 1582
- Juan Martínez-Sykora, Viggo Hansteen, and Fernando Moreno-Insertis, On the Origin of the Type II Spicules: Dynamic Three-dimensional MHD Simulations, *The Astrophysical Journal*, 2011, Volume 736, Issue 1, article id. 9, 12 pp
- Juan, Martínez-Sykora, ; De Pontieu, Bart; Leenaarts, Jorrit; Pereira, Tiago M. D.; Carlsson, Mats; Hansteen, Viggo; Stern, Julie V.; Tian, Hui; McIntosh, Scott W.; Rouppe van der Voort, Luc, A Detailed Comparison between the Observed and Synthesized Properties of a Simulated Type II Spicule, *The Astrophysical Journal*, 2013, Volume 771, Issue 1, article id. 66, 25 pp.
- Judge, P. G., & Carlsson, M., On the Solar Chromosphere Observed at the LIMB with Hinode, *The Astrophysical Journal*, 2010, Volume 719, Issue 1, pp. 469-473
- Judge, P. G., Tritschler, A., & Chye Low, B., Thermal Fine Structure and Magnetic Fields in the Solar Atmosphere: Spicules and Fibrils, *The Astrophysical Journal Letters*, 2011, Volume 730, Issue 1, article id. L4, 6 pp. 2011

- Jun Zhang, Jingxiu Wang, Chik-Yin lee, and Haimin Wang, Macrospicules Observed with H α Against the Quiet Solar Disk , *Solar Physics*, 2000, v. 194, Issue 1, p. 59-72
- Kamio, S., Curdt, W., Teriaca, L., Inhester, B., Solanki, S.K.: *Astron. Astrophys.*, 2010, 510, L1
- Khodachenko, M. L., & Zaitsev, V. V., Formation of Intensive Magnetic Flux Tubes in a Converging Flow of Partially Ionized Solar Photospheric Plasma, *Astrophysics and Space Science*, 2002, v. 279, Issue 4, p. 389-410
- Khodachenko, M. L., Arber, T. D., Rucker, H. O., & Hanslmeier, A., Collisional and viscous damping of MHD waves in partially ionized plasmas of the solar atmosphere, *Astronomy and Astrophysics*, 2004 v.422, p.1073-1084
- Khutsishvili E. V., Identification of D₃ and H α spicules. *Astron. Nachr*, 1995, Vol. 316, Issue 5, p. 291-293
- Khutsishvili, E. V. Kulidzanishvili, T. Kvernadze, T.V. Zaqarashvili, V. Kakhiani, D. Khutsishvili, M. Sikharulidze, Quasi-periodic variations in Doppler velocities of H α spicules, *Astrophysics and Space Science*, 2014, Volume 354, Issue 2, pp.259-266
- Khutsishvili, E. V., Continuous spectral observations of spicules, *Solar Physics*, 1986, vol. 106, p. 75-86
- Kim, Y.-H., Bong, S.-C., Park, Y.-D., Cho, K.-S.: *J. Korean Astron. Soc.*, 2008, 41, 173
- Kim, Yeon-Han; Bong, Su-Chan; Park, Young-Deuk; Cho, Kyung-Suk; Moon, Yong-Jae; Suematsu, Yoshinori, Estimation of Spicule Magnetic Field Using Observed MHD Waves by the Hinode SOT, *Journal of the Korean Astronomical Society*, 2008, vol. 41, no. 6, pp. 173-180
- Kobanov N. I., Makarchik D. V., An experiment to observe the vertical gradient in line-of-sight velocity oscillations, *Solar Physics*, 2001, v. 204, Issue 1/2, p. 3-10
- Kosugi, T.; Matsuzaki, K.; Sakao, T.; Shimizu, T.; Sone, Y.; Tachikawa, S.; Hashimoto, T.; Minesugi, K.; Ohnishi, A.; Yamada, T.; Tsuneta, S.; Hara, H.; Ichimoto, K.; Suematsu, Y.; Shimojo, M.; Watanabe, T.; Shimada, S.; Davis, J. M.; Hill, L. D.; Owens, J. K.; Title, A. M.; Culhane, J. L.; Harra, L. K.; Doschek, G. A.; Golub, L., The Hinode (Solar-B) Mission: An Overview , *Solar Physics*, 2007, Volume 243, Issue 1, pp.3-17
- Koutchmy, S. and Loucif, M., Properties of Impulsive Events in a Polar Coronal Hole (With 6 Figures), Berlin Heidelberg New York, 1991, p.152
- Koutchmy, S., Stellmacher, G., Photometric study of chromospheric and coronal spikes observed during the total solar eclipse of 30 June, 1973, *Solar Physics*, 1976, vol. 49, Aug. 1976, p. 253-265
- Kudoh, Takahiro; Shibata, Kazunari, *The Astrophysical Journal*, Volume 514, Issue 1, pp. 493 (1999)
- Kukhianidze, V. T., Zaqarashvili, T. V., Khutsishvili, E. V., Observation of kink waves in solar spicules, *Astronomy and Astrophysics*, 2006, Volume 449, Issue 2, April II 2006, pp.L35-L38
- Kulidzanishvili V. I., Dynamics of H alpha spicules according to spectral observations at various heights of the solar chromosphere, 1980, *Solar Physics*, vol. 66, June 1980, p. 251-258
- Kulidzanishvili, V. I.; Nikolskii, G. M., Properties of the solar chromosphere H-alpha spicules as observed spectrally, *Solar Physics*, 1978, vol. 59, Sept. 1978, p. 21-28
- Kulidzanishvili, V. I.; Zhugzhda, Iu. D. On the problem of spicular oscillations, *Solar Physics*, vol. 88, Oct. 1983, p. 35-41
- Kuridze, D., et al.: *Astrophys. J.*, 2015, 802, 26
- Kuridze, D., et al.: *Astrophys. J.*, 2016, 830, 133

- Kuridze, D., Morton, R. J., Erdélyi, R., Dorrian, G. D., Mathioudakis, M., Jess, D. B., & Keenan, F. P., Transverse Oscillations in Chromospheric Mottles, *The Astrophysical Journal*, 2012, Volume 750, Issue 1, article id. 51, 5 pp.
- Langangen, B. De Pontieu, M. Carlsson, V. H. Hansteen, G. Cauzzi, and K. Reardon, Search for High Velocities in the Disk Counterpart of Type II Spicules, 2008, *The Astrophysical Journal*, 2008, Volume 679, Issue 2, pp. L167-L170
- Leenaarts, J., Carlsson, M., & van der Voort, L. R., The Formation of the H α Line in the Solar Chromosphere, *The Astrophysical Journal*, 2012, Volume 749, Issue 2, article id. 136, 14 pp
- Lei Ni, Bernhard Kliem, Jun Lin, and Ning Wu: FAST MAGNETIC RECONNECTION IN THE SOLAR CHROMOSPHERE MEDIATED BY THE PLASMOID INSTABILITY, *The Astrophysical Journal*, 2015, Volume 799, Number 1, p. 79
- Leighton R. B., The Princeton balloon observations. *Int. Ast. Ron. Union symp.*, 1961, №12, 321-325.
- Leighton, Robert B.; Noyes, Robert W.; Simon, George W., Velocity Fields in the Solar Atmosphere. I. Preliminary Report, *Astrophysical Journal*, 1962, vol. 135, p.474
- Lippincott S. L., The spicule structure of the chromosphere, *Astronomical Journal*, 1959, Vol. 61, p. 8
- Livshits, M. A., *Soviet Astronomy*, Vol. 10, p.570 (1967)
- Lorrain, Paul; Koutchmy, Serge, Two Dynamical Models for Solar Spicules, *Solar Physics*, 1996, Volume 165, Issue 1, pp.115-137
- Loukicheva, M.; Solanki, S. K.; Carlsson, M.; White, S. M., Millimeter radiation from a 3D model of the solar atmosphere. I. Diagnosing chromospheric thermal structure, *Astronomy & Astrophysics*, 2015, Volume 575, id.A15, 12 pp
- Madjarska M. S., K. Vanninathan, and J. G. Doyle , Can coronal hole spicules reach coronal temperatures?, *Astronomy & Astrophysics*, 2011, Volume 532, id.L1, 4 pp
- Madjarska, M. S.; Doyle, J. G.; Hochedez, J.-F.; Theissen, A., Macrospicules and blinkers as seen in Shutterless EIT 304 Å, *Astronomy and Astrophysics*, 2006, Volume 452, Issue 2, June III 2006, pp.L11-L14
- Mahajan, S. M.; Miklashevski, R.; Nikol'skaya, K. I.; Shatashvili, N. L., Formation and heating of the solar corona — theory and simulation, *Advances in Space Research*, Volume 30, Issue 3, 571, 2002b
- Mahajan, S. M.; Miklaszewski, R.; Nikol'Skaya, K. I.; Shatashvili, N. L., Formation and primary heating of the solar corona: Theory and simulation, *Physics of Plasmas*, 2001, Volume 8, Issue 4, pp. 1340-1357
- Mahajan, S. M.; Miklaszewski, R.; Nikol'skaya, K. I.; Shatashvili, N. L., The coronal hole creation: theory and simulation, *Advances in Space Research*, Volume 30, Issue 3, 545, 2002s
- Mahajan, S. M.; Miklaszewski, R.; Nikol'Skaya, K. I.; Shatashvili, N. L., Formation and primary heating of the solar corona: Theory and simulation, *Physics of Plasmas*, Volume 8, Issue 4, 1340, 2001
- Mahajan, Swadesh M.; Miklaszewski, Ryszard; Nikol'skaya, Komunela I.; Shatashvili, Nana L., Dynamical Creation of Channels for Particle Escape in the Solar Corona, eprint arXiv:astro-ph/0308012, 2003
- Mariska, J. T.; Hollweg, J. V., *Astrophysical Journal*, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 296, Sept. 15, 1985, p. 746 (1985)

- Marsch, E., & Tu, C.-Y., Solar Wind and Chromospheric Network, *Solar Physics*, 1997, v. 176, Issue 1, p. 87-106
- Martínez-Sykora, J. B. De Pontieu, V. H. Hansteen, L. Rouppe van der Voort, M. Carlsson, T. Pereira M. D., *Science*, Volume 356, Issue 6344, pp. 1269-1272 (2017)
- Martínez-Sykora, Juan; Hansteen, Viggo; Moreno-Insertis, Fernando, On the Origin of the Type II Spicules: Dynamic Three-dimensional MHD Simulations, *The Astrophysical Journal*, 2011, Volume 736, Issue 1, article id. 9, 12 pp
- Matsuno, Koh; Hirayama, Tadashi, The height distribution of the kinetic temperature and turbulent velocity of solar H-alpha spicules, *Solar Physics* (ISSN 0038-0938), 1988, vol. 117, no. 1, p. 21-36
- Matthaeus, W. H.; Zank, G. P.; Oughton, S.; Mullan, D. J.; Dmitruk, P., Coronal Heating by Magnetohydrodynamic Turbulence Driven by Reflected Low-Frequency Waves, *The Astrophysical Journal*, 1999, Volume 523, Issue 1, pp. L93-L96
- McIntosh, Scott W.; de Pontieu, Bart; Carlsson, Mats; Hansteen, Viggo; Boerner, Paul; Goossens, Marcel, Alfvénic waves with sufficient energy to power the quiet solar corona and fast solar wind, *Nature*, 2011, Volume 475, Issue 7357, pp. 477-480
- McIntosh, Scott W.; De Pontieu, Bart, High-Speed Transition Region and Coronal Upflows in the Quiet Sun, High-Speed Transition Region and Coronal Upflows in the Quiet Sun, *The Astrophysical Journal*, 2009, Volume 707, Issue 1, pp. 524-538
- McIntosh, Scott; Hansteen, Viggo H.; Carlsson, Mats; Schrijver, Carolus J.; Tarbell, Theodore D.; Title, Alan M.; Shine, Richard A.; Suematsu, Yoshinori; Tsuneta, Saku; Katsukawa, Yukio; Ichimoto, Kiyoshi; Shimizu, Toshifumi; Nagata, Shin'ichi, A Tale of Two Spicules: The Impact of Spicules on the Magnetic Chromosphere, 2007, Vol.59, No.SP3, pp.S655--S662
- McLaughlin, J. A.; Verth, G.; Fedun, V.; Erdélyi, R., Generation of Quasi-periodic Waves and Flows in the Solar Atmosphere by Oscillatory Reconnection, *The Astrophysical Journal*, 2012, Volume 749, Issue 1, article id. 30, 10 pp
- Michael L. Goodman, Acceleration of Type 2 Spicules in the Solar Chromosphere. II. Viscous Braking and Upper Bounds on Coronal Energy Input, *The Astrophysical Journal*, 2014, Volume 785, Issue 2, article id. 87, 8 pp.
- Michard R., La raie H α dans la chromosphère, *Annales d'Astrophysique*, 1959, Vol. 22, p.547-570
- Michard R., Spectrophotométrie des raies d'émission intenses de la chromosphère, *Annales d'Astrophysique*, 1956, Vol. 19, p.1-8
- Michard R., Spicules and Their Surroundings, *Chromospheric Fine Structure: Proceedings from IAU Symposium no. 56 held at Surfer's Paradise, Qld., Australia, 3-7 September 1973*. Edited by R. Grant Athay. International Astronomical Union. Symposium no. 56, Dordrecht; Boston: Reidel, 1974, p.3-22
- Mohler, Orren C., Eolipse observations of the structure of the chromosphere, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1951, Vol. 111, p.630-633
- Moortel and Pascoe, Propagating Wave Phenomena Detected in Observations and Simulations of the Lower Solar Atmosphere, *The Astrophysical Journal*, 2012, Volume 746, Issue 2, article id. 183, 12 pp
- Moortel, I. D., & Pascoe, D. J., The Effects of Line-of-sight Integration on Multistrand Coronal Loop Oscillations, *The Astrophysical Journal*, 2012, Volume 746, Issue 1, article id. 31, 6 pp.
- Morton, R. J.; Verth, G.; Hillier, A.; Erdélyi, R., The Generation and Damping of Propagating MHD Kink Waves in the Solar Atmosphere, *The Astrophysical Journal*, 2014, Volume 784, Issue 1, article id. 29, 10 pp

- Morton. R. J., Magneto-seismological insights into the penumbral chromosphere and evidence for wave damping in spicules, *Astronomy & Astrophysics*, 2014, Volume 566, id.A90, 13 pp
- Mosher J. M., Pope T. P., A statistical study of spicule inclinations, *Solar Physics*, 1977, vol. 53, Aug. 1977, p. 375-384
- Murawski, K.; Zaqarashvili, T. V., Numerical simulations of spicule formation in the solar atmosphere , *Astronomy and Astrophysics*, 2010, Volume 519, id.A8, 9 pp.
- Murawski, K., Srivastava, A. K., and Zaqarashvili, T. V., Numerical simulations of solar macrospicules , *Astronomy & Astrophysics*, 2011, Volume 535, id.A58, 9 pp. *New Astronomy*, 2008, Volume 13, Issue 2, p. 93-97.
- Nikolsky G. M., The observation of the chromospheric fine structure by the 53-cm lyot coronagraph., *Solar phys.*, 1970, Volume 12, Issue 3, pp.379-390
- Nikolsky, G. M.; Platova, A. G., Motions of H α -spicules along the solar limb, *Solar Physics*, 1971, Volume 18, Issue 3, pp.403-409
- Nishizuka N., M. Shimizu, T. Nakamura, K. Otsuji, T.J. Okamoto, Y. Katsukawa, K. Shibata, *Nature*, 2009, 475, 477
- Nistico, G., Bothmer, V., Patsourakos, S., et al.: *Sol. Phys.*, 2009, 87, 259
- O'Shea, E., Muglach, K., & Fleck, B., Oscillations above sunspots: Evidence for propagating waves?, *Astronomy and Astrophysics*, 2002, v.387, p.642-664
- Ohsaki, Shuichi; Shatashvili, Nana L.; Yoshida, Zensho; Mahajan, Swadesh M., Magnetofluid Coupling: Eruptive Events in the Solar Corona, *The Astrophysical Journal*, Volume 559, Issue 1, L61, 2001
- Okamoto, T. J.; Tsuneta, S.; Berger, T. E.; Ichimoto, K.; Katsukawa, Y.; Lites, B. W.; Nagata, S.; Shibata, K.; Shimizu, T.; Shine, R. A.; Suematsu, Y.; Tarbell, T. D.; Title, A. M., Coronal Transverse Magnetohydrodynamic Waves in a Solar Prominence, *Science*, 2007, Volume 318, Issue 5856, pp. 1577
- Okamoto, Takenori J., De Pontieu, Bart, Propagating Waves Along Spicules, *The Astrophysical Journal Letters*, 2011, Volume 736, Issue 2, article id. L24, 6 pp.
- O'Shea, E.; Banerjee, D.; Doyle, J. G., Blinker/macro-spicule activity in an off-limb polar region, *Astronomy and Astrophysics*, 2005, Volume 436, Issue 2, June III 2005, pp.L43-L46
- Parenti, S.; Bromage, B. J. I.; Bromage, G. E., An erupting macrospicule. Characteristics derived from SOHO-CDS spectroscopic observations, *Astronomy and Astrophysics*, 2002, v.384, p.303-316
- Parker E. N., A Mechanism for Magnetic Enhancement of Sound-Wave Generation and the Dynamical Origin of Spicules, *Astrophysical Journal*, 1964, vol. 140, p.1170
- Parker, E. N., Dynamical oscillation and propulsion of magnetic fields in the convective zone of a star. VI - Small flux bundles, network fields, and ephemeral active regions , *Astrophysical Journal*, 1988, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 326, March 1, p. 407-411
- Pasachoff, Jay M.; Jacobson, William A.; Sterling, Alphonse C., Limb Spicules from the Ground and from Space, *Solar Physics*, 2009, Volume 260, Issue 1, pp.59-82 ,
- Pasachoff, Jay M.; Noyes, Robert W.; Beckers, Jacques M., Spectral Observations of Spicules at Two Heights in the Solar Chromosphere, *Solar Physics*, 1968, Volume 5, Issue 2, pp.131-158
- Pereira, T. M. D.; De Pontieu, B.; Carlsson, M.; Hansteen, V.; Tarbell, T. D.; Lemen, J.; Title, A.; Boerner, P.; Hurlburt, N.; Wülser, J. P.; Martínez-Sykora, J.; Kleint, L.; Golub, L.; McKillop, S.; Reeves, K. K.; Saar, S.; Testa, P.; Tian, H.; Jaeggli, S.; Kankelborg, C., An Interface Region Imaging Spectrograph First View on

- Solar Spicules, *The Astrophysical Journal Letters*, 2014, Volume 792, Issue 1, article id. L15, 6 pp.
- Pereira, Tiago M. D.; De Pontieu, Bart; Carlsson, Mats, Quantifying Spicules, *The Astrophysical Journal*, 2012, Volume 759, Issue 1, article id. 18, 16 pp
- Pereira, Tiago M. D.; De Pontieu, Bart; Carlsson, Mats, The Effects of Spatio-temporal Resolution on Deduced Spicule Properties, *The Astrophysical Journal*, 2013, Volume 764, Issue 1, article id. 69, 5 pp.
- Petralia, A.; Reale, F.; Orlando, S.; Klimchuk, J. A., MHD modelling of coronal loops: injection of high-speed chromospheric flows, *Astronomy & Astrophysics*, 2014, Volume 567, id.A70, 9 pp
- Philip G. Judge, Alexandra Tritschler, and Boon Chye Low THERMAL FINE STRUCTURE AND MAGNETIC FIELDS IN THE SOLAR ATMOSPHERE: SPICULES AND FIBRILS, *The Astrophysical Journal Letters*, 2011, Volume 730, Number 1, 6pp
- Philip G. Judge, Bart de Pontieu, Scott W. McIntosh, and Kosovare Olluri, The Connection of Type II Spicules to the Corona, *The Astrophysical Journal*, 2012, Volume 746, Issue 2, article id. 158, 9 pp.
- Pietarila, A.; Aznar Cuadrado, R.; Hirzberger, J.; Solanki, S. K., Kink Waves in an Active Region Dynamic Fibril, *The Astrophysical Journal*, 2011, Volume 739, Issue 2, article id. 92, 7 pp
- Pike C.D. and H.E. Mason, Rotating Transition Region Features Observed with the SOHO Coronal Diagnostic Spectrometer, *Solar Physics*, 1998, v. 182, Issue 2, p. 333-348
- Pike C.D. and Harrison R. A., EUV Observations of a Macrospicule: Evidence for Solar Wind Acceleration? *Solar Physics*, 1997, Volume 175, Issue 2, pp.457-465
- Platov, July V.; Shilova, Nataly S., Oscillations of Visible Chromosphere Boundary and Regularity in Position of Spicule Groups along the Limb, *Solar Physics*, 1971, Volume 19, Issue 1, pp.52-58
- Pneuman, G. W., & Kopp, R. A., Downflow in the supergranulation network and its implications for transition region models, *Solar Physics*, 1978, vol. 57, Mar. p. 49-64
- Press, William H.; Teukolsky, Saul A.; Vetterling, William T., Flannery, Brian P., Numerical recipes in FORTRAN. The art of scientific computing, Cambridge University Press, 1992, c1992, 2nd ed
- Raouafi, N.E., et al.: *Space Sci. Rev.*, 2016, 201, 1
recurrences, *New Astron.*, 2008, 13, 93
- Roberts B., Waves and Oscillations in the Corona - (Invited Review), *Solar Physics*, 2000, v. 193, Issue 1/2, p. 139-152
- Roberts W. O., A Preliminary report on Chromospheric Spicules of extremely short lifetime. *Astrophys. J.*, 1945, vol. 101, p.136
- Roberts, B., Spicules - The resonant response to granular buffeting, *Solar Physics*, 1979, vol. 61, Feb. p. 23-34
- Ronald L. Moore¹, Alphonse C. Sterling¹, Jonathan W. Cirtain¹, and David A. Falconer, Solar X-ray Jets, Type-II Spicules, Granule-size Emerging Bipoles, and the Genesis of the Heliosphere, *The Astrophysical Journal Letters*, 2011, Volume 731, Issue 1, article id. L18, 5 pp
- Roupe van der Voort, L. H. M., De Pontieu, B.; Hansteen, V. H.; Carlsson, M.; van Noort, M., Magnetoacoustic Shocks as a Driver of Quiet-Sun Mottles, *The Astrophysical Journal*, 2007, Volume 660, Issue 2, pp. L169-L172

- Roupe van der Voort, L.; De Pontieu, B.; Pereira, T. M. D.; Carlsson, M.; Hansteen, V..
Heating Signatures in the Disk Counterparts of Solar Spicules in Interface Region Imaging Spectrograph Observations, Astrophysical Journal Lett, 2015, 799 L3.
- Roupe van der Voort, L.; Leenaarts, J.; de Pontieu, B.; Carlsson, M.; Vissers, G., On-disk Counterparts of Type II Spicules in the Ca II 854.2 nm and H α Lines, *The Astrophysical Journal*, 2009, Volume 705, Issue 1, pp. 272-284
- Rush J. H., Roberts W. O., Recent Studies of Chromospheric Spicules, *Australian Journal of Physics*, 1954, vol. 7, p.230
- Rush, J. H.; Roberts, W. O., Recent studies of chromospheric spicules, *Astronomical Journal*, 1953, Vol. 58, p. 226
- Saleem H., J. Vranjes, and S. Poedts, Unstable drift mode driven by shear plasma flow in solar spicules, *A&A* , 2007, olume 471, Issue 1, August III 2007, pp.289-293
- Sánchez-Andrade Nuño, B., R. Centeno, K. G. Puschmann, J. Trujillo Bueno, J. Blanco Rodríguez, F. Kneer, Spicule emission profiles observed in He I 10 830 Å, *A&A*, 2007, Volume 472, Issue 3, September IV 2007, pp.L51-L54
- Sekse D. H., L. Roupe van der Voort, and B. De Pontieu, Statistical Properties of the Disk Counterparts of Type II Spicules from Simultaneous Observations of Rapid Blueshifted Excursions in Ca II 8542 and H α , *The Astrophysical Journal*, 2012, Volume 752, Issue 2, article id. 108, 14 pp
- Sekse, D. H., Roupe van der Voort, L., and De Pontieu, B. and Scullion, E., Interplay of Three Kinds of Motion in the Disk Counterpart of Type II Spicules: Upflow, Transversal, and Torsional Motions, *The Astrophysical Journal*, 2013, Volume 769, Issue 1, article id. 44, 11 pp (2013b)
- Selhorst, C. L.; Silva, A. V. R.; Costa, J. E. R., Solar atmospheric model with spicules applied to radio observation, *Astronomy and Astrophysics*, 2005, Volume 433, Issue 1, April I, pp.365-374
- Selhorst, C. L.; Silva, A. V. R.; Costa, J. E. R.; Shibasaki, K., Temporal and angular variation of the solar limb brightening at 17 GHz , *Astronomy and Astrophysics*, 2003, v.401, p.1143-1150
- Skogsrud H., L. Roupe van der Voort, and B. De Pontieu, On the Multi-threaded Nature of Solar Spicules, *The Astrophysical Journal Letters*, 2014, Volume 795, Issue 1, article id. L23, 6 pp
- Socas-Navarro H. and D. Elmore, Physical Properties of Spicules from Simultaneous Spectropolarimetric Observations of He I and Ca II Lines, *The Astrophysical Journal*, 2005, Volume 619, Issue 2, pp. L195-L198
- Soler, R.; Andries, J.; Goossens, M., Resonant Alfvén waves in partially ionized plasmas of the solar atmosphere, *Astronomy & Astrophysics*, 2012, Volume 537, id.A84, 9 pp
- Soler, R.; Ballester, J. L.; Zaqarashvili, T. V., Overdamped Alfvén waves due to ion-neutral collisions in the solar chromosphere, *Astronomy & Astrophysics*, 2015, Volume 573, id.A79, 12 pp
- Spruit, H.C., Roberts, B., Magnetic flux tubes on the sun, *Nature* (ISSN 0028-0836), 1983, vol. 304, Aug. 4, p. 401-406.
- Stangalini, M., Giannattasio, F., Erdélyi, R., Jafarzadeh, S., Consolini, G., Criscuoli, S., Ermolli, I., Guglielmino, S.L., Zuccarello, F.: *Astrophys. J.* 840, 19 (2017)
- Sterling, A. C., & Mariska, J. T., Numerical simulations of the rebound shock model for solar spicules, *Astrophysical Journal*, Part 1 (ISSN 0004-637X), 1990, vol. 349, Feb. 1, p. 647-655
- Sterling, Alphonse C., Solar Spicules: A Review of Recent Models and Targets for Future Observations - (Invited Review), *Solar Physics*, 2000, v. 196, Issue 1, p. 79-111

- Sterling, Alphonse C.; Shibata, Kazunari; Mariska, John T., Solar chromospheric and transition region response to energy deposition in the middle and upper chromosphere, *Astrophysical Journal*, Part 1 (ISSN 0004-637X), 1993, vol. 407, no. 2, p. 778-789.
- Suematsu, Y., Shibata, K., Neshikawa, T., Kitai, R., Numerical hydrodynamics of the jet phenomena in the solar atmosphere. I – Spicules, *Solar Physics*, 1982, vol. 75, p. 99-118
- Suematsu, Y., Solar Spicules: A brief review of recent high-resolution observations, *Solar Jets and Coronal Plumes*, Proceedings of an International meeting, Guadeloupe, France, 23-26 February 1998, Publisher: Paris: European Space Agency (ESA), 1998, ESA SP-421 . ISBN: 9290926848, p.19 19
- Suematsu, Y.; Ichimoto, K.; Katsukawa, Y.; Shimizu, T.; Okamoto, T.; Tsuneta, S.; Tarbell, T.; Shine, R. A., High Resolution Observations of Spicules with Hinode/SOT, Harra. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2008, p27
- Suematsu, Y.; Tsuneta, S.; Ichimoto, K.; Shimizu, T.; Otsubo, M.; Katsukawa, Y.; Nakagiri, M.; Noguchi, M.; Tamura, T.; Kato, Y.; Hara, H.; Kubo, M.; Mikami, I.; Saito, H.; Matsu shita, T.; Kawaguchi, N.; Nakaoji, T.; Nagae, K.; Shimada, S.; Takeyama, N.; Yamamuro, T., The Solar Optical Telescope of Solar-B (Hinode): The Optical Telescope Assembly, *Solar Physics*, 2008, Volume 249, Issue 2, pp.197-220
- Suematsu, Y.; Wang, H.; Zirin, H., Kinematics and Lifetimes of Solar Spicules, *American Astronomical Society*, 180th AAS Meeting, #07.02; *Bulletin of the American Astronomical Society*, 1992, Vol. 24, p.738
- Suematsu, Yoshinori; Wang, Haimin; Zirin, Harold., High-Resolution Observation of Disk Spicules. I. Evolution and Kinematics of Spicules in the Enhanced Network, *Astrophysical Journal*, 1995, v.450, p.411
- Suzuki, Takeru K.; Inutsuka, Shu-ichiro, Making the Corona and the Fast Solar Wind: A Self-consistent Simulation for the Low-Frequency Alfvén Waves from the Photosphere to 0.3 AU, *The Astrophysical Journal*, 2005, Volume 632, Issue 1, pp. L49-L52
- Takuya Saito, Takahiro Kudoh, and Kazunari Shibata, What Determines the Height of Spicules? I. Alfvén-Wave Model and Slow-Wave Model, *The Astrophysical Journal*, 2001, Volume 554, Number 2, pp. 1151- 1158
- Tanaka, K., Evolution of Chromospheric Fine Structures on the Disk, *Chromospheric Fine Structure: Proceedings from IAU Symposium no. 56 held at Surfer's Paradise, Qld., Australia, 3-7 September 1973*. Edited by R. Grant Athay. International Astronomical Union. Symposium no. 56, 1974, Dordrecht; Boston: Reidel, p.239
- Taroyan Y., Erdelyi R., Global Acoustic Resonance in a Stratified Solar Atmosphere, *Solar Physics*, 2008, Volume 251, Issue 1-2, pp. 523-531
- Taroyan, Y.; Erdélyi, R., Heating Diagnostics with MHD Waves, *Space Science Reviews*, 2009, Volume 149, Issue 1-4, pp. 229-254
- Tavabi E., S. Koutchmy¹, A. Ajabshirizadeh, A. R. Ahangarzadeh Maralani and S. Zeighami, Alfvénic waves in polar spicules, *Astronomy & Astrophysics*, 2015, Volume 573, id.A4, 7 pp
- Tavabi, E., Koutchmy, S., Ajabshirizadeh, A., A statistical analysis of the SOT-Hinode observations of solar spicules and their wave-like behavior, *New Astronomy*, 2011, Volume 16, Issue 4, p. 296-305
- Tavabi, E.; Koutchmy, S.; Ajabshirizadeh, A., solar spicules and jets, *Understanding Solar Activity: Advances and Challenges*, Edited by M. Faurobert, C. Fang and T. Corbard. EAS Publications Series, Vol. 55, 2012, pp.71-78
- Tian, Hui; McIntosh, Scott W.; Wang, Tongjiang; Ofman, Leon; De Pontieu, Bart; Innes, Davina E.; Peter, Hardi, Persistent Doppler Shift Oscillations Observed with Hinode/EIS in

- the Solar Corona: Spectroscopic Signatures of Alfvénic Waves and Recurring Upflows, *The Astrophysical Journal*, 2012, Volume 759, Issue 2, article id. 144, 17 pp
- Tomczyk, S.; McIntosh, S. W.; Keil, S. L.; Judge, P. G.; Schad, T.; Seeley, D. H.; Edmondson, J., Alfvén Waves in the Solar Corona, American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, abstract #SH21A-0289
- Trujillo Bueno, J.; Merenda, L.; Centeno, R.; Collados, M.; Landi Degl'Innocenti, E., The Hanle and Zeeman Effects in Solar Spicules: A Novel Diagnostic Window on Chromospheric Magnetism, *The Astrophysical Journal*, 2005, Volume 619, Issue 2, pp. L191-L194
- Trujillo Bueno, Javier; Asensio Ramos, Andrés, Influence of Atomic Polarization and Horizontal Illumination on the Stokes Profiles of the He I 10830 Å Multiplet, *The Astrophysical Journal*, 2007, Volume 655, Issue 1, pp. 642-650
- Tsiropoula, G.; Alissandrakis, C. E.; Schmieder, B., Time evolution of fine structures in the solar chromosphere, *Astronomy and Astrophysics*, 1994, 290, 285-294
- Tsiropoula, G.; Tziotziou, K.; Kontogiannis, I.; Madjarska, M. S.; Doyle, J. G.; Suematsu, Y., Solar Fine-Scale Structures. I. Spicules and Other Small-Scale, Jet-Like Events at the Chromospheric Level: Observations and Physical Parameters, *Space Science Reviews*, 2012, Volume 169, Issue 1-4, pp. 181-244
- Tsubaki T., Periodic oscillations found in coronal velocity fields, *Solar phys.*, 1977, vol. 51, Jan.-Feb. 1977, p. 121-130.
- Tsuneta, S.; Ichimoto, K.; Katsukawa, Y.; Nagata, S.; Otsubo, M.; Shimizu, T.; Suematsu, Y.; Nakagiri, M.; Noguchi, M.; Tarbell, T.; Title, A.; Shine, R.; Rosenberg, W.; Hoffmann, C.; Jurcevich, B.; Kushner, G.; Levay, M.; Lites, B.; Elmore, D.; Matsushita, T.; Kawaguchi, N.; Saito, H.; Mikami, I.; Hill, L. D.; Owens, J. K., The Solar Optical Telescope for the Hinode Mission: An Overview, *Solar Physics*, 2008, Volume 249, Issue 2, pp.167-196
- Tu, C.-Y.; Marsch, E., On cyclotron wave heating and acceleration of solar wind ions in the outer corona, *Journal of Geophysical Research*, 2001, Volume 106, Issue A5, p. 8233-8252
- Tu, C.-Y.; Marsch, E., Two-Fluid Model for Heating of the Solar Corona and Acceleration of the Solar Wind by High-Frequency Alfvén Waves, *Solar Physics*, 1997, v. 171, Issue 2, p. 363-391
- Tziotziou, K., Tsiropoula, G., & Mein, P., On the nature of the chromospheric fine structure. I. Dynamics of dark mottles and grains, *Astronomy and Astrophysics*, 2003, v.402, p.361-372
- Tziotziou, K., Tsiropoula, G., & Mein, P., On the nature of the chromospheric fine structure. II. Intensity and velocity oscillations of dark mottles and grains, *Astronomy and Astrophysics*, 2004, v.423, p.1133-1146
- Uchida, Yutaka; Kaburaki, Osamu, Excess Heating of Corona and Chromosphere Above Magnetic Regions by Non-Linear Alfvén Waves, *Solar Physics*, 1974, Volume 35, Issue 2, pp.451-466
- Uchida Y., Mechanism for the acceleration of solar chromospheric spicules. *Pub.*, 1967, *Astron. Soc. Japan*, 21, 128-140.
- Van Noort, Michiel; Rouppe van der Voort, Luc; Löfdahl, Mats G., Solar Image Restoration By Use Of Multi-frame Blind De-convolution With Multiple Objects And Phase Diversity, *Solar Physics*, 2005, Volume 228, Issue 1-2, pp. 191-215
- Verth G., R. Erdélyi, Effect of longitudinal magnetic and density inhomogeneity on transversal coronal loop oscillations, *Astronomy and Astrophysics*, 2008, Volume 486, Issue 3, 2008, pp.1015-1022

- Verth, G.; Goossens, M.; He, J.-S., Magnetoseismological Determination of Magnetic Field and Plasma Density Height Variation in a Solar Spicule, *The Astrophysical Journal Letters*, 2011, Volume 733, Issue 1, article id. L15, 5 pp
- Viggo Hansteen, Julie V. Stern, Hui Tian, Scott W. McIntosh, and Luc Rouppe van der Voort, A Detailed Comparison between the Observed and Synthesized Properties of a Simulated Type II Spicule , *The Astrophysical Journal*, 2013, Volume 771, Issue 1, article id. 66, 25 pp.
- Wentzel, D. G., Coronal heating by Alfvén waves, *Solar Physics*, 1974, vol. 39, Nov. 1974, p. 129-140
- Wilhelm K., Solar spicules and macrospicules observed by SUMER, *Astronomy and Astrophysics*, 2000, Vol. 360, p.351-362
- Withbroe, G. L., The role of spicules in heating the solar atmosphere Implications of EUV observations, *Astrophysical Journal*, Part 1 (ISSN 0004-637X), 1983, vol. 267, April 15, p. 825-836
- Withbroe, G. L.; Noyes, R. W., Mass and energy flow in the solar chromosphere and corona, In: *Annual review of astronomy and astrophysics*. 1977, Volume 15. (A78-16576 04-90) Palo Alto, Calif., Annual Reviews, Inc., p. 363-387
- Woltjer L. A., A photometric investigation of the spicules and the structure of the chromosphere, *Bulletin of the Astronomical Institutes of the Netherlands*, 1954, Vol. 12, p.165
- Xia, L.D., Popescu, M.D., Doyle, J.G., Giannikakis, J., Time series study of EUV spicules observed by SUMER/SoHO, *Astronomy and Astrophysics*, 2005, Volume 438, Issue 3, August II 2005, pp.1115-1122
- Yamauchi, Y.; Wang, H.; Jiang, Y.; Schwadron, N.; Moore, R. L., Study of H α Macrospicules in Coronal Holes: Magnetic Structure and Evolution in Relation to Photospheric Magnetic Setting, *The Astrophysical Journal*, 2005, Volume 629, Issue 1, pp. 572-581
- Yurchyshyn, V.; Abramenko, V.; Goode, P., Dynamics of Chromospheric Upflows and Underlying Magnetic Fields, *The Astrophysical Journal*, 2013, Volume 767, Issue 1, article id. 17, 6 pp
- Zaqarashvili T.V., Khutsishvili E. V., Kukhianidze V. T., Ramishvili K, G., Doppler-shift oscillations in solar spicules, *Astronomy and Astrophysics*, 2007, Volume 474, Issue 2, November I 2007, pp.627-632
- Zaqarashvili T.V., Observation of coronal loop torsional oscillation, *Astronomy and Astrophysics*, 2003, v.399, p.L15-L18
- Zaqarashvili, T.V., Murawski, K.: *Astron. Astrophys.*, 2007, 470, 353
- Zaqarashvili, T.V., Solar Spicules: Recent Challenges in Observations and Theory, 3RD SCHOOL AND WORKSHOP ON SPACE PLASMA PHYSICS. AIP Conference Proceedings, 2011, Volume 1356, pp. 106-116 2011
- Zaqarashvili, T.V.; Erdelvi, R., Oscillations and Waves in Solar Spicules, *Space Science Reviews*, 2009, Volume 149, Issue 1-4, pp. 355-388
- Zaqarashvili, T. V. and Skhirtladze, N., Helical Motion of Magnetic Flux Tubes in the Solar Atmosphere, *The Astrophysical Journal*, 2008, Volume 683, Issue 1, pp. L91-L94
- Zaqarashvili, T. V.; Khodachenko, M. L.; Soler, R., Torsional Alfvén waves in partially ionized solar plasma: effects of neutral helium and stratification, *Astronomy & Astrophysics*, 2013, Volume 549, id.A113, 9 pp. Soler, *A&A* 549, A113
- Zhang, J.; Kundu, M. R.; White, S. M.; Dere, K. P.; Newmark, J. S., Reconciling Extreme-Ultraviolet and Radio Observations of the Sun's Corona, *The Astrophysical Journal*, 2001 Volume 561, Issue 1, pp. 396-405

- Zhang, Y. Z., Shibata, K., Wang, J. X., Mao, X. J., Matsumoto, T., Liu, Y., and Su, J. T., Revision of Solar Spicule Classification Revision of Solar Spicule Classification, The Astrophysical Journal, 2012, Volume 750, Issue 1, article id. 16, 9 pp
- Zhelyazkov, I, Magnetohydrodynamic waves and their stability status in solar spicules , Astronomy & Astrophysics, 2012, Volume 537, id.A124, 8 pp
- Zirin, H., Baumert, B. M., & Hurford, G. J., The microwave brightness temperature spectrum of the quiet sun, Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X), 1991, vol. 370, April 1, p. 779-783
- Zirin, H., Book-Review - Astrophysics of the Sun, Science, 1988, Vol.242, NO.4885/DEC16, P.1586
- Zirin, Harold; Dietz, R. D., The structure of the Solar chromosphere. I. A picture based on extreme ultraviolet, millimeter, and λ 10830 data. Astrophysical Journal, 1963, vol. 138, p.664
- Бугославская Е. Я.: Хромосферные выбросы 1943-1945гг. По наблюдениям с протуберанц-спекроскопом. Астрон. Журн., 1946, 23, 225-234.
- Гаджиев Т. Г., Никольский Г. М.: Движения хромосферных спикул. Писма в астрон. Ж., 8, 1982, №10, 633-635.
- Геонджян Л. А.: Колебательные процессы в хромосферных спикулах. Сообщ. АНГССР, 1985, 120, №3, 513-575
- Гуляев Р. А.: Линии He λ 3888,65 Å и H λ 3889,05 Å в спектре хромосферных спикул. Бюлл. Солнечные данные, 1965, №6, 51-54.
- Дубов Э. Е.: Колебания и волны в атмосфере Солнца. М.; в сб. ИНТ. Серия Астрономия, том 14, 1978, (ред.: И. С. Щербина-Самойлова), 148-266.
- Иванчук В. И., Пишкало Н. И.: Спектральные исследования динамики H α -спикул, Пробл. Косм. Физ. (Киев), 1985, №20, 16-24.
- Иванчук В. И., Пишкало Н. И.: Динамика хромосферных спикул. Лучевые, тангенциальные и видимые скорости., Вести. Киев. Ун-та. Астрон., 1985а, №27, 7-23.
- Крат В. А., Крат Т. В., Правдюк Л. М.: О физической неоднородности солнечной хромосферы. Изв. ГАО, 1956, №156, 60-66.
- Крат В. А., Крат Т. В.: О физике солнечной хромосферы. Изв. ГАО, 1961, №167, 6-51
- Крат В. А., Соболев В. М.: О возбуждении гелия в солнечной хромосфере. Изв. ГАО, 1958, 20, №158, 68-73.
- Крат В. А., Соболев В. М.: Солнечная хромосфера. Изв. ГАО, 1957, 21, №160, 116-139.
- Мамедов С. Г., Оруджев Э. Ш.: Возникновение и движение спикул. Бюлл. Солнечные данные., 1975, №5, 92-101.
- Никольская К. И.: Возбуждение линий гелия в хромосферных спикулах. Астрон. Журн., 1966, №3, 936-941.
- Никольская К. И.: Интенсивность линий ортогелия в хромосферных спикулах. Бюлл. Солнечные данные., 1966, №2, 50-52.
- Никольская К. И.: Изменение с высотой D $_3$ -спикул. Бюлл. Солнечные данные., 1967, №12, 101-106.
- Никольская К. И.: К вопросу о свечении гелия в хромосфере. Астрон. Журн., 1967, 44, 1043-1047.
- Никольская К. И.: Профили линий D $_3$ HeI в хромосферных спикулах. Бюлл. Солнечные данные., 1966, №12, 66-70.

- Никольский Г. М., Сазанов А. А.: Движения и природа H α -спикул в солнечной хромосфере. Астроном. Журн., 1966, 43, 928-935
- Никольский Г. М.: Наблюдения спектра спикул и тонкая структура солнечной хромосферы, Астроном. Журн., 1965, 42, 86-95
- Никольский Г. М.: Строение и коротковолновое излучение верхней атмосферы Солнца. Докторская диссертация 1964, М.: 300с.
- Папушев П. Г., Салахудинов Р. Т.: Флуктуации параметров профиля H α -спикул. Исслед. По геомагнетизму, астрон. И физ. Солнца, 1990, №91, 194-200.
- Пикельнер С. Б.: Механизм образования хромосферных спикул. Астрон. Журн. 1970, 46, 328-336.
- Пишкало Н. И., Иванчук В. И.: Количество спикул и отождествление с образованиями, протуберанц-спектроскопом. Астрон. Журн., 1987, 23, 225-234.
- Томас Р. , Атей Р.: Физика солнечной хромосферы., М.: Мир, 1965, 528.
- Хуцишвили Э. В., Геонджян Л. А.: Устройство для измирения положений спектральных линий. Бюлл. АБАО, 1983, №56, 123-130.
- Хуцишвили Э. В.: Динамика и эволюция H α и D $_3$ спикул. Бюлл. АБАО, 1985, №60, 65-74.
- Хуцишвили Э. В.: Исследование динамики хромосферных спикул в линиях водорода и гелия. Канд. Диссертация, 1982, АБАО, 1982, 106.
- Хуцишвили Э. В.: Исследование лучевых скоростей хромосферных спикулю. Сообщ. АН ГССР, 1983, №108, 57-60.
- Хуцишвили Э. В.: Исследования длительные временных серий спектрограмм H α спикул. Международной конференции "Структура и динамика солнечной короны" 4-8 октября 1999г., 2000, Троицк Московская область. 380-387.
- Хуцишвили Э. В.: Характеристика D $_3$ -спикул на различных высотах. Бюлл. Солн. Данн., 1981, №5, 116-117.
- Хуцишвили Э. В.: Хромосферные спикулы в линиях H α и D $_3$. АБАО, 1986, №61, 95-100.
- Хуцишвили, Т.В. Закарашвили, В.Д. Кухианидзе, М.Ш. Гиголашвили, Н.Б. Ограпишвили. , Колебания в хромосферных спикулах. Бюлл. АБАО, 2004, №76, 177-188.
- Ягер Де К.: Строение и динамика атмосферы Солнца. –М.: ИЛ, 1962, 376с