

Институт по астрономия
с Национална астрономическа обсерватория,
Българска академия на науките



Изследване на дестабилизацията и ерупцията на протуберанси/влакна в активни области на Слънцето

Дисертация за получаване на научна и образователна степен
„Доктор” по професионално направление 4.1 Физически
науки, научна специалност „Хелиофизика”
на

Цветан Ангелов Цветков

Научен ръководител:
проф. д-р Евгени Семков
Научен консултант:
гл. ас. д-р Никола Петров

София, 2019 г.

Използвани съкращения

А – асиметричен (протуберанс)
а. ед. – астрономическа единица
АО – Активна област
АП – Активен протуберанс
ЕКА – Европейска космическа агенция (ESA, англ.)
ЕП – Еруптивен протуберанс
ИКМ – Изхвърляне на коронална маса (CME, англ.)
КР – Керингтонова ротация
МП – Магнитно поле
МИЛ – Магнитна инверсна линия
МСЛ – Магнитна силова линия
О – ограничена (ерупция)
П – Пълна (ерупция)
ПАО – Протуберанс в активна област
ПМАО – Протуберанс между активни области
ПСЗ – Пълно слънчево затъмнение
ПСО – протуберанс в спокойна област
ПП – Полярен протуберанс
ПШ – Полярни ширини
С – Симетричен (протуберанс)
СЕЧ – Слънчеви енергетични частици
СП – Спокоен протуберанс
СШ – Средни ширини
Ч – Частична (ерупция)

AIA – Atmospheric Imaging Assembly
ARP – Active Region Prominence
BBSO – Big Bear Solar Observatory
DB – Disparition Brusque (Внезапно изчезване)
DBR – Diffuse Bipolar Region
EBR – External Bipolar Region

EUV – Extreme Ultraviolet
EUVI – Extreme Ultraviolet Imager
FITS – Flexible Image Transport System
GOES – Geostationary Operational Environmental Satellites
GPS – Global Positioning System
HRAQP – Hvar Reference Atmosphere of Quiescent Prominences
IBR – Internal Bipolar Region
I/EBR – Internal/external Bipolar Region
LASCO – Large Angle and Spectrometric Coronagraph
NASA – National Aeronautics and Space Administration
NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration
NWS – National Weather Service
QP – Quiescent Prominence
SDO – Solar Dynamics Observatory
SECCHI – Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation
SILSO – Sunspot Index and Long-term Solar Observations
SOHO – Solar & Heliospheric Observatory
STEREO – Solar TERrestrial RELations Observatory

Съдържание

Увод	v
1 Слънчеви протуберанси	1
1.1 История на наблюденията на протуберанси	1
1.2 Класификации на слънчевите протуберанси	6
1.3 Спокойни и активни протуберанси	8
1.3.1 Основни характеристики	8
1.3.2 Образуване и поддържане	21
1.3.3 Обкръжение на СП	25
1.3.4 Динамика и еволюция на протуберансите	27
1.3.5 Дестабилизация	29
2 Еруптивни протуберанси	35
2.1 Видове еруптивни протуберанси	36
2.2 Видове ерупции на протуберанси	38
2.3 Развитие на еруптивен процес	40
2.4 Връзка с други прояви на слънчева активност	42
2.5 Космическо време	43
3 Осцилации на скоростите на еруптивни протуберанси	47
3.1 Наблюдателни данни	47
3.2 Обработка и анализ	50
3.3 Резултати	52
3.4 Дискусия	64
3.5 Наблюдения на протуберанси по време на пълно слънчево затъмнение	67
3.5.1 Основни данни за затъмнението от 21 август 2017 г.	67
3.5.2 Локация на екипа	69
3.5.3 Проведени експерименти и резултати	70

4	Връзка между протуберанси и потоци заредени частици	76
4.1	Селекция на събитията	77
4.2	Наблюдения на асоциирани протуберанси	78
4.3	Статистически резултати	80
4.3.1	Корелационен анализ на връзката на заредени частици с протуберанси	80
4.3.2	Корелационен анализ на връзката на еруптивни протуберанси със заредени частици	87
5	Заклучение	90
5.1	Основни резултати и изводи	90
5.2	Основни публикации	92
5.3	Други публикации	93
5.4	Участия в научни форуми	94
5.5	Минимални национални изисквания	97
5.6	Благодарности	98
А	Списък на изследвани протуберанси	99
Б	Списък на протонни събития и асоциирани явления	102

Увод

В силно разредената и гореща слънчева корона съществуват относително плътни и хладни образувания – слънчевите протуберанси. Техните размери, форма, поведение, време на живот и еволюция са многообразни и се определят от различните форми на взаимодействие на слънчевата плазма с обкръжаващото магнитно поле.

Заради видимостта си по време на ПСЗ протуберансите са известни на хората от векове. Въпреки това едва през последните няколко десетилетия е осъзнат и техният принос във взаимодействието между Слънцето и Земята. Днес знаем, че еруптивните структури в ниските слоеве на слънчевата атмосфера имат определяща роля в генерирането на космическото време.

Начините за наблюдението им се променят, преминавайки през различни етапи – визуални наблюдения, фотографски методи, спектрохелиографи и коронографи. Развитието на техниките за изследване води до началото на космическите наблюдения от последните няколко десетилетия, които имат редица предимства като регулярност, непрекъснатост, високо времево и пространствено разрешение. Усъвършенстването на технологиите за наблюдения на Слънцето, възможностите за постоянен и детайлен мониторинг на неговата активност ни позволяват да доразвием и представим си за различните активни процеси в слънчевата атмосфера и връзките помежду им.

Темата на тази работа е насочена към съвременните проблеми при изучаването на протуберансите. Редица все още дискуссионни въпроси свързани с физиката на Слънцето са представени като актуални научни проблеми или като част от авторските резултати.

Дисертацията е оформена в пет глави, към които са добавени две приложения. Разграничават се две основни смислово различни части. Първата включва обобщаване на теорията, разглеждане на нерешените проблеми и коментар на съвременните решения и открития, свързани със слънчевите протуберанси. Обхваща първите две глави, които разглеждат историята на наблюденията, основните характеристики и възможните

сценарии в края на еволюцията на спокойните протуберанси (Глава 1) и различните особености в поведението на влакната при претърпяна дестабилизация и ерупция (Глава 2).

Във втората част са демонстрирани основните резултати от изследванията на дисертанта. Глава 3 събира изследванията, свързани с поведението на протуберанси при ерупция. Показани са отклонения в разпределението на скоростите на веществото, наблюдавани на височини $< 0.6R_{\odot}$, както и резултати от наблюдения на протуберанси по време на пълното слънчево затъмнение на 21 август 2017 г. Глава 4 обхваща още една слабо изследвана тема – за връзката на протуберансите с потоци от заредени частици, основана на най-пълната извадка от събития до момента. Към всяка от главите във втората част е включено приложение, представящо списък с основни данни за изследваните събития. В заключение (Глава 5) са обобщени основните научни приноси на дисертацията и резултатите от работата на дисертанта.

Глава 1

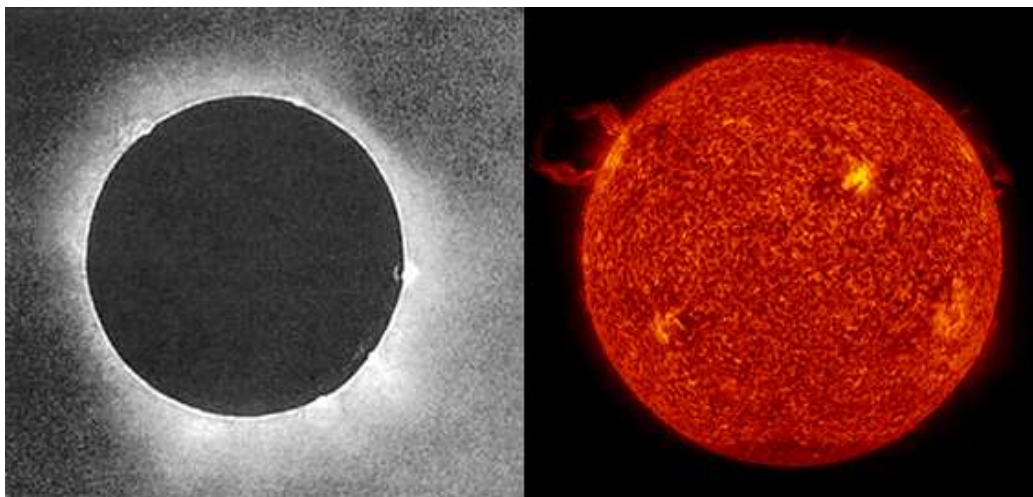
Слънчеви протуберанси

Слънчевите протуберанси са относително студени ($T = 10^4$ К) и плътни ($n_e = 10^{10} - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) образувания, разположени в слънчевата корона, където $n_e = 10^8 - 10^9 \text{ cm}^{-3}$ и $T = 10^6$ К [154, 155]. Разликата между физическите характеристики на протуберансите и обкръжаващата ги среда подсказва, че те са изолирани структури, отделени от горещата корона от преходен слой протуберанс-корона. Могат да бъдат наблюдавани в емисия като образувания над лимба (протуберанси) или в абсорбция върху диска на Слънцето (vlakna). Въпреки разликата в наименованията, те се отнасят за едно и също физическо явление като различният термин обозначава единствено мястото където е наблюдавано то. Затова в настоящата дисертация и двата термина ще бъдат употребявани като взаимозаменяеми.

1.1 История на наблюденията на протуберанси

Стремежът на човека да опознае и разбере законите на природата е основната движеща сила в еволюционното му развитие. Наблюденията на Слънцето, като част от този процес, заемат своята важна роля, ставайки част от бита на човека още от Древността. Изгревите и залезите са определяли естествените житейски дейности на хората. Но различни прояви на слънчева активност, в това число слънчевите протуберанси, са били недостъпно познание. Вероятно поради факта, че ранните наблюдения на протуберанси са били възможни само по време на пълни слънчеви затъмнения, те са забелязани за първи път едва в края на XII век. Въпреки спекулативния си характер и голяма степен на несигурност, наблюденията на протуберанси от историята ни запознават с

развитието на представите ни за тези явления и демонстрират прогреса на технологиите, с които ги наблюдаваме (Фиг. 1.1).



Фигура 1.1: Първата успешна снимка на протуберанси, заснета от Verkowski по време на пълно слънчево затъмнение през 1851 г. (ляво) [139] и протуберанси в полето на инструмента AIA на SDO 304 Å от 2010 г. (дясно).

Всъщност, и днес нашият живот е изключително зависим от състоянието на активност на Слънцето и дори неосъзнато за мнозина, можем да твърдим, че нашето Слънце има определяща роля за напредъка на съвременната цивилизация. Активните процеси са пряко свързани със съвременните комуникации и овладяването на близкия космос – една от последните бариери на човешкия ум към опознаване на законите на Вселената.

Смята се, че първото наблюдателно описание на протуберанс е описано след пълното слънчево затъмнение (ПСЗ) от 1 май 1185 г. в руска хроника от Новгород [152], макар някои изследователи да смятат, че видяното се дължи на затъмнена хромосферна светлина от лунни кратери и върхове [167]. Друго ранно описание се приписва на Muratori, който наблюдавал „горящи ями“ на Слънцето по време на затъмнението през 1239 г. – протуберанси или коронални кухни с протуберанси в тях [156].

На 22 април 1715 г. по наблюдения на пълно слънчево затъмнение от Англия Halley описва формата на короната и появяването на ярки червени протуберанси. Той отбелязва, че протуберансите на източния

лимб са по-различни от тези на западния и че короната е асиметрична, но обяснява този факт с наличието на тънка атмосфера около Луната.

Първи опити за научно описание прави Vassenius [162], който в доклада си за наблюдаваното ПСЗ на 13 май 1733 г. описва "червеникави облаци в лунната атмосфера" [156]. А след затъмнение през 1778 г. Улоа документира активен протуберанс, определяйки го като "дупка в Луната" [161].

Астрономите не проявявали особен интерес към научните наблюдения на слънчеви затъмнения до началото на XIX век като основно отчитали началото и края на различните фази (контактите на затъмнението). Короната и протуберансите били просто красиво зрелище и опитите за обяснение на наблюдаваните явления били по-скоро догадки. Това се променя през 1836 г. с първите опити за спектрален анализ на короната и протуберансите. А през 1842 г. за първи път протуберанси са наблюдавани с оптичен инструмент (по време на ПСЗ) и това се смята за годината на тяхното откриване, макар и да са били наблюдавани и описани стотици години по-рано.

Следващата крачка в изучаването на тези слънчеви образувания била да се определи дали протуберансите са част от Слънцето или от Луната. Един от първите отговори дава Vaily след наблюдение на затъмнението от 1842 г. като идентифицира протуберансите и короната като части от слънчевата атмосфера [4].

През 1851 г. George Airy описва хромосферата като "планинска верига" ("sierra исп.), мислейки си, че наблюдава планини на Слънцето. В действителност той е наблюдавал малки (ниски) протуберанси, които са причината за този вид на хромосферата [90].

За първи път успешно е фотографирано пълно слънчево затъмнение на 28 юли 1851 г. от Verkowski в Кьонингсберг, Германия (дн. Калининград, Русия) [139]. Първата фотография на слънчевата корона е с експозиция 84 секунди и обхваща поне 5 протуберанса по лимба (фиг. 1.1 ляво). Наблюдавайки същото ПСЗ Grant, Swan и Littrow установяват, че протуберансите са част от Слънцето, като забелязват, че Луната ги открива и закрива при движението си пред слънчевия диск [90]. Окончателно потвърждение за слънчевия произход на протуберансите идва от Rue и Secchi след ПСЗ през 1860 г., които правят съвместни фотографски наблюдения от две места по Земята, разположени на 400 км едно от друго по линията на тоталитета. По същото време немският астроном Wilhelm Tempel за първи път регистрира изхвърляне на коронална маса (ИКМ) върху рисунка от затъмнението.

Нова епоха в изследването на протуберансите започва със затъмнението от 18 август 1868 г., когато за тяхното изследване започват да

се използват спектроскопи от Tennant, Herschel, Rayet, Pogson, Janssen и Lockyer [90]. Няколко дни след затъмнението Janssen телеграфира в Париж: "Наблюдавахме затъмнението, протуберанси, спектър изключителен и неочакван, протуберансите имат газова природа" [115]. Установен е водородният състав на протуберансите. Същевременно, Janssen и Lockyer, независимо един от друг, достигат до идеята, че емисионните линии на протуберансите са достатъчно силни, за да се наблюдават и извън затъмнения [156], с което значително улесняват и ускоряват тяхното бъдещо изучаване.

Междувременно, през 90-те години на XIX-ти век Deslandres за пръв път наблюдава със спектрохелиограф, фотографира и по-късно изучава внезапното изчезване на протуберанс [22].

Може би, най-голята революция в изучаването на протуберансите настъпва в началото на 30-те години на XX век с изобретяването на инструмент за наблюдение на най-вътрешните части на слънчевата корона (и нейните образувания) извън ПСЗ – телескоп-коронограф на Bernard Lyot (1931 г.) [18]. С цел наблюдение и на по-външните коронални слоеве, през 40-те и 50-те години коронографите се качват на въздушни балони и високо летящи самолети, а през 60-те дори и на ракети [78], като се използват по-големи „изкуствени луни“.

Сто години след първата фотография на протуберанс и първите сравнително успешни опити за обяснение на явлението, през 1951 г. Menzel създава един от първите модели на протуберанси, предполагайки, че устойчивостта им високо в короната се дължи на равновесие между Лоренцовата сила и гравитацията. Последван е от още няколко магнетохидростатични модела на протуберанси в следващите години (Dungey, 1953 г. и Kirpenhahn и Schluter, 1957 г.) [156]. По същото време са публикувани и първите сериозни измервания на физическите характеристики на протуберансите – температура, плътност, вътрешни скорости и др. През 1955 г. е установено, че протуберансите се разполагат по магнитните инверсни линии (МИЛ) [3]. За първи път е измерено магнитното поле в протуберанс от Zirin и Severny през 1961 г., използвайки ефект на Зеeman. С известни подобрения измерването на магнитното поле в протуберанси е повторено през 70-те от учени от High Altitude Observatory, Колорадо, а още по-точни измервания са направени от френски изследователи от Pic-du-Midi (използвайки ефект на Hanle). Измерените стойности за магнитното поле варират от няколко до над 100 G [156].

Днес мрежата от наземни телескопи, които ежедневно следят за появата и еволюцията на слънчеви протуберанси е многобройна. С наблюденията на отделни телескопи могат да се направят много изследвания, но през нощта локално се изпуска регистрацията на много явления –

еволюцията на протуберансите, тяхната ерупция, както и слънчевите избухвания. Затова са много важни денонощните наблюдения, които Глобалната мрежа от уреди с висока разделителна способност (The Global High-Resolution H-alpha Network) осъществява. Тази мрежа се състои от телескопи в Big Bear Solar Observatory в Калифорния, Kanzelhoehe Solar Observatory в Австрия, Catania Astrophysical Observatory в Италия, Meudon & Pic du Midi Observatories във Франция, the Huairou Solar Observing Station (HSOS) и Yunnan Astronomical Observatory (YNAO) в Китай.

През 1946 г. Lyman Spitzer пръв предлага идеята за изнасяне на телескопи, на борда на космически апарати, извън земната атмосфера. Днес множество космически обсерватории изследват Космоса, а изключение не правят и изследванията на Слънцето. Космически мисии като Solar and Heliospheric Observatory (SOHO), SOLAR (на борда на Международната космическа станция), Hinode, Solar Dynamics Observatory (SDO), Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO) и др. предоставят ежедневно огромен набор от данни и поставят основите на бъдещето на слънчевите наблюдения. В последните месеци своя път към най-близката слънчева околност започна революционната мисия Parker Solar Probe, а през следващите няколко години предстои още по-голям напредък в слънчевите наблюдения. Европейската космическа агенция (ЕКА) планира изстрелването на мисията Solar Orbiter, която ще осъществява наблюдения на различни хромосферни и коронални линии, подходящи за плътностна и температурна диагностика, позволяват изследване на фината структура и термодинамичните характеристики на протуберанси и др. През 2021 г. ще бъде стартирана първата индийска слънчева мисия Aditya-1 с един коронограф и три детектора, изследващи слънчевия вятър, слънчевите избухвания и междупланетното магнитно поле (МП) на борда.

В процес на изграждане са и най-големите наземни слънчеви телескопи: Daniel K. Inouye Solar Telescope (DKIST) – 4.24-метров слънчев телескоп в американска обсерватория на Хавайските острови, както и европейският 4.07-метров слънчев телескоп на Канарските острови, от които очакваме наблюдения с пространствена разделителна способност $\leq 0.05''$.

През 2019 г. за първи път ивицата на тоталитета на пълното слънчево затъмнение ще премине през територията на обсерваторията La Silla в Чили, където някои телескопи ще бъдат пригодени за слънчеви наблюдения и заснемане на кадри от слънчево затъмнение с неповторима прецизност.

1.2 Класификации на слънчевите протуберанси

Големите разлики между отделните слънчевите протуберанси по отношение на форма, структура, характеристики, време на живот, степен на активност и т. н. затрудняват тяхното систематизиране. С напредъка на наблюдателните технологии и познанията ни за физическата същност на явленията се раждат нови и се осъвременяват стари класификации на влакната, но все пак в основата на повечето и до днес остава връзката им с активните области (АО) на Слънцето.

За първи път класификация на протуберансите прави Secchi през 1875 г. [143]. Той ги разделя на две основни групи: *спокойни* и *активни* с общо 10 подкласа (clouds, filaments, stems, plumes, horns, cyclones, flames, jets, sheaves, spikes), които и до днес продължават да се използват за определяне вида на влакна.

Друга широко използвана през годините систематизация на протуберансите по типове е създадена от Pettit през 1932 г. [121]. Той ги разделя в 5 класа – *активни*, *еруптивни*, *протуберанси*, *свързани със слънчеви петна*, *торнадо* и *спокойни*. Характерната структура на активните протуберанси (АП) според Pettit включва разкъсване и разделяне на части на тялото на протуберанса от близка активна област и/или слънчево петно, а еруптивните показват издигане в направление близко до вертикалното. Въпреки това най-динамични са влакната, свързани със слънчеви петна – наблюдават се именно в близост до петна и имат форма подобна на фонтан или примка. Протуберансите торнадо имат вертикална спирална структура, наподобяваща разкъсано въже и са едни от най-рядко наблюдаваните типове, а спокойните са обикновено мащабни образувания с много слаби изменения за дълги периоди от време.

С прогресът на наблюдателната техника и познанията ни за Слънцето, класификациите започват все повече да се влияят и от представите за структурата и обкръжението на влакната, а не само от техните морфологични белези. През 1934 г. Newton разпределя влакната според тяхното положение спрямо слънчевите петна – *влакна в активни области*, които са по-краткоживущи, заради силното МП и обхващат първите 4 типа от класификацията на Pettit и *влакната между активни области* – дълги и дългоживущи, спокойни според Pettit [116]. Макар и тази класификация днес да има само историческа стойност, тя показва осъзнаването на връзката между състоянието на протуберансите и активните образувания в тяхното обкръжение.

По-късно Menzel и Evans (1953 г.) разделят протуберансите на два

основни класа *произхождащи от високата атмосфера* и *произхождащи от ниската атмосфера*, всеки, от които разделен на два подкласа, показващ дали влакното е асоциирано с петно [106]. Тази класификация разглежда и спикулите като протуберанси, като ги определя като несвързани с петна, произхождащи от ниската слънчева атмосфера. По-късно става ясно, че различията между двата основни класа на Мензел и Еванс са в основата на проблема за причинителите на формиране на протуберанси.

Две класификации от средата на ХХ век обръщат внимание на движенията на протуберансовата плазма. Тази на Severny и Khoklova [145] разделя влакната в три групи: *еруптивни* (спокойни протуберанси с последваща фаза на ерупция и типични скорости $v = n \times 100 \text{ km s}^{-1}$), *електромагнитни* (веществото им се движи по закривени траектории; по-бавна скорост от еруптивните $n \times 10 \text{ km s}^{-1} \leq v \leq n \times 100 \text{ km s}^{-1}$), *неправилни* (случайно движение на отделни части от протуберанса). Другата използвана в миналото класификация е тази на de Jager от 1959 г. [20]. Тя разделя влакната на *спокойни* и *движещи се*. Спокойните протуберанси (СП) могат да бъдат *нормални* (ниска и средна хелиографска ширина) или *полярни* (висока хелиографска ширина), а движещите се – *активни*, *еруптивни*, *свързани с петна (spots)*, *изхвърляния (surges)* или *спикули (spicules)*.

Следващата исторически значима стъпка, свързана с описанието на протуберанси прави Zirin през 1966 г., който разделя протуберансите в зависимост от връзката им с проявите на слънчева активност и по-конкретно със слънчеви избухвания [175]. Клас I са *краткоживущи* – свързани са с избухвания и активни области, показват бързи движения. Делят се на *впръсквания (sprays)*, *изхвърляния (surges)*, *примки (loops)* и *коронален дъжд (coronal rain)*. Клас II са *дългоживущи* – спокойни протуберанси с подтипове *полярни влакна* и *влакна от зоната на петнообразуване*. Клас III е междинен клас с *възходящи протуберанси* и *влакна, свързани със слънчеви петна*. Спокойните протуберанси според Zirin съответстват напълно на тези, определени от de Jager, но появяващият се междинен клас при Zirin включва спокойни протуберанси по време на внезапно изчезване, наблюдавани в активни области.

Последните десетилетия на изследване на поведението на протуберансите с голяма разделителна способност пораждат една по-съвременна класификация, отразяваща различията между видовете динамични влакна. Създадена от Gilbert et al., тя разделя протуберансите в 2 различни класа – *активни* и *еруптивни* [?]. Нейните особености са подробно разгледани в Глава 2.

Въпреки различните класификации, най-широко употребявано до днес

е разделянето на протуберансите на *спокойни* и *активни*, като към тези два основни типа се добави и междинен клас – *смесен тип протуберанси*, чието съществуване преминава през етапи на спокойно и активно състояние [163].

1.3 Спокойни и активни протуберанси

1.3.1 Основни характеристики

Спокойните протуберанси са относително стабилни образувания, които обикновено се разполагат извън активни области. Наброяват около 2/3 от всички слънчеви протуберанси. Техните глобални характеристики не показват относително големи изменения за дълги периоди от време (до няколко слънчеви ротации), но наблюдения с висока разделителна способност показват, че на ниво фина структура те са динамични образувания, показващи редица процеси на промяна.

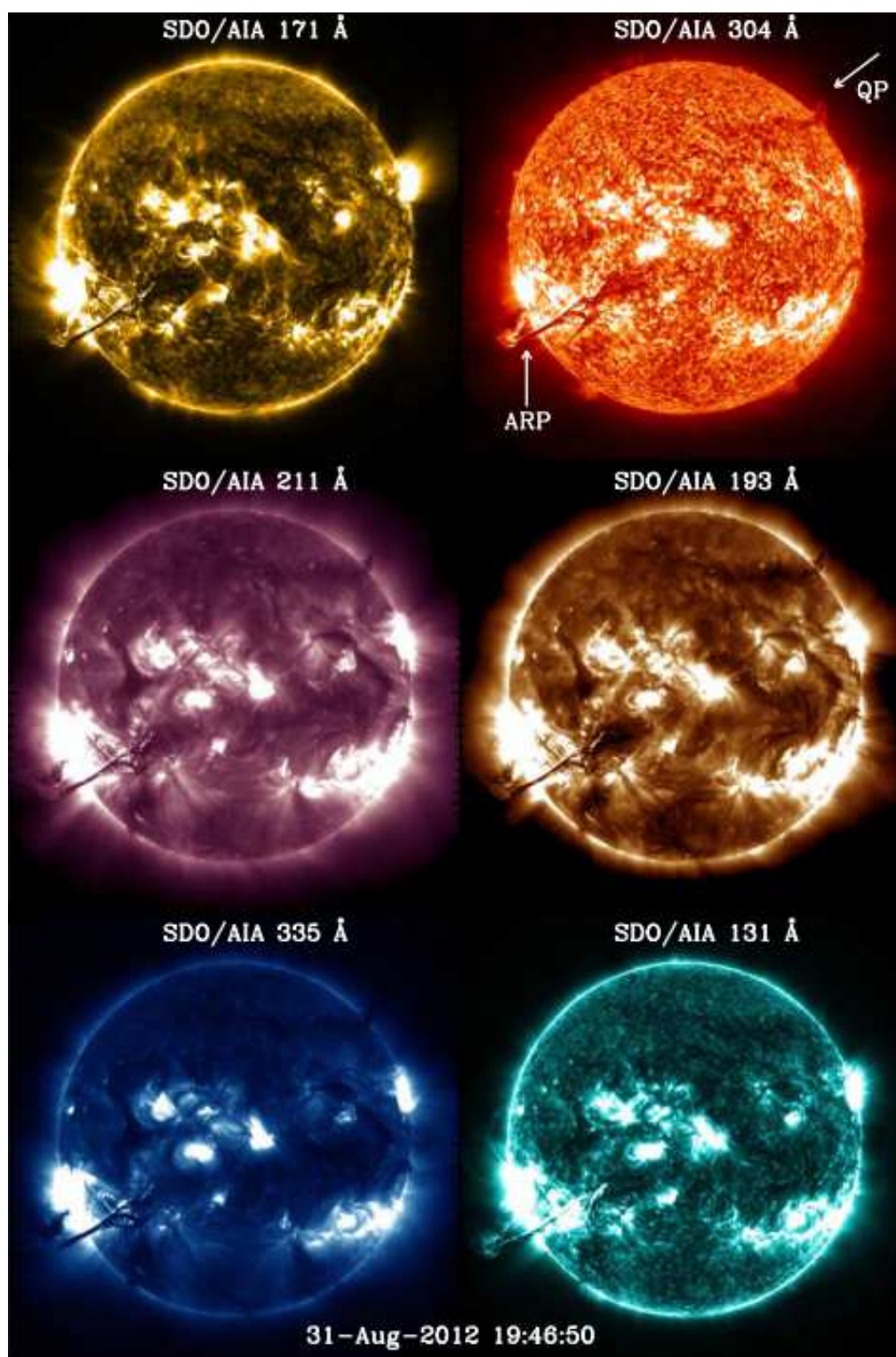
Активните протуберанси се локализируют в или в околност на активни области и обикновено се асоциират със слънчеви избухвания. Те са динамични структури с ясно изразени движения и с време на живот до няколко часа [8]. Типичните им размери са по-малки от тези на СП, температурата им е почти същата (и по-висока), но електронната им плътност, а и МП са значително по-големи. Сравнение на някои основни физически параметри на спокойните и активните протуберанси е представено в Таблица 1.1. Характерна особеност на структурата на АП са относително тънките и прави гръбнаци, както и малко на брой слабо изразени мустачетата (Фигура 1.3).

Разликите в морфологията между спокоен и активен протуберанс се виждат на Фигура 1.2.

Таблица 1.1: Физически характеристики на спокойните и активните протуберанси [118, 155].

Параметър	СП	АП
Височина [$\times 10^3$ km]	15 - 100	10 - 20
Дължина [$\times 10^3$ km]	60 - 600	10 - 50
Ширина [$\times 10^3$ km]	4 - 30	-
Сила на МП [G]	4-20	20-70
Време на живот	дни-месеци	часове

Смесеният тип протуберанси представляват междинен клас протуберанси. Наблюдават се най-вече между или в затихващи АО. Типичните



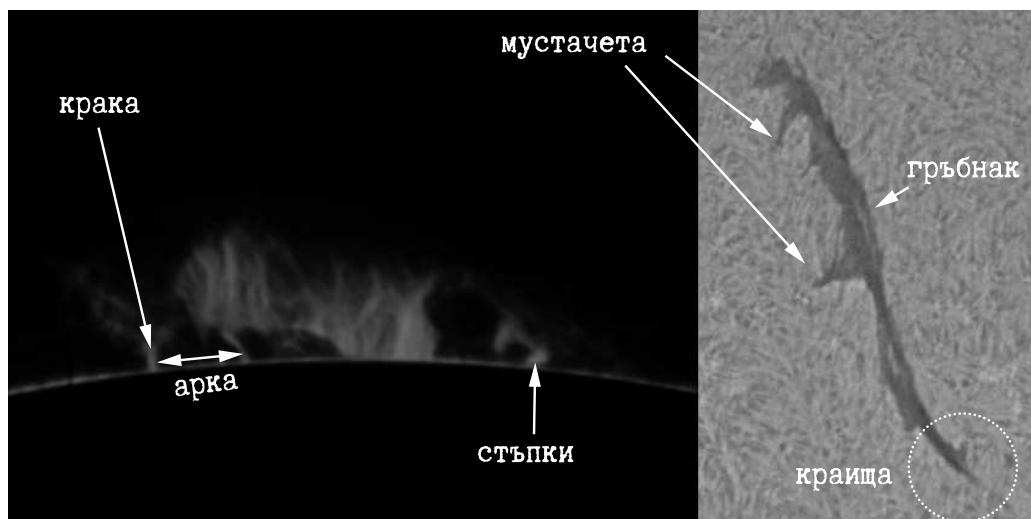
Фигура 1.2: Активен (означен като ARP на снимката) и спокоен (QP) протуберанс, регистрирани от SDO на 31 август 2012 г. в 6 различни филтъра на инструмента AIA.

им дължини са около 100 000 км. Често част от влакното има поведение на СП, а друга – на АП [163].

Структура

Структурата на протуберансите се различава според мащаба, в който наблюдаваме. Едромасщабната структура разглежда като едно цяло тялото на влакната. Размерите на едромасщабната структура са обобщени в Табл. 1.1. Наблюдения с разделителна способност над 1" разкриват мезоструктурата, а под 1" – фината структура на протуберансите.

На ниво мезоструктура тялото на протуберансите е съставено от отделни арки (Фигура 1.3). Чрез краката, арките достигат до хромосферата, а чрез стъпките – проникват в нея.

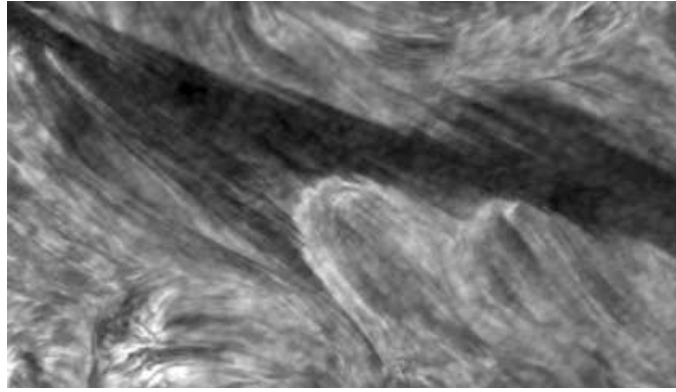


Фигура 1.3: Елементи от мезоструктурата на протуберанси и влакна. Снимки: НАО Рожен (15 август 2006 г.) и Big Bear Solar Observatory (29 септември 2013 г.).

Стъпките се наблюдават на места, където се срещат границите на 3-4 супергрануляционни клетки. Средното разстояние между стъпките на една арка е около 30 000 км [124] (разстояние, съизмеримо с диаметъра на супергрануляционните клетки). Когато наблюдаваме влакна върху слънчевия диск можем да различим мустачета и краища, аналози на арките, видими при протуберанс на лимба [96]. Хоризонтално по върха на влакната се разполага гръбнак.

Изменения на ниво мезоструктурата се наблюдават за време около два пъти по-кратко от времето на живот на самия протуберанс [68].

Фината структура на протуберансите е изградена от възли с големина 1 500-5 000 км, формиращи относително тънки, ярки вертикални нишки, които от своя страна съставят протуберансовите арки (Фигура 1.4) [27]. Средният диаметър на нишките е около 220 км, дължината им в H_{α} се изменя между 3 500 км и 14 500 км, а времето им на живот — до 20 минути [89].



Фигура 1.4: Протуберансови нишки, заснети от Swedish 1-m Solar Telescope [89].

Температура

Вследствие хаотичното топлинно движение на атомите (или йоните) в протуберансите се наблюдава Доплерово разширение на спектралните линии:

$$\frac{\Delta\lambda_D}{\lambda} = \frac{v}{c}. \quad (1.1)$$

Замествайки $v = \sqrt{2kT/m}$ (най-вероятната топлинна скорост на частиците), получаваме за Доплеровата ширина:

$$\Delta\lambda_D = \frac{\lambda}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m}}, \quad (1.2)$$

където T - кинетична температура на плазмата, а m - маса на атома.

Но атомите притежават и компонент на нетоплинна скорост ξ (“микротурбуленция”) [155], който също влияе на профила на линията и получаваме една по-обща формула:

$$\Delta\lambda_D = \frac{\lambda}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m} + \xi^2}. \quad (1.3)$$

Можем да разделим двата компонента на скоростта и да решим задачата един път за кинетичната температура и един път за турбулентната скорост, допускайки разделянето на ширината на линията на съставлящи я две, т.е. два различни химични елемента, с различна атомна маса: m_H и $m_i = \mu(i = 1, 2)$. m_H е масата на водороден атом, а m_i – атомното тегло на съответния химичен елемент. Тази процедура е позволена, ако двете линии са възбудени в един и същ обем от протуберансовата плазма. По този начин достигахме до уравненията:

$$T = \frac{m_H c^2}{2k} \left(\frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2} \right)^{-1} \left[\left(\frac{\Delta\lambda_{D1}}{\lambda_1} \right)^2 - \left(\frac{\Delta\lambda_{D2}}{\lambda_2} \right)^2 \right] \quad (1.4)$$

$$\xi^2 = \frac{2kT}{m_H} - c^2 \left(\frac{\Delta\lambda_D}{\lambda} \right)^2 \quad (1.5)$$

Употребата на Уравнения 1.4 и 1.5 в случаи, когато не е изпълнено условието две линии да произлизат от една и съща част на протуберанс води до недостоверни резултати.

Замествайки измерените стойности за Доплеровата ширина $\Delta\lambda_D$ в Уравнения 1.4 и 1.5, се получават решения в интервала: $5\,000\text{ K} \leq T \leq 8\,000\text{ K}$ и $5\text{ km s}^{-1} \leq \xi \leq 8\text{ km s}^{-1}$ [28, 56, 104, 148, 174]. Получените стойности съвпадат с характерните, приети от Hvar Reference Atmosphere of Quiescent Prominences (HRAQP) - $4\,300\text{ K} \leq T \leq 8\,500\text{ K}$ и $3\text{ km s}^{-1} \leq \xi \leq 8\text{ km s}^{-1}$ (за централните части на СП) [29]. Наблюдава се тенденция T и ξ да растат от центъра към периферията на протуберансовото тяло, достигайки до $T = 10^4 - 10^6\text{ K}$ и $\xi \sim 30\text{ km s}^{-1}$ в преходния слой протуберанс–корона [29]. Протуберансите в активна област имат по-високи температури и нетоплинни скорости.

Диапазонът на изменение на температурата, получен по същия метод, но с данни от SOHO (5 000–15 000 K) е по-голям от този, установен по наземни наблюдения. Вероятните причини може би се крият в наблюдателни изкривявания (например, обхващане и на части от преходната област протуберанс–корона поради специфична морфология на изследвания протуберанс), или от повишено нагряване по време на внезапно изчезване на СП по време на измерването [119].

Електронна плътност

Ефектът на Stark се изразява в отместване и разцепване на спектралните линии на атомите и молекулите в присъствие на външно статично електрично поле и позволява определяне на електронната плътност n_e на протуберанси. В протуберансите удобни за подобни изследвания са силните линии от Балмеровата серия на водорода H_α , H_β и H_γ . За водородния атом е установен математически израз на този ефект, който дава директна връзка между разцепването на линията $\Delta\nu_i$ и електростатичното поле F :

$$\Delta\nu_i = \frac{3h}{8\pi^2 m_e} q_i F \quad (1.6)$$

Стойността на q_i за Балмеровата серия на водорода се определя от зависимостта $q_i \leq n(n-1) + 1$, където n е номер на Балмерова линия.

С нарастване на плътността на плазмата, ефектът на Stark в крилата на водородните линии става все по-ясно изразен. А с увеличаване на номера на Балмеровата линия, линиите стават все по-близкоразположени в спектъра и техните крила започват да се припокриват, което затруднява отделянето на различните линии. Връзка между електронната плътност n_e и квантовото число n_{max} на последната разцепена линия от Балмеровата серия ни дава уравнението на Inglis и Teller, което е в сила за $n_{max} \leq 30$ [63, 83]:

$$\log n_e = 23.26 - 7.5 \log n_{max} \quad (1.7)$$

Един от първите резултати за плътността на протуберансите дава Hirayama – $n_e \sim 10^{11} - 3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ [56]. Представени са и стойности от други изследователи: $n_e \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ (при $n_{max} \sim 29$) [65] и $n_e \sim 5 \times 10^{10} - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ [67].

Друг метод се основава на връзката на отношението на интензитетите на различни спектрални линии с n_e . Изследвайки някои резонансни линии (NaI 5890, 5896 Å и SrII 4078, 4216 Å), Landman определя средна стойност за електронната плътност $n_e = 1.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ [84].

С навлизането на сателитните слънчеви наблюдения става възможно да се изчислява електронната плътност по интензитетите на спектрални линии в ултравиолетовата и рентгеновата област. Все пак, изследванията в ултравиолетовата област носят известен риск от измерване на сигнал от преходната област протуберанс-корона, което поставя под съмнение достоверността на резултатите [155].

Средна електронна плътност $n_e \approx 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ е измерена по наблюдения от High Resolution Telescope and Spectrograph на борда на Spacelab

2, а стойности в интервала $n_e \sim 10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ са измерени от SOHO.

Електронно и газово налягане

Електронното налягане е параметър на плазмата в СП, определянето на който силно зависи от прецизните оценки на температурата и електронната плътност:

$$P_e = n_e kT \quad (1.8)$$

Съгласно HRAQP [68] електронното налягане в централните части на СП е в диапазона $P_e = 6 \times 10^{-3} - 10^{-1} \text{ dyn cm}^{-2}$, а в краищата достига $P_e = 4 \times 10^{-3} - 7 \times 10^{-3} \text{ dyn cm}^{-2}$.

За газовото налягане:

$$P_g = \frac{NkT}{\mu} \quad (1.9)$$

HRAQP дава стойностите $P_g = 0.1 - 2 \text{ dyn cm}^{-2}$ за централната част и $P_e = 2 \times 10^{-2} \text{ dyn cm}^{-2}$ за периферията. Космическите наблюдения дават електронно налягане в рамките на $P_g = 0.03 - 0.38 \text{ дин см}^{-2}$ [119].

Степен на йонизация

В образуването на протуберансовия спектър основна роля имат електроните, които разсейват фотосферно излъчване. Интензитетът на разсеяното фотосферно излъчване има вида:

$$I_{sc} = \sigma_e W N_e I_{ph}, \quad (1.10)$$

където σ_e е напречното сечение на електрон при Томсъново разсейване, I_{ph} – интензитет на фотосферното излъчване, а W – геометричен коефициент на изменение на интензитета, а

$$N_e = n_e X \quad (1.11)$$

Тогава:

$$n_e = \frac{I_{sc}}{W \sigma_e X I_{ph}}. \quad (1.12)$$

Можем да приемем, че $n_e = n(\text{HII})$ и да запишем Уравнение 1.11 във вида:

$$\frac{n_e X}{n(\text{HI}) X} = \frac{n(\text{HII})}{n(\text{HI})}. \quad (1.13)$$

Така, за да определим степента на йонизация ни е нужно само $n(\text{HI})X$. За целта се използва метален йон с добре изследван спектър (обикновено някой измежду TiII, SrII или CaII, тъй като техните йонизационни потенциали са близки до този на HI – 13.6 eV) и зависимостта:

$$n(\text{HI})X = \frac{n(\text{H})}{n(\text{M})}n(\text{MII})X, \quad (1.14)$$

където M и MII означават, съответно, неутрален и еднократно йонизиран метал.

Различни изследвания дават резултати за степента на йонизация в широк интервал:

$$1 < \frac{n(\text{HII})}{n(\text{HI})} < 10$$

или

$$0.5 < \frac{n_e}{n(\text{H})} < 0.9$$

за $\frac{n_e}{n(\text{H})} = \frac{n(\text{HII})}{[n(\text{HI}) + n(\text{HII})]}$ – частична йонизация.

Маса

Основният метод за определяне масата на протуберанси е свързан с измерване на поглъщането от протуберансовото вещество:

$$M = [4(1 - \epsilon_H) + \epsilon_H]m_H \iint -\frac{\ln \alpha}{\sigma} da, \quad (1.15)$$

където m_H – маса на водорода, a – площ на областта на протуберансово поглъщане, σ – общото напречно сечение, а ϵ_H – процентно съдържание на водород (като $\epsilon_H + \epsilon_{He} \approx 1$, ϵ_{He} – процентно съдържание на хелий). Коефициентът на поглъщане е

$$\alpha = \exp\left(-\int_0^l n\sigma ds\right) \quad (1.16)$$

Така получените оценки за масата на протуберанс варират от $10^{11} - 10^{12}$ g [53, 141] до $M = 8 \times 10^{13} - 2 \times 10^{15}$ g [43, 163].

Магнитно поле

Всички прояви на активност дължат своето съществуване на локалните магнитни полета на Слънцето. Различните активни образувания представляват различни проявления на еволюцията на лежащото под тях МП [126].

Първи измервания на МП в СП правят Zirin и Severny (1961 г.), които определят стойност от порядъка на $B \sim 50$ G.

Два са основните методи за определяне магнитното поле на протуберанси – използвайки ефект на Zeeman или ефект на Hanle. Ефектът на Zeeman позволява измерване само на надлъжната компонента на МП, но едва няколко спектрални линии на протуберансите са подходящи за измервания на МП чрез ефект на Hanle (напр. HeI 5876 Å във видимата област и HeI 10830 Å в инфрачервената) [96]. Получените резултати за магнитното поле на спокоен протуберанс са различни според метода на изследване, изследваната част от протуберанса, а и поради голямото разнообразие от СП. Индукцията на протуберанс на лимба по лъча на зрение (използвайки ефект на Zeeman) е в интервала 30-40 G [125]. Измерените средни стойности също варират – 7.3 G [154], 5 ± 2.5 G [136], 8 G [155]. Специално построена за такива изследвания обсерватория The High Altitude Observatory оценява МП на около 10 G [87]. Изследвания по метода, използващ ефект на Hanle се провеждат в Sacramento Peak Sunspot Solar Observatory, които достигат до сходни резултати, измервайки общото МП.

Обобщени резултати, включващи още измервания от Kislovodsk Solar Observing Station of Pulkovo Observatory, Sayan Solar Observatory и Pic du Midi показват, че магнитната индукция на СП попада в интервала 3-30 G за 90% от изследваните протуберанси. Освен това СП с $B < 2$ G почти не се наблюдават. [87]. Вероятно причината за това е, че в ниската корона като цяло отсъстват области с $B < 2$ G или че в толкова слаби МП протуберанси не се зараждат. Магнитното поле показва тенденция да нараства с височината на СП с $0.5 \times 10^{-4} - 4 \times 10^{-4}$ G km⁻¹ [6, 88, 136], както и с напредване фазата на слънчевия цикъл [51]. Впечатление прави и фактът, че индукцията на полярните влакна е по-малка ($B \sim 8$ G) от тази за СП на ниски ширини ($B \sim 20$ G), тъй като те се разполагат близо до активни области. За активните протуберансии, магнитното поле достига стойности до 70 G [88].

Магнитното поле в протуберансите е предимно хоризонтално като посоката на надлъжната му компонента сключва ъгъл от около 25° с надлъжната ос на протуберанса [126].

Плазмена бета

Параметърът на плазмата β показва кое има доминираща роля при определяне поведението на веществото за дадена област от слънчевата атмосфера – плазменото ($P_p = nkT$) или магнитното налягане ($P_m = B^2/2\mu$):

$$\beta = \frac{P_p}{P_m} = \frac{nkT}{B^2/2\mu} = \frac{2\mu P_p}{B^2} \quad (1.17)$$

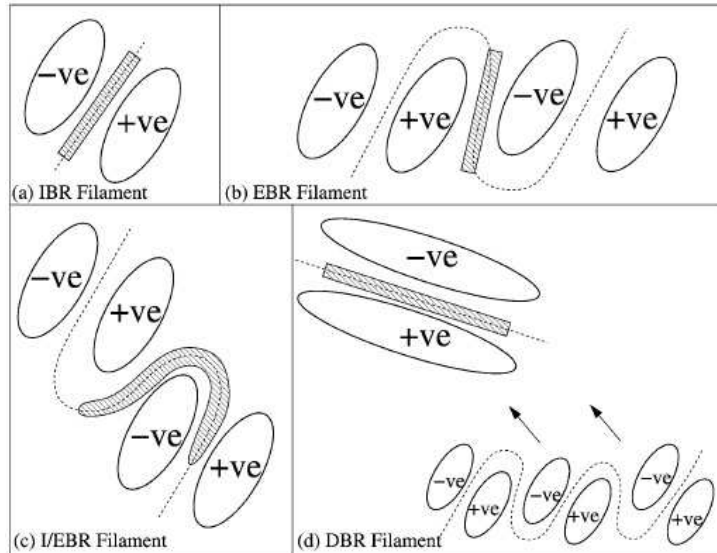
В протуберансите $\beta = 10^{-3} - 10^{-1}$, т. е. $P_g < P_m$. Морфологията, динамиката, както и самото съществуване на протуберансите се определят от свойствата и еволюцията на магнитните полета, поддържащи и изолиращи протуберансовото вещество от горещата корона ($\beta < 1$).

Влакната като трасери на магнитното поле

Протуберансите се разполагат по магнитните инверсни линии (МИЛ) – границата на области с противоположна магнитна полярност във фотосферата, където МП е хоризонтално [3]. Тези линии съвпадат с т. нар. канали на влакната [8]. Според съвременните представи съществуват 4 категории МИЛ, които дефинират вида на образуваните върху тях влакна (Фигура 1.5) [94]:

- Влакно в биполарна активна област (internal bipolar region filament – IBR) – разполага се по МИЛ, които разделят две противоположни магнитни полярности в една и съща активна област.
- Влакно между биполарни активни области (external bipolar region filament – EBR) – разполага се по МИЛ, които разделят две съседни биполарни активни области. Характерна конфигурация за класически спокойни влакна. Тъй като влакната се намират между водещата полярност на едната активна област и опасната полярност на другата, полярността от двете страни на МИЛ е обратна на тази при IBR влакна.
- Влакно от смесен тип (internal/external bipolar region filament – I/EBR) – част от влакното се намира върху вътрешна МИЛ в биполарна активна област, а останалата част – по МИЛ извън нея.
- Влакно в дифузна биполарна магнитна област (diffuse bipolar region filament – DBR) – конфигурация, характерна за полярни протуберанси. Разпределянето на полярностите от двете страни на дифузна биполарна област е резултат от появата, смесването и изчезването

нето на много магнитни потоци, което усложнява конфигурацията и я отличава от останалите типове.



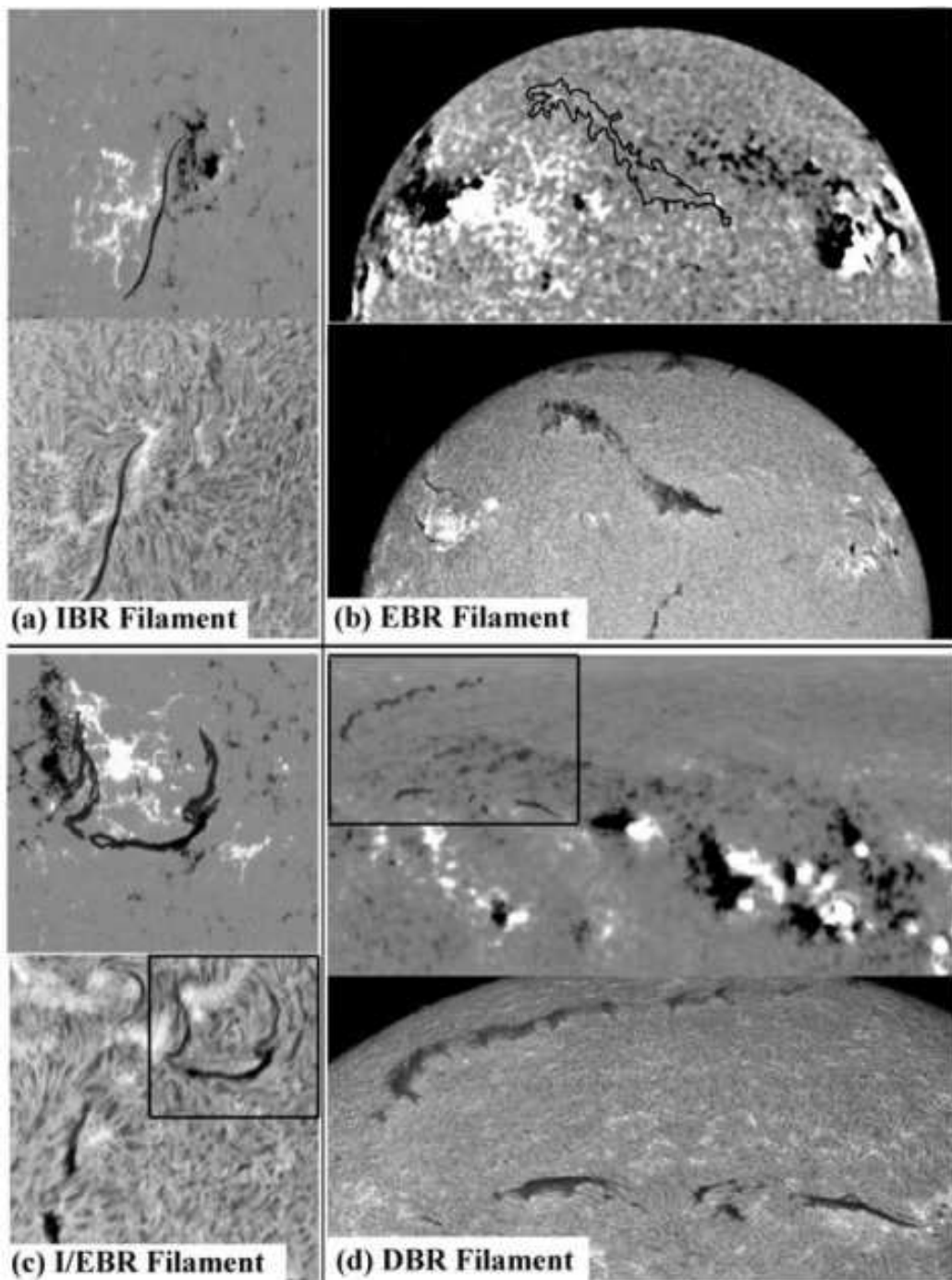
Фигура 1.5: Класификация на протуберанси според вида на магнитните инверсни линии, върху които са образувани [94].

Наблюдателни примери за всеки от четирите вида протуберанси са показани на Фигура 1.6.

Първите две категории са аналогични на определените години по-рано от Tang [157] и Tandberg-Hanssen [155] МИЛ тип А и В, докато последната се асоциира с предложената по-късно от Leroy - С-МИЛ [87]. Влакната, разположени между АО (EBR) се наблюдават по-често от такива в АО (IBR), но интензитетът на МП около IBR е много по-голям [157].

Установено е, че над 92% от влакната се образуват в магнитни конфигурации, включващи две или повече взаимодействащи си биполарни активни области (EBR, I/EBR или DBR), а едва около 7% се локализируют в биполарна активна област (IBR) [95].

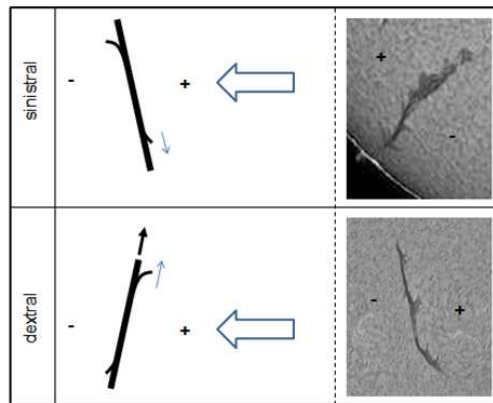
Фактът, че протуберансите се формират на всички хелиографски ширини, ги прави много удобни за проследяването и изучаването на структурата и еволюцията на едромащабното магнитно поле на Слънцето.



Фигура 1.6: Наблюдения на влакна от (a) 26 юни 1979 г., (b) 6 май 1979 г., (c) 27 септември 1979 г. и (d) 14 юли 1979 г., разположени върху четирите различни категории МИЛ [94]. Всеки от четирите панела съдържа по две изображения: долу – H_{α} изображение от Ottawa River Solar Observatory, горе – магнитограма от Kitt Peak National Observatory. Контурите на влакното в H_{α} са очертани върху магнитограмата.

Огледална симетричност

Огледалната симетричност на конфигурацията на МП на влакната се определя от ориентацията на мустачетата на влакното спрямо неговата централна ос, гледана от положителната страна на МИЛ и разделя влакната на *дясно* (*dextral*) и *ляво* (*sinistral*) *насочени* (Фигура 1.7). Мустачетата на дясно насочено влакно са изтеглени от гръбнака към хромосферата под ъгъл вдясно от вертикалата, а МП по оста на влакното е винаги надясно, докато при ляво насочено влакно, мустачетата са изтеглени от гръбнака към хромосферата по ъгъл вляво от вертикалата, а МП по оста е винаги наляво.



Фигура 1.7: Огледална симетричност на влакната. Изображенията са заснети от Swedish 1-m Solar Telescope.

Влакната в северната полусфера са предимно ляво насочени, а тези в южната – дясно насочени [100]. Тази зависимост е изпълнена както за активни, така и за спокойни влакна, въпреки че при АП е по-слабо изразена [122].

Магнитната конфигурация в каналите на влакната може да се опише с *linear force-free magnetic field* (налягането на плазмата е пренебрежимо малко и се отчита само магнитното налягане) [93]:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}. \quad (1.18)$$

МП с $\alpha > 0$ образува канал с ляво ориентирано влакно, а МП с $\alpha < 0$ – дясно (α – константа, определяща състоянието на системата).

Цикличност

Магнитното поле оказва влияние и върху честотата на поява на протуберансите. Като част от активните образувания на Слънцето, тяхното разпространение (брой, размер и местоположение) зависят от цикъла на слънчева активност.

Зависимостите от фазата на слънчевия цикъл са сходни с тези, наблюдавани при петната за влакна на ниски хелиографски ширини. Близо до минимум броят им е малък, те са с по-малки размери, по-краткоживущи и много по-рядко проявяват активност. Около максимума на цикъла, освен че техният брой и активност нарастват, влакната мигрират - тези, които имат хелиографски ширини от средно $\pm 30^\circ$ в началото на цикъла, в края достигат до около $\pm 17^\circ$. Зоните на образуване на протуберансите се изместват заедно с тези на петната като остават винаги над тях по ширина (приблизително с 10°) [21]. Полярните влакна с течение на цикъла се изместват на още по-високи ширини, като някои от тях могат да достигнат и почти до $\pm 90^\circ$ хелиографска ширина (Фигура 1.8).

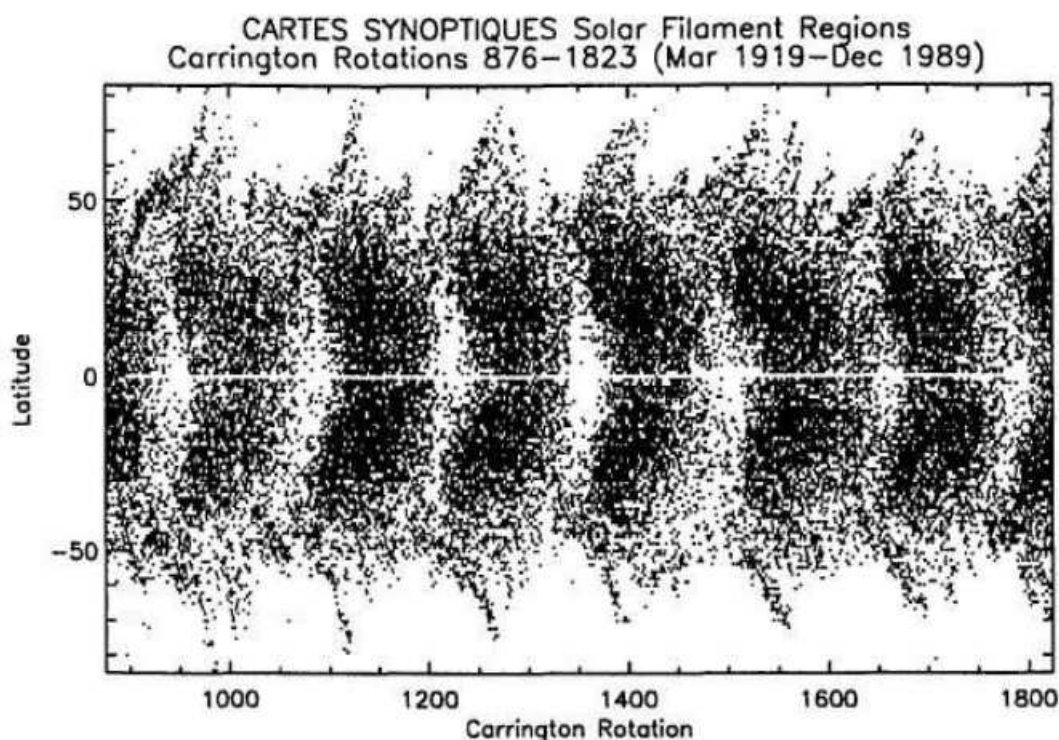
1.3.2 Образуване и поддържане

Отговорите на въпросите за формирането и поддържането на СП се свързва със силата, която поддържа протуберансите и начинът за „топлинна защита“ в значително по-гореща среда.

Съществуват различни модели, обясняващи формирането на протуберансите. Вследствие на диференциалното въртене на Слънцето, се получават вариации между две конфигурации на слънчевото МП – от полоидална към тороидална и обратно. В резултат на този процес, магнитните силови линии (МСЛ) на глобалното МП се усукват и на места „изплуват“ над повърхността поради т. нар. магнитна плаваемост (дължи се на това, че плътността на плазмата в тръбите на магнитния поток е по-ниска от тази на обкръжаващата плазма). На повърхността силовите линии образуват активни области с аркади над тях.

Моделите за образуване на протуберансите са *статични* и *динамични*.

Сифонният модел е статичен и включва магнитна конфигурация като тази на Фигура 1.9. При повишаване на външното налягане в короната, намаляване на нагриването от вълни или нарастване дължината на МСЛ при движение на стъпките на аркадата или заради усукване се поражда топлинна неустойчивост. Тази неустойчивост изпомпва вещество към двете страни на магнитната арка и се осъществява сифонен приток на вещество към върха на аркадата. Смята се, че така се образуват влакната

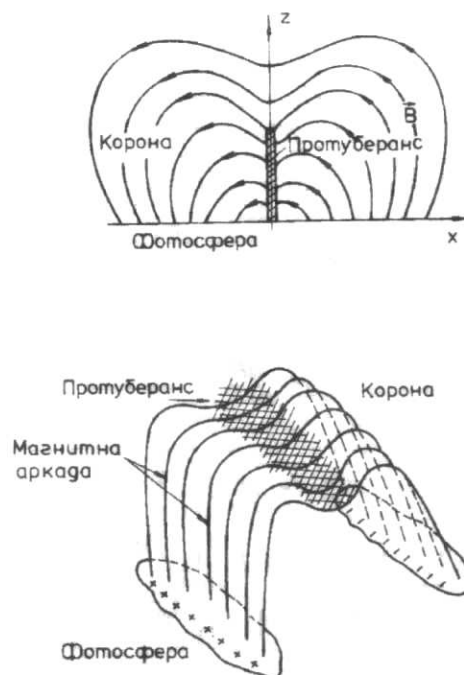


Фигура 1.8: Диаграма на активността и разпределението на протуберансите по хелиографска ширина [17]. Аналог на т. нар. ”пеперуда на Маундер” при слънчевите петна.

в АО [125].

Динамичните модели включват инжектиране (surge, изпарение) или кондензация. Техните магнитни конфигурации са показани на Фигура 1.10. Моделите, включващи surge инжектиране на вещество се основават на балистично изхвърляне на матеия от хромосферата към короната. Другият модел, включващ инжектиране показва, че непрестанното нагорещяване в примките може да прерасне до изпарение и температурни нестабилности на върха на примката. Влакната в АО се образуват при асиметрично инжектиране (напр. чрез спикюли, които представляват бързи джетове $V \sim 22 \text{ km s}^{-1}$), докато СП се формират при симетрично инжектиране (напр. при изпарение на хромосферно вещество със скорост около $V \sim 3.5 \text{ km s}^{-1}$). Кондензация на самата короналната плазма с бързи ударни вълни, които могат да бъдат породени от магнитно присъединяване също може да доведе до образуване на протуберанс.

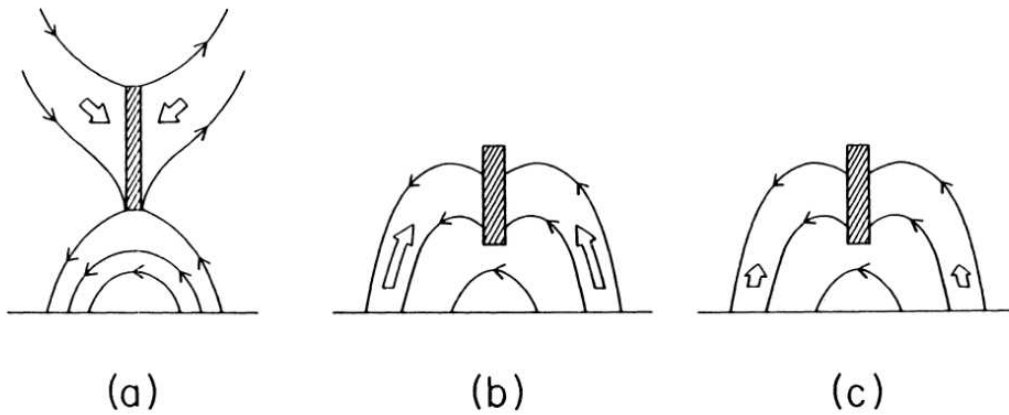
Поддържането се осъществява от магнитоаркова система, деформи-



Фигура 1.9: Магнитна конфигурация на устойчив протуберанс тип - сифон [21].

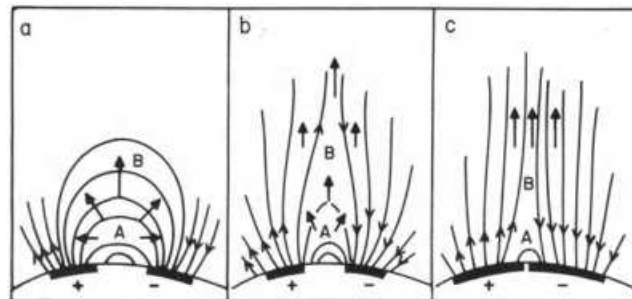
рана в горния край, където лежи протуберансът (Фигура 1.9). Протуберанс, разположен върху коронална магнитна арка, чиито силови линии са вдлъбнати надолу под действието на плътната протуберансова плазма, се поддържа срещу силата на тежестта благодарение на МП, което създава сила, насочена нагоре. То създава и напречна сила, която свива плазмата и уравнива плазменото налягане.

Съгласно модела на Kuperus и Tandberg-Hanssen [82] за образуване на СП първоначално затворената магнитна конфигурация на АО се раздува в резултат на активност (напр. избухване или еруптивна неустойчивост), което довежда до формирането на отворена магнитна конфигурация (Фигура 1.11). При относителни движения (приближаване и раздалечаване) на области с различни конфигурации на МП се образува токов слой, вследствие на което се кондензира протуберанс. Кондензирайки се (температурата намалява и плътността се увеличава) плазмата увлича със себе си МП, в резултат на което нараства магнитното налягане. След известно време обаче нарастването на полето отслабва поради възникването на неустойчивост, която разрушава структурата на поле-



Фигура 1.10: Схематично представяне на динамични модели за образуване на протуберанс: (a) коронална кодензация; (b) surge инжектиране; (c) изпарение [33].

то и води до образуване на магнитни примки (те осигуряват топлоизолацията на плазмата). Освен това присъединяването на МСЛ създава затворено поле в основата на слоя, което способства за поддържането на кондензираната плазма срещу действието на силата на тежестта [125]. По време на този процес част от силовите линии над протуберанса се затварят и възниква конфигурация, характерна за короналните стримери.



Фигура 1.11: Магнитна конфигурация на устойчив протуберанс според модела на Kuperus и Tandberg-Hanssen [154].

Устойчивите влакна обикновено се разполагат или в биполярни магнитни области между участъците с противоположна полярност, или на

обърнатата към полюса страна на биполярна или униполярна област. Влакната неизменно се наблюдават там, където направлението на МП е успоредно на слънчевата повърхност, което осигурява поддържане на протуберанса (МП възпрепятства насочените надолу движения).

Топология на магнитното поле

Формирането и поддържането на влакната се определя не само от собственото им магнитно поле, но и от отношението на конфигурацията на магнитното поле на протуберанса към едромашабното магнитно поле на Слънцето, структурата на което е трасирана от магнитните инверсни линии. Има два основни типа топологии на конфигурацията на магнитното поле на спокоен протуберанс – нормална (N) по т. нар. модел на Kirpenhahn-Schluter (K-S) и инверсна (I) – модел на Kuperus-Raadu (K-R), който представлява доразвит модел на Kuperus и Tandberg-Hanssen.

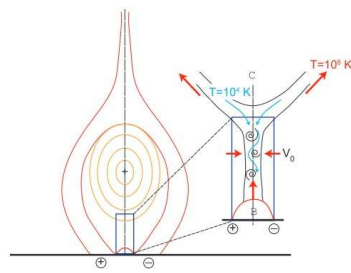
При протуберанси с нормална конфигурация, посоката на полето през протуберанса е същата като тази на нисколежащото фотосферно магнитно поле [171]. Тук протуберансовата плазма се поддържа от Лоренцова сила в токов слой на върха на арката. В по-късни версии на модела се установява, че протуберансът може да се образува и на върха на магнитната аркада. Инверсните конфигурации пък предполагат обратна полярност на полето през протуберанса спрямо тази на фотосферното поле под него [81]. Такива са протуберансите на високи ширини. Идентифицирането на типа на протуберанса и конфигурацията на неговото магнитно поле се изразява в определяне на посоката на вектора на неговото магнитно поле спрямо тази на вектора на фотосферното поле.

1.3.3 Обкръжение на СП

Видът, еволюцията и свойствата на протуберансите зависят от взаимодействието на локалните и глобалното МП в и около него. Това подчертава важната връзка между влакната и тяхното обкръжение.

Спокойните протуберанси се разполагат върху *канални* (структури, наблюдавани в рентгеновата област, които съвпадат с положението на МИЛ) в основата на *шлемовидни стримери* (Фигура 1.12) – големи, ярки, сравнително радиални структури с по-висока плътност от околната коронална среда. Често се разполагат на ширини около и над 50° , имат характерен диаметър $\sim 300\,000\text{ km}$ ($\approx 0.45R_\odot$) и височина $0.5 - 10R_\odot$. По време на ПСЗ се наблюдават в бяла светлина (Фигура 1.13).

В пространството между протуберанса и арките на стримера, в неговата основа се намира по-тъмната и по-малко плътна най-вътрешна



Фигура 1.12: Типично обкръжение на спокоен протуберанс (син контур) в основата на коронален стример (червен контур) с коронална кухня помежду им (златист контур) [29].



Фигура 1.13: Шлемовидни стримери, заснети по време на наблюдение на ПСЗ от 21 август 2017 г. Изображението е сбор от различни експозиции с повишена яркост, поради което трудно се забелязват протуберансите в основата на стримерите.

част на шлема – *коронална кухня* (Фигура 1.12) – големи области, които могат да се наблюдават в бяла светлина по време на ПСЗ или на

изображения на короната в EUV, обикновено на ширини над 40° . Потъмни са, тъй като са с 30-40% по-ниска плътност спрямо околността, а температурата им е съизмерима с тази на обкръжението [9]. Размерите им (височина и ширина) са приблизително два пъти по-големи от тези на СП [137, 168].

Връзката между протуберансите и кухните се основава на идеята за формиране на протуберанси чрез коронална кондензация: гореща плазма, която се охлажда в областта на кухината над протуберанса играе ролята на източник на слабо йонизирана плазма в СП (Фигура 1.12). Наблюденията на кухини, които не съдържат протуберанси се обясняват чрез недостатъчно количество плазма в кухината [8]. Модели на кухини загатват за вероятна връзка с магнитни вължета, разположени над фотосферните МИЛ. Не всички коронални кухини съдържат протуберанси, но в обкръжението на почти всички полярни СП се наблюдават кухини в даден момент от тяхното развитие. Смята се, че кухините са отговорни за около 40% от всички слънчеви ерупции като в тях се оформя тялото на спокойните ИКМ [44, 123].

Над кухините се разполагат *коронални празнини* – тънки, тъмни, подобни на лъчи структури, простиращи се в короната на разстояния до $3R_\odot$ от лимба. Възникват и изчезват в течение на по-малко от 4 часа, което прави времето им на живот по-късо от това на каналите на влакната и самите влакна [97].

Външната обвивка на протуберансите, където температурата на плазмата нараства до 10^5 K, плътността ѝ намаля и средата става оптически тънка се нарича *преходна област протуберанс-корона*. Тя разделя студено протуберансово вещество от горещата милиони келвини корона.

1.3.4 Динамика и еволюция на протуберансите

Едромащабни движения

Влакната участват в два характерни типа едромащабни движения по слънчевата повърхност:

- Изместване по хелиографска дължина под действие на диференциалното въртене на Слънцето. Това движение се описва със закона на d’Azambuja за диференциално въртене на влакната (важи за влакна със средна продължителност на живот) [19]:

$$\xi = 14^\circ.42 - 1^\circ.40 \sin^2 \varphi - 1^\circ.33 \sin^4 \varphi, \quad (1.19)$$

където φ – хелиографска ширина, а $[\xi] = ^\circ/\text{ден}$. Законът показва, че протуберансите в екваториалната зона се изместват на запад

в последователните ротации на Слънцето, но най-силно изразен е ефектът от диференциалното въртене при влакна, разположени на ширини $\varphi > \pm 35^\circ$ - изместването на запад при тях е значително и постепенно променят ориентацията си изток-запад [112].

- Изместване по хелиографска ширина към полюсите (меридионален дрейф). Това движение на протуберансите към полюсите е различно от преместването на зоните на тяхното образуване по време на слънчевия цикъл. Меридионалният дрейф се изразява в преориентиране на влакно от направление север-юг по направление изток-запад.

Но рядко се срещат изключения – протуберанси, най-вече дългоживущи (повече от 3 ротации) от екваториалната зона ($0^\circ - \pm 20^\circ$), които не показват западен дрейф, но притежават собствени въртеливи движения около неподвижна точка – т. нар. точка на твърдото въртене (pivot-point – PP) [101]. Средната скорост на изместването на точките на твърдото въртене е около $13^\circ/\text{ден}$ и не зависи от хелиографската ширина [112]. Все пак влакната, притежаващи PP са подложени на ефекта на диференциалното въртене – техните откъмполюсни части се въртят по-бавно, а екваториалните – по-бързо. PP са характерни за зоната на активност на Слънцето и често се асоциират с появата на нови активни области и слънчеви избухвания [147]. По време на максимум на цикъла на слънчева активност има между 10 и 20 такива точки на повърхността. PP се локализируют винаги по линиите на обръщане на магнитната полярност, което в комбинация с твърдото въртене се интерпретира като доказателство, че тези структури са закотвени дълбоко в конвективната зона. Всички PP върху слънчевата повърхност формират мрежа на твърдото въртене.

Промени в морфологията

Обикновено след зараждането си влакната имат характерна едромашабната структура наподобяваща една или повече свързани арки. Често протуберансите извън активна област се зараждат на части, които покъсно се съединяват. Възможно е след време частите отново да се разделят, но мястото на разделянето задължително съвпада с това, където са се съединили. При спокойните влакна след първите дни на нестабилност, настъпва период на устойчиво съществуване и постепенна еволюция. Дължината на влакната се увеличава със скорост $\Delta l/\Delta t \approx 10 \text{ km}/\text{ротация}$. Обикновено максимална дължина се достига след около 3 ротации като по-дългоживущите влакна достигат по-големи дължини.

Следва период на намаляване на дължината, което се случва приблизително със същата скорост (кривата на изменението на дължината във времето е почти симетрична) [19].

По време на съществуването си влакната претърпяват и известни промени в своята ориентация. В началото са разположени така че техните източни краища да са по-близо до полюсите, включвайки ъгъл с меридианите $\approx 38^\circ$ [19]. Този ъгъл се увеличава с времето като след 4-5 слънчеви ротации протуберансите, които все още не са изчезнали са разположени почти по паралелите.

Време на живот

Времето на живот на спокойните протуберанси се мени в широк диапазон и силно зависи от хелиографската ширина, на която те се формират, както и от положението им спрямо активните области.

Времето на живот на протуберансите се различава значително според техния вид, хелиографската ширина и наличието на други близки активни образувания. Средното време на живот на спокойните влакна в зоната на петнообразуване, съществуващи една и повече ротации, е около 90 дни [19]. Най-дългоживущите влакна се наблюдават над 10 слънчеви ротации (~ 300 дни). Влакната в активни области се характеризират със значително по-кратко съществуване. Средното време на живот на полярните влакна е 5.2 слънчеви ротации. В екваториалните области протуберансите съществуват средно 3.1 ротации (за протуберанси в активни области) и 3.3 (за такива извън активни области) [35].

1.3.5 Дестабилизация

Неустойчивости

Част от съществуването на немалка част от протуберансите са процесите на дестабилизация и активация – преход от близко до спокойното състояние към напълно активно в рамките на няколко часа, свързано с промяна във вида и структурата на влакното [77].

Физическите механизми, които отключват дестабилизацията на протуберанси (тригери) и могат да доведат до тяхната ерупция се разделят в 4 категории:

- Конвергиращи движения (converging flows) [34].
- Повърхностни (диференциално въртене) и подфотосферни движения, водещи до деформация на повърхностното поле на скоростите (shear flows) [55].

- Поява на нов магнитен поток (flux emergence) [15, 31].
- Изчезване (дифузия) на магнитен поток (flux cancellation) [99].

Някои изследователи разглеждат като допълнителни отключващи механизми за развитие на еруптивна неустойчивост изместването (деформацията) на магнитното поле (magnetic shear), спиралното усукване на магнитното поле (magnetic helicity) и магнитното присъединяване (magnetic reconnection). Въпреки че те са част от процеса на активация при много протуберанси, те се смятат за вторични явления, резултат от конвергиращите и/или повърхностните и подповърхностните движения на слънчевата плазма [107].

Предвестници и признаци на дестабилизация

Процесите, които могат да послужат като наблюдателен белег за предстояща или протичаща дестабилизация в протуберансите се делят на предвестници (precursors) и признаци (signatures):

- Потъмняване или повишаване на яркостта на части от протуберанса или области от близката му околност в ултравиолетовата област [1], „мекия“ рентген [50] и/или в линията H_{α} [98].
- Нарастване скоростта на вътрешните движения на веществото поради нагряване на протуберансовата плазма [16, 80].
- Разрастване на кухнята над протуберанса [38].
- Оттичане на протуберансово вещество към хромосферата [?, 155].
- Зараждане или затихване на радиощумови бури в метровия диапазон [129].
- Радиоизбухвания от III-ти тип [66].

Осцилации

Тялото на протуберансите е обект на няколко различни по своята същност вида осцилации.

Осцилации с голяма амплитуда (LAO) възникват когато целият протуберанс бъде разклатен от вълна на Moreton [130] и се наблюдават вибрации със значителна амплитуда на скоростта ($\geq 20 \text{ km s}^{-1}$). Открити са по наблюдения в областта на линията. Когато скоростта по лъча на

зрение значително нарасне, протуберансът става невидим в H_{α} , откъдето идва наименованието „премигващ протуберанс“ (winking filament) на този тип събития. Периодът на тези осцилации варира между 6 и 40 минути [130]. Не е открита връзка между периода и размерите на протуберансът, близостта му до избухвания или техните размери. Смята се, че всеки протуберанс осцилира със собствена честота. Обикновено LAO се наблюдават 2-4 периода, след което затихват.

Освен вълни на Moreton, осцилации с голяма амплитуда могат да бъдат предизвикани още от EIT вълни [42], близки джетове или микроизбухвания [69, 166], еруптивна фаза на влакно [64] и др. Въпреки че повечето осцилации, асоциирани с избухвания претърпяват вертикални осцилации, има и случаи на хоризонтални.

СП са обект и на осцилации с малка амплитуда (SAO). Имат локален характер и обхващат само ограничен обем от протуберансите. Не е открита зависимост между периодът и размерът на осцилиращата част на влакното. Без отговор остава въпросът за зависимостта на осцилациите от фината структура на протуберанс. Имат малка амплитуда на скоростта – типичните стойности са от 0.1 до 2-3 km s⁻¹ [2].

Все още не е идентифициран процесът, който предизвиква SAO. Съществуват предположения, че се пораждат от периодични движения на МП, предизвикани от фотосферни или хромосферни осцилации, което обаче предполага, че SAO трябва да се наблюдават едновременно по цялото тяло на протуберансите. Освен, че обхващат само части от протуберанс, измерените периоди не съвпадат с предсказаните от този модел, което предполага, че ако е точен, то той не е единственият механизъм за генериране на SAO. Други хипотези ги интерпретират като последица от разпространяващи се магнитохидродинамични вълни. Най-разпространени са схващанията, че периодичните смущения се предизвикват от външни внезапни въздействия, които възбуждат различни характерни моди (eigenmodes) в структурата на протуберансите [2]. Причинителите могат да бъдат и с постоянен характер като в случая с 5-минутните фотосферни и 3-минутните хромосферни осцилации, чието влияние се разпространява по МСЛ и предизвиква движения в протуберансовата плазма.

Осцилациите на протуберанси се наблюдават със спектрографи в една или повече спектрални линии в продължение на няколко минути до няколко часа. Използват се още и изображения, и филтрограми (изображения в определен дължина на вълната).

Сведенията за тяхната периодичност са противоречиви. Ранните изследвания показват, че SAO могат да се разделят на 2 основни групи – краткопериодични (с периоди под 10 минути) и дългопериодични (40–80

минути) [117]. С натрупване на наблюдения се обособява и още една група среднопериодични осцилации с малка амплитуда (с период 10–40 минути) [173]. Същевременно са засечени както осцилации с период около 30 секунди, така и такива с 5–6 часа, 12 часа и 10–30 часа, което показва, че съществуват и многократкопериодични/многодългопериодични такива. Въпреки това, подобно разделение не отразява различен произход на осцилациите от различните категории и не може да бъде свързано с тяхната природа или източник.

Съществуват предположения за зависимост между периода и хелиографската ширина, на която са детектирани осцилациите (за такива с период над 40 минути), но по въпроса за връзката с цикъла на слънчева активност няма никакви данни.

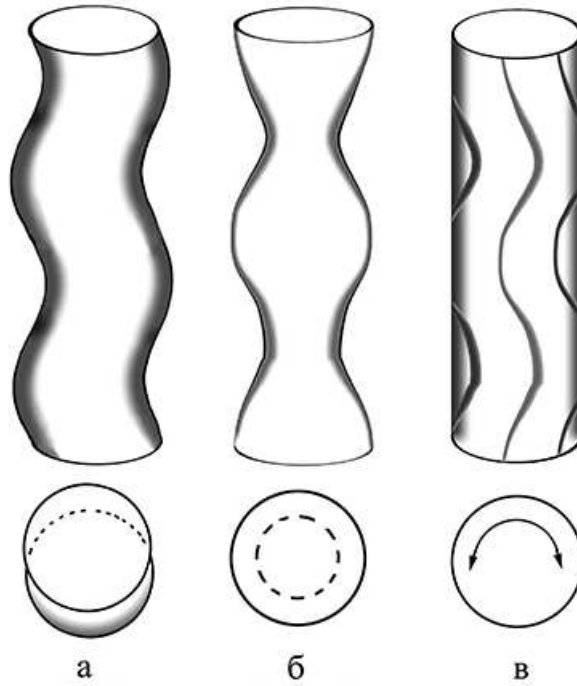
Наблюденията на един и същ протуберанс в няколко последователни дни показват, че периодът на осцилациите не се променя. Освен това засечени осцилации на един и същ протуберанс на различни височини (различни части от тялото му) също показват една и съща периодичност. Всичко това подкрепя хипотезата, че всеки протуберанс има собствен характерен период на осцилации. Също като при ЛАО, осцилациите с малка амплитуда затихват обикновено след няколко периода [117].

Случаите на протуберанси, при които не се наблюдават осцилации може да се дължат на малка амплитуда на скоростта или на нейната компонента по лъча на зрение, на осцилиране извън периода на наблюдение, зашумяване на сигнала от излъчена или погълната светлина от други плазмени елементи по лъча на зрение.

Периодичните осцилации на скоростта и интензитета на влакната се наблюдават и на ниво фина структура. Най-вероятните вътрешни движения на протуберансовата плазма са така наречените *kink* и *sausage modes* (Фигура 1.14) [71]. При наблюдения на влакна върху слънчевия диск, бързите *kink modes*, произвеждащи радиални осцилации доминират над Алфеновите вълни, които се разпределят хоризонтално по слънчевия диск. Докато при наблюдения на лимба, доплеровите отмествания върху спектралната картина се дължат основно на Алфенови осцилации.

Усукващи движения

По време на съществуването си влакната често претърпяват усукващи движения като симптоми на протичащи дестабилизационни процеси. Важна характеристика на състоянието на МСЛ на едромащабни МП е магнитната спиралност (*helicity*) $H_m = \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} \, dV$. Тя описва предаването на усукването по магнитно въже и по наблюдения може да бъде определена само чрез непреки измервания:



Фигура 1.14: Изменения на формата на протуберансовите нишки: (а) kink mode, (б) sausage mode, (в) Alfvén mode.

$$H_m = (Tw + Wr)\Phi^2, \quad (1.20)$$

където Tw (twist) е броят извивания на линиите на полето около оста на магнитното въже, Wr – мярка за усукването (writhe) на оста магнитното въже около себе си, Φ – магнитния поток в протуберанса.

Превръщането на усукването на МСЛ около магнитното въже (twist) в усукване на оста (writhe) може да създаде усукана устойчива структура [30], но когато усукването на оста (writhe) надхвърли определена критична степен магнитното въже развива kink-неустойчивост [37, 57, 159], която често води до ерупция.

Тъй като основен метод за измерване на спиралността е чрез използване нейната плътност h_m , зависимостта $h_c = \alpha B^2 = \alpha^2 h_m$ (h_c – плътност на електричната спиралност) и Уравнение 1.18 показват физическия смисъл на свойството огледална симетричност на влакната – тя определя знака на плътностите и съответно на магнитната (и електричната) спиралност на протуберансите [49].

Внезапни изчезвания

По време на своето съществуване протуберансите могат да претърпят процеси на внезапно изчезване (Disparition Brisque - DB). Явление, видимо в H_α , за което се смята, че представлява вид ерупция. Наблюдава се при около половината от СП. Изчезванията могат да бележат края на живота на протуберансите или да бъдат само кратковременна промяна, след която влакното се появява повторно на същото място и в същата форма. DB представлява сравнително краткотраен процес – от 10 минути до няколко часа и само в редки случаи до няколко денонощия. Някои влакна претърпяват няколкократно изчезвания [155].

Според физическата си същност внезапните изчезвания се разделят на термични (DBt) и динамични (DBd) [111]. Динамичните представляват класически ерупции на спокойни протуберанси, при които протуберансова плазма се изхвърля в короната в резултат на преструктуриране на магнитното поле на влакното и възникващо магнитно присъединяване [128]. Причина за динамичните изчезвания може да бъде изплуването на нов магнитен поток (поява на нова активна област) в околността на влакното, поради което в повечето случаи те слагат край на съществуването на протуберанса. Динамичните изчезвания по-често се асоциират с изхвърляния на коронална маса и с интензивни геомагнитни бури [153]. При термичните внезапни изчезвания студената протуберансова плазма се нагрива до високи температури, поради нарастващия приток на енергия към тялото на влакото, в следствие на което влакното изчезва в H_α , но увеличава яркостта си в ултравиолетовата и рентгеновата част на спектъра [111]. Често термичните изчезвания са само временни и се наблюдава повторна поява на протуберанса в H_α след изстиване.

При над 70% от влакната, претърпяли внезапно изчезване се наблюдава наличие на точки на твърдетелно въртене ако изчезването е само временно и отсъствие на такива точки когато DB слага край на съществуването [113].

Глава 2

Еруптивни протуберанси

Развитието на различни неустойчивости в области на Слънцето където се заражда или вече съществува протуберанс е неизменно свързано с усилване на едромасшабните и/или вътрешните движения на веществото, които предполагат активирането и/или ерупцията на влакна. Важно е разграничаване между понятията активен и еруптивен протуберанс, чиито смисъл често се преплита.

Според класификацията на Pettit един протуберанс е еруптивен когато целият протуберанс се издига с еднаква скорост (от порядъка на няколко стотин km s^{-1}), която в даден момент рязко нараства, а когато веществото се влива в близък активен център, протуберансът е активен [121]. Подобно разграничение правят и Severny и Khokhlova, чиято класификация се основава на наблюдения на протуберансовите движения [145].

В настоящата дисертация ще се използва терминологията предложена от Gilbert et al. [?], според която активните протуберанси демонстрират забележими движения на вещество, но изхвърляне на вещество не се наблюдава. Съществува голямо разнообразие от видове АП, но при преобладаващата част от тях издигането на протуберанса е последвано от падане обратно на плазмата към слънчевата повърхност.

Еруптивните протуберанси се отличават с голяма радиална (хелиоцентрична) компонента на скоростта в посока обратна на повърхността на Слънцето. При тях се наблюдава откъсване от гравитационното поле на Слънцето на цялото или част от веществото, което ги съставя. В случаите когато само част от веществото напуска Слънцето, останалата част от протуберанса или пада обратно върху повърхността му, или продължава живота си над лимба. Те могат да възникват като спокойни протуберанси или влакна в активни области, които еруптират поради развитие на неустойчивост.

Според използваната класификация определените от Zirin като surge протуберанси попадат в категорията активни, а впръскванията (sprays) и избухващите влакна могат да бъдат както еруптивни, така и активни.

Според изследване проведено от Gilbert et al., характеристиките на двата типа протуберанси (АП и ЕП) като скорост и ускорение се различават значително. На височина над $1.15R_{\odot}$ скоростта на еруптивните протуберанси е по-висока. 75% от изследваните еруптивни протуберанси се движат с положително ускорение, докато при активните такова движение имат едва 25%. Въз основа на изчислената височина на точката, в която част от еруптивния протуберанс се отделя от основното тяло за 12 протуберанса, екипът на Gilbert наблюдава ясно изразен максимум на разпределението на тази точка на височина $1.26R_{\odot}$.

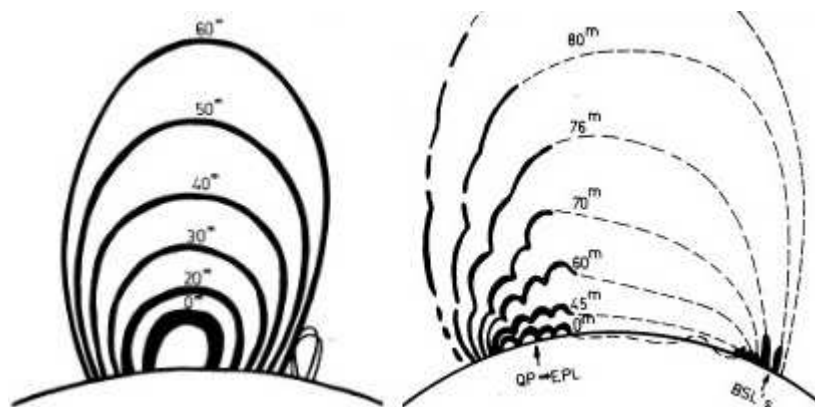
Еруптивните протуберанси са само наблюдателна проява на процесите на ниво МП възникващи в области от Слънцето. Смята се, че те са последици от ерупция на едромасабна магнитна структура, тясно свързана с МИЛ на слънчевото магнитно поле [133]. Студената и плътна протуберансова плазма, намираща се в част от едромасабната магнитна система остава „замразена“, преди и по време на ерупцията и нейното поведение се определя от поведението на силовите линии на магнитната структура ($\beta_{prom} < 1$, т. е. $P_g < P_m$ – Част 1.3.1).

2.1 Видове еруптивни протуберанси

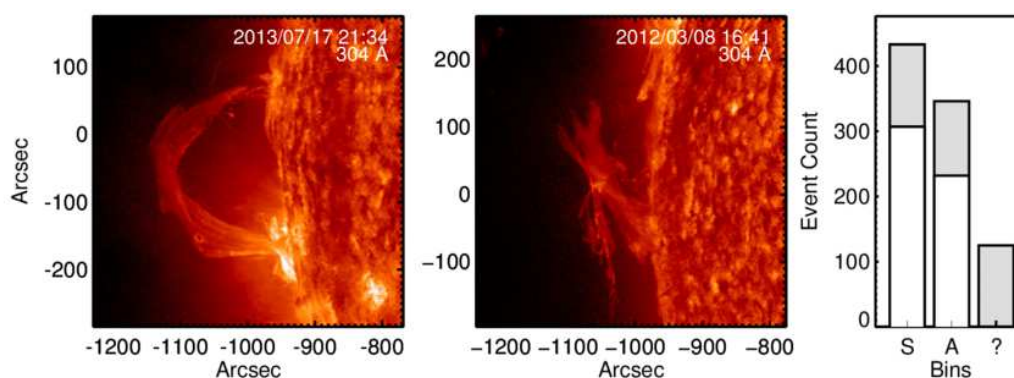
Според своята геометрия и поведение на едромасабната структура по време на ерупция, протуберансите се делят на симетрични и асиметрични (Фигура 2.1) [103]. Симетричните ЕП имат характерна арковидна форма и са съставени от множество фини влакна, често усукани или преплетени помежду си. По време на ерупцията, арката се издига и разширява, като остава видима в H_{α} почти до края на ерупцията, когато бързо избледнява и изчезва. Обикновено симетричните ЕП са разположени в долната част на едромасабна магнитна система на асоциирано с тях изхвърляне на коронална маса [134].

Асиметричните ЕП имат първоначална форма идентична на симетричните, която при началото на ерупцията се нарушава като единият от краката на арката се откъсва от Слънцето. Другият крак на протуберанса остава закотвен за повърхността. В хода на ерупцията, тялото на протуберанса се изправя спрямо лимба като в края ѝ, то е почти перпендикулярно към него, а междуременно магнитните тръби, изграждащи арката, се разсукват. Характерна за този тип еруптивни протуберанси е ясно изразената следеруптивна фаза, по време на която протуберансо-

вото вещество се стича обратно към фотосферата по магнитните тръби на крака, останал закотвен за повърхността.



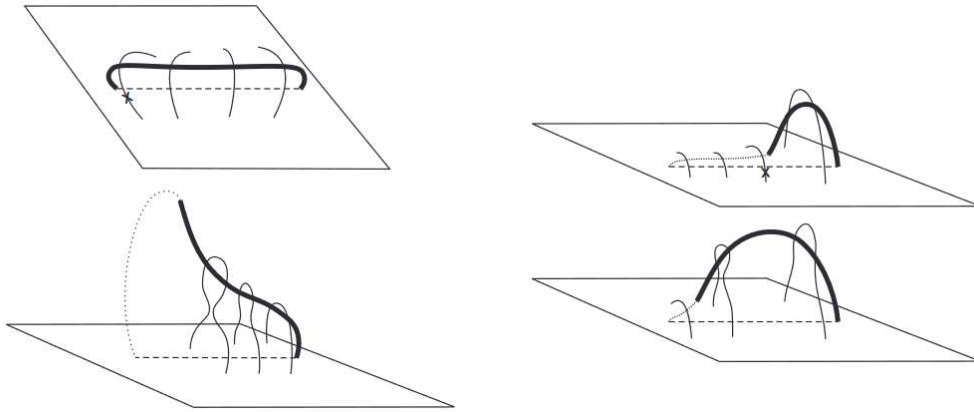
Фигура 2.1: Видове еруптивни протуберанси според поведението на основната протуберансова арка: симетриен ЕП (ляво) и асиметричен ЕП (дясно) [134]



Фигура 2.2: Наблюдателни примери на видовете еруптивни протуберанси: симетриен (ляво) и асиметричен ЕП (в средата). Статистика на разпределението на двата вида протуберанси (дясно): S - симетрични, A - асиметрични, ? - неопределени [103].

От своя страна асиметричните ЕП се разделят на 2 подкласа според поведението на откъсващия се крак (Фигура 2.3): камшик (whipping-like) – активният крак достига до големи височини с камшични движения и

цип (zipping-like) – краят на крака се движи по МИЛ, наподобявайки разкопчаване на цип [92].



Фигура 2.3: Видове асиметрични еруптивни протуберанси: камшик (ляво) и цип (дясно) [92]. Влакната са изобразени с удебелена линия, разположена по МИЛ (с пунктир). С "x" е означено мястото на дестабилизация.

Разделянето на протуберансите на симетрични и асиметрични е широкоизползвано при изследвания на потенциални механизми на ерупция и магнитни конфигурации на ЕП. Смята се, че симетричните ЕП са по-често срещани (48%) от асиметричните (38%) при 14% неопределени (Фигура 2.2 дясно), макар че при ерупции на полярни влакна превес имат асиметричните (45%-39% при 16% неопределени) [103].

2.2 Видове ерупции на протуберанси

Акцентирайки не върху протуберансите, а върху самия еруптивен процес, друга наблюдателна класификация разделя ерупциите в 3 класа – пълна, частична и ограничена (Фигура 2.4), според мястото на магнитното присъединяване в едромасабната магнитна система [40]. Основава се на поведението на веществото предизвикано от магнитната структура, която еруптира, внася смущения в короната и е в състояние да предизвика изхвърляне на коронална маса [91].

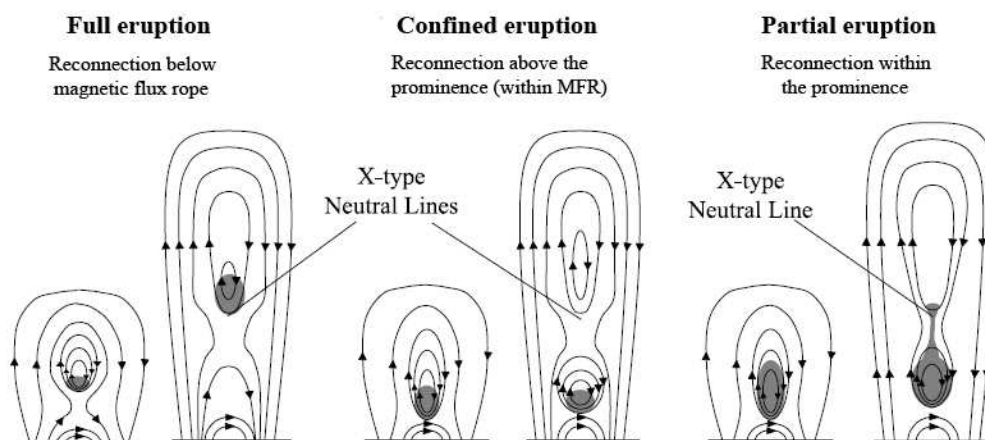
Пълна ерупция се наблюдава когато цялата магнитна структура еруптира, заедно с 90% или повече от прееруптивната маса на влакното (т.е.

масата се откъсва без изтичане или връщане обратно на повърхността). Не е ясно дали ерупция, включваща 100% от масата на влакното е възможна, поради изтичането, наблюдавано основно при ерупции, затова е избрана границата от около 90% за разграничаване на цялостна от частична ерупция. Подобен тип ерупция е резултат от хоризонтално магнитно присъединяване, протичащо под или ниско в магнитната конфигурация, която поддържа протуберанса.

Ерупция на магнитната структура, при която както влакното, така и обкръжаващата го магнитна конфигурация не успеят да се откъснат от гравитационното влияние на Слънцето, се нарича ограничена. В този случай все пак се наблюдава повишена локална динамична активност в части на влакната (напр. нагряване и поява на слънчево избухване [1]). Често развитието на kink-неустойчивост в магнитното въже на протуберанса води до ограничена ерупция [1, 159]. В края на ерупцията се наблюдава изтичане на вещество към повърхността по магнитните силови линии или оставане на вещество в кухините на магнитната структура, които го връщат на по-ниски височини в короната.

Частичните ерупции са по-трудни за наблюдателно определяне и се разделят на две подкатегории [40]. Единият тип частични ерупции се получават когато цялата магнитна структура еруптира без участието на никаква или с малка част ($< 90\%$) от прееруптивната маса на протуберанса. Останалата част или цялата маса се стича обратно към повърхността. Механизмът, отговорен за загубата на маса в този случай е отичането по магнитните силови линии, свързани с фотосферата, което е причината да не се осъществи пълна ерупция. Наблюдава се първоначално повдигане на вещество, последвано от отичане на цялата или част от масата.

При другия тип частични ерупции само горната част на магнитната конфигурация на протуберанса еруптира заедно с едромащабното магнитно въже над нея, в резултат на хоризонтално магнитно проъсединяване в магнитната конфигурация на влакното. Наблюдава се като издигане на плазмата на влакното, последвана от отичане по силовите линии на магнитното поле или връщане на веществото обратно на повърхността. Възможно е и магнитната конфигурация с цялата маса в нея да остане непокътната, в случай, че магнитното присъединяване протича над магнитната конфигурация на протуберанса, в едромащабното магнитно въже над нея.



Фигура 2.4: Видове ерупция на протуберанси според количеството изхвърлено от Слънцето вещество: пълна (ляво), ограничена (средно) и частична (дясно) [40].

2.3 Развитие на еруптивен процес

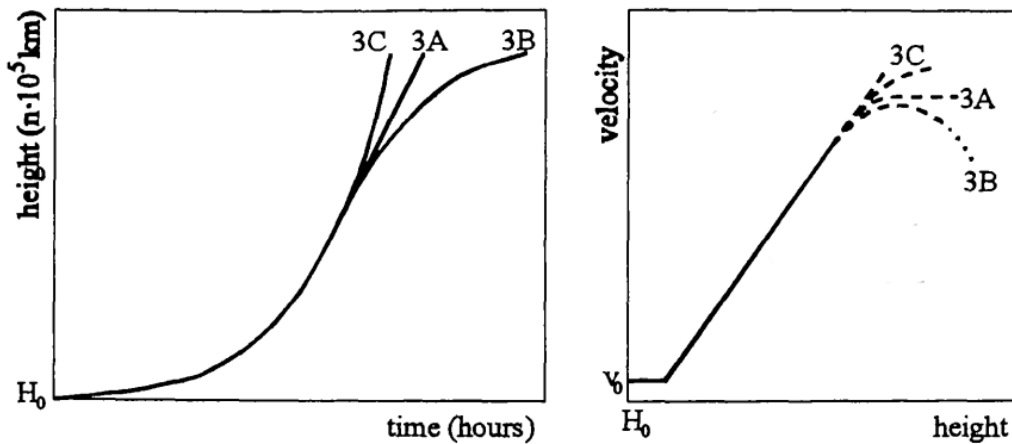
Характерната еволюция на ерупцията на протуберанс преминава през 3 етапа: прееруптивна фаза на активирание, еруптивна фаза на бързо ускорение и еруптивна фаза с постоянна или постепенно нарастваща скорост.

Фазата на активирание се изразява в бавно издигане с почти постоянна скорост от порядъка на $1-10 \text{ km s}^{-1}$ [149, 150, 164] (фаза 1 на Фигура 2.5). Започва с промяна на яркостта (при протуберансите – усилване на блясъка, при влакната – потъмняване). Структурата на протуберансите се трансформира в по-проста. Понякога се наблюдава спирално усукване (twist) при краката на протуберанса [165] или вътрешни движения на плазмата по спираловидни траектории [135]. Едновременно с усукването се наблюдава и разширение на H_{α} линията [105]. На ниво фина структура се наблюдава увеличаване на скоростта на потоците вещество във възлите на протуберанса и движение на възлите към отдалечени един от друг центрове на привличане по нишките [169]. Протуберансът се издига и се разширява, а плазмата изтича от средата на аркадата към двата ѝ крака [36].

Същинската ерупция започва с внезапно ускоряване на протуберанса при достигане на определена критична височина, съизмерима с поло-

вината на разстоянието между стъпките на влакното (фаза 2 на Фигура 2.5). Наблюдава се леко повдигане на цялата едромасабна магнитна система, придружено от смущения на равновесното състояние на магнитното тяло на протуберанса, предизвикани от появата на нов магнитен поток [134]. Възможно е и изтичане на вещество от влакното надолу към хромосферата. Количеството изтичаща маса, нейната скорост и посока на движение зависят от положението на протуберансовата плазма в еруптиращата арка, скоростта на ерупция в момента на изтичане, едромасабната геометрия на арката и формата на нишките, формиращи арката [169]. Колкото по-бавна е ерупцията, толкова по-големи са загубите на вещество от оттичане. По време на фазата на ускорение скоростта v е пропорционална на височината H (Фигура 2.5b).

Възможните сценарии за финал на ерупцията след етапа на бързо ускорение са три (Фигура 2.5) [164]. Протуберансовата арка често продължава да се издига с постоянна скорост (3А). Понякога веществото продължава да се ускорява до края на ерупцията (3С), а в други случаи край на ерупцията е белязан от фаза на движение на веществото с намаляващо ускорение (3В). От 23 изследвани ЕП, 9 приключват ерупциите с изигане с постоянна скорост, 8 – с нарастващо ускорение и едва 3 с намаляващо ускорение (останалите 3 случая са неопределени) [164].



Фигура 2.5: Възможни разврздки при ерупция на протуберанс след фазата на бързо ускорение – издигане с постоянна скорост (3А), издигане с постоянна скорост, последвано от намаляващо ускорение (3В) и издигане с нарастващо ускорение (3С) [164].

Ерупцията на активните протуберанси протича по сходен начин като тази на спокойните, макар и по-бързо поради по-големите градиенти и налягането на магнитното поле в активните области.

2.4 Връзка с други прояви на слънчева активност

Слънчевите ерупции (избухвания, ИКМ, ЕП и др.) са демонстрация на слънчевата активност. Смята се, че различните активни процеси представляват различни проявления на единен едромасщабен еруптивен процес, който се осъществява на ниво магнитно поле. Това обяснява високата степен на асоциираност между различните явления.

В най-общ смисъл слънчевите избухвания се свързват с внезапно освобождаване на магнитна енергия вследствие на магнитно присъединяване, свързано с повишаване на яркостта на излъчване в целият електромагнитен спектър за време от порядъка на няколко минути. Често те ускоряват заредени частици и водят до изхвърляне на плазма и магнитен поток към слънчевия вятър.

Едни от най-лесните за наблюдение активни образувания са хромосферните избухвания. Видими са в H_{α} и свидетелстват за връзка между дълбоко закотвени смущения, които понякога се проявяват на големи разстояния по слънчевата повърхност [132]. Ако приемем за избухване всяка повишена емисия в H_{α} и рентгеновата област, се оказва, че 41% от всички ерупции на протуберанси са асоциирани със слънчеви избухвания [70], като връзката е по-силна при ЕП в активни области (95% от случаите), отколкото при ерупция на спокойни влакна (28%). Друго изследване, което включва дори по-голяма извадка от събития, свързва 96% от ЕП с избухвания [172].

Изхвърлянията на коронална маса (ИКМ) представляват промяна в структурата на короната, включваща поява и изхвърляне на самостоятелно ярко образувание със скорост от порядъка на $20\text{--}2500 \text{ km s}^{-1}$ (долна граница – малко по-ниска от скоростта на звука в короната и горна граница, надвишаваща Алфвеновата скорост) [14, 170].

Широкоразпространено е схващането, че в ядрото си изхвърлянията на коронално вещество съдържат протуберанс [59], въпреки че съществуват и изследвания, които оспорват това твърдение [60]. Безспорна е обаче връзката между двете явления, макар и без да има категорично мнение кое от двете явления е прогенитор на другото.

В едно от първите подробни изследвания на тази връзка (по наблю-

дения от космическата обсерватория Skylab) се твърди, че 70% от ИКМ, които могат да се асоциират с близка форма на активност са свързани с ЕП или с внезапно изчезващи влакна [114]. Ако обаче потърсим връзката при ЕП, достигащи височини на $0.2R_{\odot}$, процентът скача до 100%. Смята се, че свързаните с ЕП ИКМ са по-бавни от тези, асоциирани със слънчеви избухвания (Hildner 1977; MacQueen and Fisher 1983), а и степента им на асоциация с радиобури от тип II (от метровия диапазон) е по-ниска (Gosling et al. 1976).

Нови данни подкрепят изводите като някои стигат дори до по-големи стойности за връзката между двете явления: от изследваните ЕП, ИКМ се наблюдават в 56% [70], 80% [140] или 83% [46] от случаите. Изследване, което свързва 92% от протуберансите с ИКМ отбелязва, че при останалите 8% от случаите се наблюдават слаби движения на вещество, ограничени от близкоразположени коронални стримери [58]. Около половината от ЕП в активни области се асоциират с ИКМ [172].

От различните видове протуберанси, връзката с ИКМ е най-силна при еруптивните (94%), докато при активните тази връзка е далеч по-слаба (едва 46%). Освен това при 76% от короналните изхвърляния на маса, асоциирани с ЕП е наблюдаван протуберансов материал, а при асоциираните с активни протуберанси коронални изхвърляния – в 17% от случаите [40].

2.5 Космическо време

Понятието космическо време е използвано за първи път през 50-те години [11], а през 1995 г. US National Space Weather Program Strategic Plan приема и съвременното определение - условията на Слънцето, слънчевия вятър, магнитосферата, йоносферата и термосферата, които имат влияние върху работата и ефективността на космически и наземни технологии и могат да въздействат върху човешкия живот и здраве. Съвременното общество е силно уязвимо от промени и смущения, възникващи извън пределите на нашата планета, в частност, еруптивните явления на Слънцето.

Разнообразните прояви на еруптивни явления на Слънцето имат основна роля в определянето на космическото време. По-малките и слаби ерупции са източници на слънчев вятър [158], чрез който мощните явления се разпространяват из хелиосферата и оказват влияние върху земната магнитосфера [48, 114]. Независимо от своята сила и мащаб, ерупциите играят ключова роля в изследването на структурата и динамиката на слънчевата атмосфера [61].

Слънчевите ерупции често са причина за ускоряване на потоци от електрони, неутрони, протони, до почти релативистки енергии, обединени под понятието слънчеви енергетични частици (СЕЧ). Най-бързите частици достигат Земята едва няколко минути след напускане на Слънцето и са в състояние да нанесат щети на технологични системи както на Земята, така и в околоземното пространство:

- **Магнитосфера:** Високоенергетичните частици, заключени в земното МП могат да предизвикат значителни ефекти върху космическите кораби. Макар и да се очаква, че такива неизправности могат да се наблюдават независимо от местоположението, се забелязва, че голяма част от тях възникват в южната полусфера над аномалната област в южните части на Атлантическия океан, където земното МП е най-слабо и СЕЧ имат най-добър достъп до космически сонди на ниски орбити (проникват до 300–1000 км височина) [5].

СЕЧ, произхождащи от активни явления на Слънцето могат да причинят проблеми с електрониката на космически системи. Електрони със средновисоки енергии по време на слънчеви бури могат да причинят повърхностно зареждане на спътник до няколко киловолта [127].

Освен заплахата за технологиите в Космоса, СЕЧ представляват радиационен риск и за космонавтите на космически мисии. Полети на географски ширини над 50° и над 10 км височина се считат за такива с повишен риск.

- **Йоносфера:** Сателитните навигационни системи (GPS, Galileo и др.) функционират като предават радиовълни от изкуствени спътници към наземни приемници. Благодарение на сигналите от няколко сателита е възможно изчисляването на местоположението с голяма точност. При преминаването и през йоносферата тези сигнали се пречупват и забавят, особено когато преминават през области на полярни сияния със силни токове (auroral currents), където изобилстват силни заряди [85]. Докато повечето неизправности, породени от СЕЧ, по космическите кораби могат да се избегнат при проектирането на кораба, заплахата като тази за сателитите могат да бъдат избегнати само чрез точно определяне на състоянието на йоносферата и моделирането на влиянието на различните състояния върху предаването на радио сигнали.
- **Атмосфера:** В средната атмосфера, СЕЧ значително влияят върху химичните процеси за образуване на различни азотни съединения [144]. Установена е връзката между нарастването на броя на

протони и глобалната концентрация на азотни окиси в атмосферата.

Наблюдава се и влияние на геомагнитната активност върху височината на спътниците на ниска земна орбита [52].

Тъй като количеството слънчева енергия, достигащо Земята се променя, е нормално очакването за дългопериодични промени в едромасщабния климат на Земята. Промяната в енергията, достигаща до Земята може да влияе на облачността, количеството вулканичен прах и аерозоли в атмосферата. Промяната в количеството енергия, отделена от Земята се свързва с промяната в количествата парникови газове в атмосферата [127].

- **Земна повърхност:** Силните токове в йоносферата могат да индуцират токове в дълги проводящи системи по земната повърхност като мрежи за пренос на електрическа енергия, нефтени, газопроводни, телекомуникационни кабели и ЖП линии. При електрическите мрежи тези токове претоварват трансформаторите, което води до увеличаване на възбудените токове (excitation currents) и от там до увеличена консумация на ток, флуктуации в напрежението и постоянна повреда на трансформаторите [127].

В заровените тръбни системи, геомагнитно индуцираните токове водят до корозия [10]. Телекомуникационни устройства могат да претърпят свръхнапрежение. Въпреки че за оптичните кабели няма подобни рискове, те често се полагат паралелно в близост до метални жици и са косвено засегнати.

Същевременно, достигайки Земята, СЕЧ водят до производството на нитрати, които се утаяват в полярните шапки вследствие на йонизация на полярната атмосфера. Предизвикват процеси в атмосферата, които водят до последици като изчерпването на озона в горната стратосфера над полюсите.

Важно е да се отбележи, че не всяко мощно еруптивно явление е придружено от силни потоци СЕЧ. Наистина мощните явления не се случват с голяма честота. За периода на регистрация от 1976 г. до днес са отчетени само 3 много силни явления, свързани с големи потоци от СЕЧ: 19 октомври 1989 г., 24 март 1991 г. и 4 ноември 2001 г. [142].

Рядко срещани са изследванията свързващи протуберанси със слънчеви енергетични частици и обикновено представят единични случаи, а не статистическата значимост на степента на асоциираност. За първи път подобно изследване сочи ерупция на влакно от 1 септември 1959 г. като

причина за мощно събитие, йонизиращо части от йоносферата над полярните шапки на Земята (polar cap absorption event) [62, 151]. Описани са и други изолирани събития [45, 73, 74, 76], сред които прави впечатление това от 23 април 1979 г., което се счита за един от най-убедителните примери за СЕЧ, възбудени от ерупция на протуберанс [138].

Връзката с влакната е още по-ясно изразена когато се разглеждат техните внезапни изчезвания. Внезапно изчезване на влакно, намиращо се в центъра на слънчевия диск на 23 август 1978 г. пък се свързва с началото на внезапна геомагнитна буря на 27 август [25]. Други междупланетни явления също са приписани на ДВ на протуберанси [12, 54, 76, 138].

Прогнозирането на космическото време все още представлява предизвикателство за учените. Достоверността и точността на прогнозите, дори за големи и мощни явления не са големи. Еруптивните явления възникват до голяма степен спонтанно и универсален знак за предстоящо избухване, неговото местоположение, време и сила все още не е намерен.

Глава 3

Осцилации на скоростите на еруптивни протуберанси

Смята се, че ерупцията не превръща протуберансите в отделен клас явления, а по-скоро се разглежда като възможен сценарий за временна или крайна фаза от еволюцията на един протуберанс. Въпреки това ролята на ЕП в изучаването на взаимодействието на магнитни структури и магнитни полета в слънчевата корона е безспорна. Изследването им не е ново направление в слънчевата физика, но големият обем и високото качество на наблюдателния материал получен през последните десетилетия дава възможност за проучване на незабелязани до момента детайли от тяхното поведение. Именно с такава стойност се откроява и настоящото изследване, което демонстрира една новооткрита особеност в разпространението на протуберансовото вещество във височина по време на ерупция.

3.1 Наблюдателни данни

Като основен източник на наблюдателни данни са избрани два космически телескопа. Освен високата си прецизност и непрекъснатост в наблюденията, те осигуряват възможност за проследяване на ерупцията на влакна във височина до $30R_{\odot}$.

Solar Dynamics Observatory (SDO)

Solar Dynamics Observatory (SDO) е космическа мисия на NASA, наблюдаваща Слънцето [120]. Изведена в орбита през 2010 г., нейна основна задача е изучаването на слънчевата активност и космическото време. SDO е космически кораб с три основни инструмента – HMI, EVE и AIA.

Atmospheric Imaging Assembly (AIA) се използва за наблюдения на протуберанси. Представлява съвкупност от 4 телескопа, които наблюдават както повърхността, така и атмосферата на Слънцето, правейки изображения на 10 на различни дължини на вълната (7 в EUV, 2 в ултравиолетовия диапазон, 1 във видимата област) на всеки 12 секунди (Таблица 3.1). Регистрира изображения на целия диск, като има поле над $1.3R_{\odot}$ и пространствена разделителна способност $\sim 1.5''$ [86].

За проследяване поведението на протуберанси при ерупция за са използвани данни от инструмента AIA в линията HeII 304 Å, регистрирани през период от около 5 минути. Короналното обкръжение на влакната инспектираме по наблюдения с дължина на вълната FeXIV 211 Å.

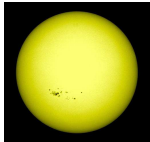
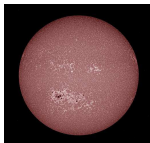
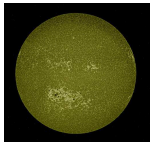


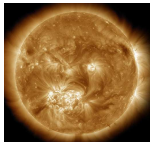
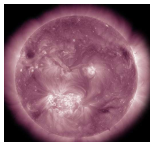
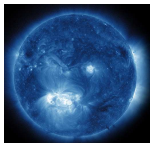
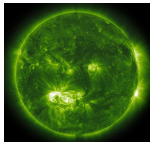
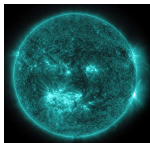
Solar and Heliospheric Observatory (SOHO)

SOHO (Solar & Heliospheric Observatory) е космическа мисия на ESA и NASA, изучаваща Слънцето от неговото ядро до най-външните слоеве на короната и слънчевия вятър. Апаратът, изстрелян на 2 декември 1995 г. първоначално има двугодишна мисия, но продължава да функционира и до днес [24].

Инструментите на борда на SOHO, както и експериментите, които се извършват с тях могат да бъдат разделени на 3 основни групи според основните си предмети на изследване: хелиосейсмология (GOLF, VIRGO, MDI), слънчева атмосфера (SUMER, CDS, EIT, UVCS, LASCO и SWAN) и слънчев вятър (CELIAS, COSTEP, ERNE).

Като основен източник на наблюдателни данни за настоящата задача използвахме инструмента LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph), който се състои от 3 коронографа с различно поле. Първият коронограф (т. нар. C1) има Фабри-Перо интерферометър и наблюдава областта от 1.1 до $3R_{\odot}$ (функционира до юни 1998 г.). C2 и C3 са коронографи, наблюдаващи в бяла светлина и до днес с обхват, съответно, от 2 до $6R_{\odot}$ и от 3.7 до $32R_{\odot}$. Средното им времево разрешение е ~ 12 минути. Основните явления, изучавани от коронографите на LASCO са ИКМ (тяхната еволюция, разпространение, както и трансферът на маса и енергия в слънчевата корона), но в обсега им често попадат и най-високите части на еруптиращи протуберанси.

Таблица 3.1: Различните слоеве на слънчевата атмосфера, видими през различните филтри на инструмента AIA.

λ [\AA]	T [K]	Излъчващи йони	Област от атмосферата	Изображение
4500	6 000	континуум	фотосфера	
1700	4 500	континуум	област на температурния минимум, фотосфера	
1600	10 000	C IV и континуум	горна фотосфера, преходна област	
304	50 000	He II	хромосфера, преходна област, влакна	
171	0.6×10^6	Fe IX	спокойна корона, горна част на преходната област	
193	1×10^6	Fe XII, Fe XXIV	корона и гореща плазма в избухвания	
211	2×10^6	Fe XIV	АО	
335	2.5×10^6	Fe XVI	АО	
94	6×10^6	Fe XVIII	избухвания	
131	10×10^6	Fe VIII, Fe XX, Fe XXIII	избухвания	

3.2 Обработка и анализ

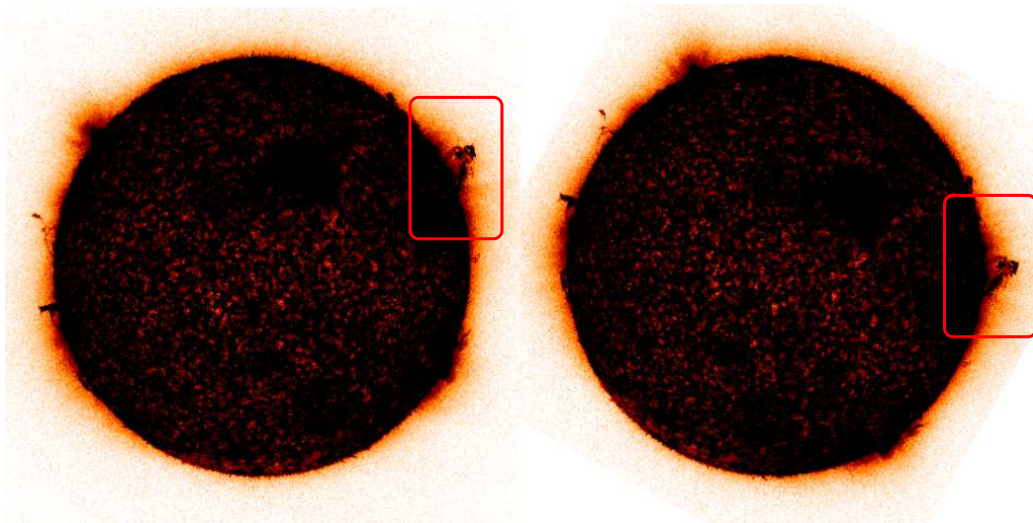
Обработката на наблюденията и изследване на кинематичните криви на ЕП е осъществена със специално изработена програма, основана на процедури, включени в IDL-базирания продукт SolarSoftware [7], който осигурява среда за програмиране и анализ на данни от редица космически обсерватории. Измерването на кинематичните характеристики на ЕП изисква точното определяне на позицията на най-високата част от протуберансовите примки на отделните изображения и проследяване на нейното поведение във времето.

Първоначалната обработка на данните се изразява в премахване на ефектите от дефектирали пиксели, корекции за премахване на влиянието на топлинния шум и космическите лъчи върху изображението и разделяне на плоски полета.

Преди началото на същинското измерване, изображенията се представят по възможно най-удобния за потребителя начин – избират се подходящи цвятова гама и размер, както и диапазон от интензивности, тъй като различната плътност на веществото в различните части на протуберансите, а и във всеки отделен протуберанс, изискват възможност за подчертаване на някои по-слабо излъчващи структури (Фигура 3.1 ляво).

Следва ротация за ориентиране на основната ос на изследвания протуберанс по хоризонталната ос на изображението (Фигура 3.1 дясно). Тъй като изборът на оста на разпространение на всеки протуберанс става ръчно, а това дава възможност за допускане на неточности, програмата обработва освен сигнала от избраната ос и този от околните 6 реда и построява осреднен профил на сигнала – изменение на сигнала на всеки пиксел по оста от центъра на Слънцето до края на изображението (Фигура 3.2). Определят се границите на слънчевия лимб и на фоновия сигнал, и като част от тялото на протуберанса се възприемат само точките, чийто сигнал надвишава 3 пъти стандартното отклонение (σ) при определяне на фона. Това допускане е съгласно статистическото правило, че с достоверност 99,7%, стойността на случайна величина при нормално разпределение принадлежи на интервала $[\bar{x} - 3\sigma, \bar{x} + 3\sigma]$ (едно събитие се счита за практически невъзможно, ако се намира извън посочения интервал), т. е. за точките от графиката със сигнал $S > \bar{x} + 3\sigma$ можем предположим, че не се дължат на сигнала от фона. От тях потребителят избира най-отдалечената от центъра на Слънцето точка от протуберансовото тяло и се оценява както нейната височина над лимба, така и стойност за грешката при измерването.

Определената по този метод най-висока точка от основната ос на протуберанс се визуализира върху изображението и потребителят има въз-



Фигура 3.1: Изображения (AIA 304 Å) представени в обърнати цветове и потъмнени за по-голям контраст на протуберансовото тяло с фоновия сигнал. Вляво е изображението, претърпяло първоначална обработка, а вдясно – последвалата ротация за хоризонтиране на основната ос на разпоространение на изследвания протуберанс (ограден в червено).

можност да направи проверка на изходните данни от алгоритъма.

Този метод позволява по-точно определяне на най-високата дифузна част на протуберансите спрямо останалите използвани за тази цел методи, намалява възможностите за субективност при определянето ѝ и дава математическа оценка на допуснатите неточности.

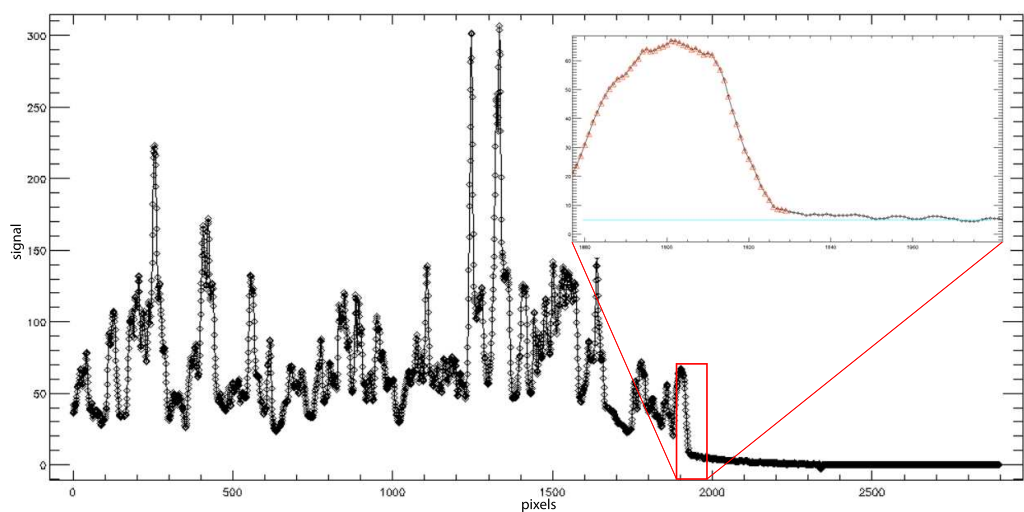
В много случаи като последна фаза от ерупцията на протуберанс се наблюдава превръщането му в ядро на ИКМ и издигането продължава далеч извън зрителното поле на инструментна AIA (вж. Секция 2.4). Тази заключителна част от ерупцията може да бъде проследена по данни от коронографите на инструмента LASCO. Добра възможност за продължаване на кинематичния профил на ерупциите на височини $> 0.6R_{\odot}$ над лимба дава интерактивният инструмент StereoCat¹. Въпреки че инструментът предлага възможност за триизмерно изследване на кинематиката на ИКМ чрез комбинация от наблюдения от коронографите на SOHO и STEREO A и B, такива не са включени дисертацията, тъй като само малка част от изследваните ЕП, които достигат до тези височини, са

¹<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/analysis/stereo/>

наблюдавани в период на добра видимост едновременно от повече от един от посочените космически телескопи. Чрез StereoCat са измерени средни скорости на разпространение и изменението на височината на протуберансите във времето в зрителните полета на LASCO C2 и C3.

3.3 Резултати

Изследването на поведението на протуберанси по време на ерупция обхваща 41 случая. Пълен списък, включващ техните основни характеристики, данни за асоциираните с тях явления и разделянето им в различни категории е поместен в Таблица А.1 в Приложение А. Всички изследвани ерупции са наблюдавани само на слънчевия лимб, кинематичните характеристики на влакна върху диска на Слънцето не са обект на настоящата дисертация. Подбрани са събития от различни години след началото на мисията SDO (в периода 2010–2017 г.) с цел включване на събития, които от една страна нямат връзка помежду си, но от друга, да се включат и такива, асоциирани със сходни активни проявления на магнитното поле на Слънцето или етапи от слънчевия цикъл.



Фигура 3.2: Графичен вид на сигнала по хоризонтална ос между центъра на Слънцето и оста на разпространение на ЕП. В мащаб е представена част от същата графика, на която алгоритъмът е обозначил значещите точки от протуберанса.

В Таблица А.1 е описан началният час на периода на измервания в съответния инструмент, в който протуберансът е наблюдаван. В много случаи протуберансите се появяват часове или дни по-рано, но изследването тук не обхваща периодът преди активация на ЕП. За асоциирането на протуберансите с активни области са използвани както идентификацията в SolarMonitor², така и наблюденията от инструмента AIA на дължини на вълните 1600 Å, 1700 Å и 4500 Å. По тези източници е установено, че 14/41 протуберанса (34%) са свързани с АО, докато за останалите 27 (66%) такава асоциация не е наблюдавана. За свързването на ЕП с ИКМ са използвани данни от каталозите: SOHO LASCO CME Catalog³ [47] и AIA Filament Eruption Catalog⁴ [103]. Последният е каталог на автоматично детектирани ЕП, наблюдавани от AIA в периода април 2010 – октомври 2014 г., съдържащ близо 980 случая. Въпреки това, настоящата извадка съдържа 31 ЕП от същия период (без да има претенции за пълнота), от които само 14 са включени в каталога. От разглежданите тук 41 ЕП, 71% са свързани с ИКМ.

Информацията в последните 4 колони на Таблица А.1 е определена по наблюдения. Диференцирането на протуберансите по тип (Фигура 3.3) е свързано с магнитните инверсни линии, върху които се разполагат (вж. Секция 1.3.1) – протуберанси, разположени в активни области (ПАО), протуберанси, разположени между две съседни активни области (ПМАО), протуберанси в спокойни области (ПСО) и такива в полярните зони (ПП). Някои автори включват и клас трансекваториални протуберанси при подобно разделение, които са изключително редки, но, така или иначе, в настоящата извадка такива не фигурират. Групата от представени 41 протуберанса се състои от 20% ПАО (8/41), 17 ПСО (41%), 15% или 6 случая на ПМАО и 24% (10/41) ПП.

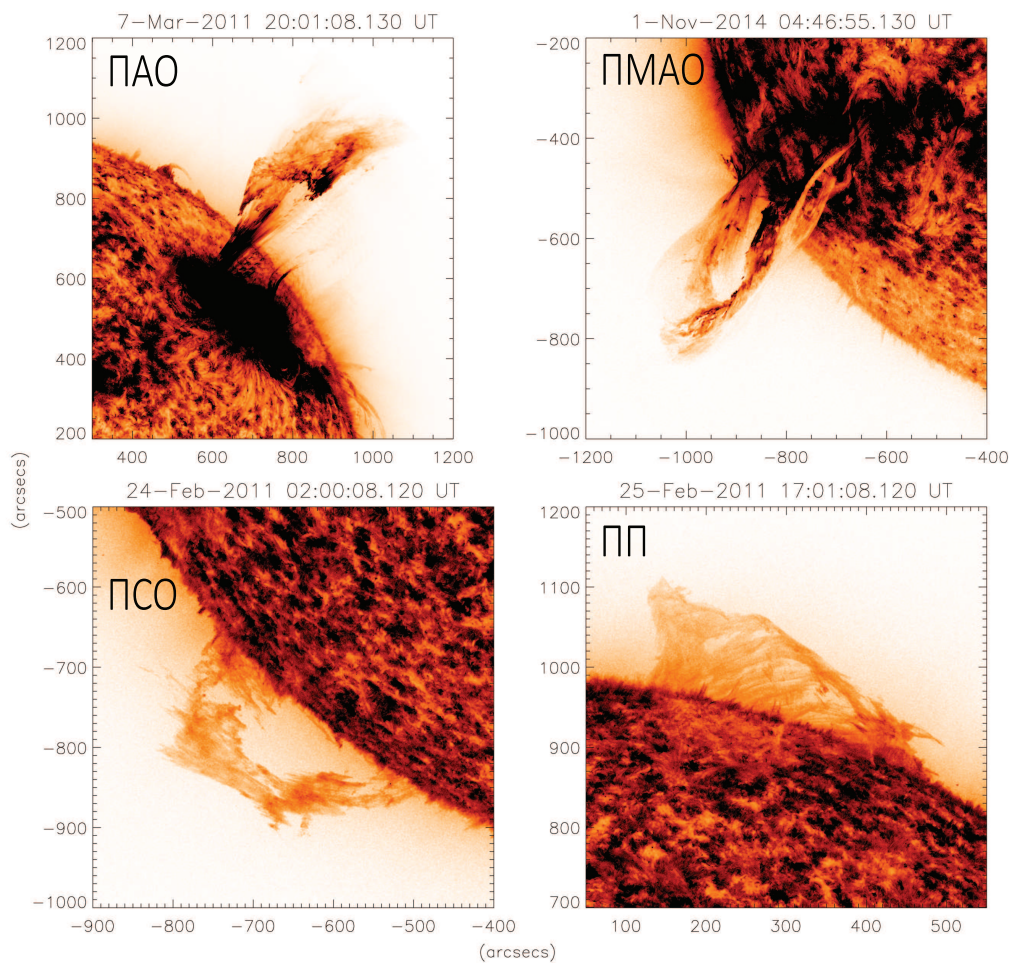
Протуберансите са разделени още според хелиографската ширина, на която са наблюдавани. Макар че някои автори използват термина полярни протуберанси за такива, наблюдавани по границите на полярните коронални дупки, в случая приемаме за полярни (ППШ) тези, формирани на средна ширина $> 50^\circ$, а образуваните в областите $< 50^\circ$ се определят като регистрирани на средни хелиографски ширини (СПШ). Границата от 50° е взаймствана от други изследвания (напр. [103]). Съотношението в изследваната група е 76–24% в полза на средните ширини.

Видът на ЕП (симетричен или асиметричен) е определен спрямо тяхната геометрия (вж. Секция 2.1), като двата класа са почти по равно

²<https://solarmonitor.org/>

³https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html

⁴<http://aia.cfa.harvard.edu/filament/>



Фигура 3.3: Примери за различните типове ЕП – протуберанси в активни области (ПАО), протуберанси между активни области (ПМАО), протуберанси в спокойни области (ПСО) и полярни протуберанси (ПП).

представени с леко превъзходство на асиметричните (46–54%), а видът на ерупцията (пълна, частична или ограничена) – според количеството протуберансово вещество напускащо гравитационното поле на Слънцето (вж. Секция 2.2). Пълните и частичните ерупции, включени в извадката са по равен брой ($2 \times 37\%$) и се допълват от 11 случая на ограничена ерупция (26%).

Разпределението на видовете протуберанси по категории е обобщено в Таблица 3.2.

Таблица 3.2: Обобщение на видовете изследвани ЕП по категории.

Характеристики	Категории	Типове протуберанси				
		Всички	ПАО	ПМАО	ПСО	ПП
Асоциирани АО	Да	14	8	6	0	0
	Не	27	0	0	17	10
ИКМ	Да	29	5	5	12	7
	Не	12	3	1	5	3
Локация	СШ	31	8	6	17	0
	ПШ	10	0	0	0	10
Симетрия	Симетричен	19	4	5	6	4
	Асиметричен	22	4	1	11	6
Вид ерупция	Пълна	15	3	4	6	2
	Частична	15	2	1	6	6
	Ограничена	11	3	1	5	2
Видими в LASCO	само в С2	3	0	1	2	0
	в С2 и С3	7	2	0	4	1

Настоящото изследване разглежда колебания на скоростите на издигане на протуберансовото вещество по време на ерупция. Подобни осцилаторни движения при ЕП не са докладвани преди. Известни са няколко сходни изследвания, разглеждащи разпространението на ИКМ, които включват както единични случаи [110], така и извадки от събития [79, 146].

Анализът на осцилациите е направен по построените профили на ЕП височина–време $h(t)$ и скорост–време $v(t)$. Височината h (както и абсолютната грешка) в различните моменти от време е измерена пряко по описаният в Секция 3.2 начин. Моментната скорост на ерупциите е определена по данните от две последователни измервания на височината на протуберанса във времето:

$$v_i = \left(\frac{\Delta h}{\Delta t} \right)_i = \frac{h_{i+1} - h_i}{t_{i+1} - t_i}, \quad (3.1)$$

като височината h_i съответстваща на дадена моментна скорост v_i е $h = (h_i + h_{i+1})/2$. Тъй като скоростта се отчита непряко относителната грешка при измерването на скоростта зависи от грешката при измерване на височината и тази при отчитане на времето:

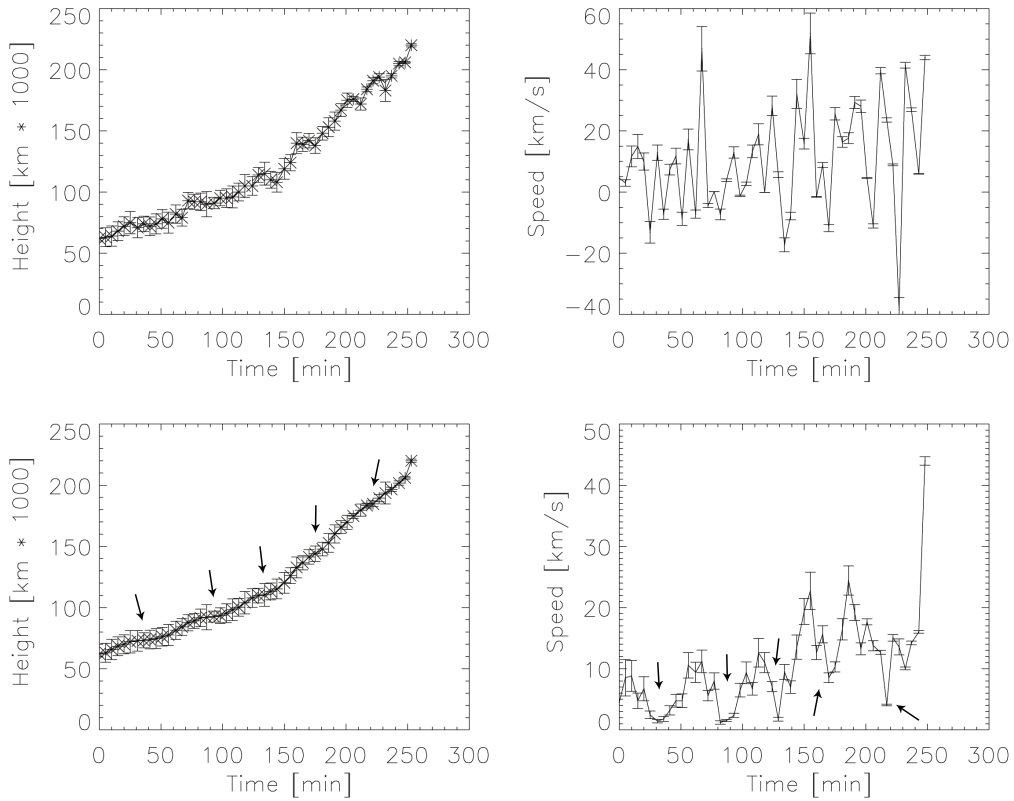
$$\frac{\Delta v_i}{v_i} = \frac{\Delta h_{i+1}}{h_{i+1}} + \frac{\Delta t_{i+1}}{t_{i+1}} + \frac{\Delta h_i}{h_i} + \frac{\Delta t_i}{t_i}. \quad (3.2)$$

В Уравнение 3.2 означенията Δv , Δh и Δt са използвани в смисъл на абсолютна грешка, а не на интервал от стойности.

Освен отчитането на точността на използваните величини, са въведени няколко допълнителни критерия за по-голяма достоверност на получените резултати. С цел избягване на фалшиви пикове дори след изглаждане на данните, приемаме, че отклонение от разпределението на височината и скоростта във времето е достоверно само ако е забележимо едновременно и на двете графики и продължава на повече от 2 последователни кадъра (> 15 минути). Всичко това е придружено и от визуална инспекция на изображенията на ерупцията за изключване възможността за влияние на някои малки вътрешни движения на плазмата от протуберансовата примка, усукване или хоризонтално движение на тялото на влакното.

Пример за описаната процедура са графиките височина–време $h(t)$ и скорост–време $v(t)$ на протуберансът от 2010/08/07 показани на Фигура 3.4. Формиран на 2010/08/04 около 03:00 UT като малък спокоен протуберанс на западния лимб, три дни по-късно той еруптира, изхвърляйки част от веществото си в хелиосферата. Протуберансът се издига на височина 220 000 km над лимба, след което напуска зрителното поле на инструмента AIA (Фигура 3.5). Средната скорост на издигане на веществото е едва 16 km s^{-1} .

Така описаната процедура е приложена на пълния списък с 41 протуберанса. След изглаждане на профилите при 7 от протуберансите, колебания в разпространението не могат еднозначно да се идентифицират. При 14 ЕП отклонения в разпределението на скоростта се забелязват, но те се случват веднъж за цялата ерупция и интервал между тях не може да бъде установен. Категорично могат да бъдат определени 20 случая, при които осцилации се наблюдават повече от веднъж за времето на ерупция и са подходящи за измерване, поради което тези 20 ЕП са избрани за основен обект на настоящото изследване. Списък с тези събития и информация за наблюдаваните осцилации са резюмирани в Таблица 3.3. Продължителността на ерупциите Δt е определена според времето между първото и последното измерване на височината в полето на AIA. В някои случаи ерупцията продължава извън зрителното поле на телескопа, но това не е отразено в стойността на Δt . При различните ЕП се наблюдават различен брой пикове на осцилациите – най-много такива (5) са регистрирани при протуберанс No. 1 (2010/08/07) и протуберанс No. 14 (2011/02/06), 4 броя са пиковете при други два (No. 4 и 12), а останалите 16 събития имат по 2 или 3 върха. Пресметнати са интервалите между пиковете на осцилациите (T_k при $1 \leq k \leq 5$) в минути и височините, на които те са наблюдавани (H_l при $1 \leq l \leq 4$) – в 10^3 km .

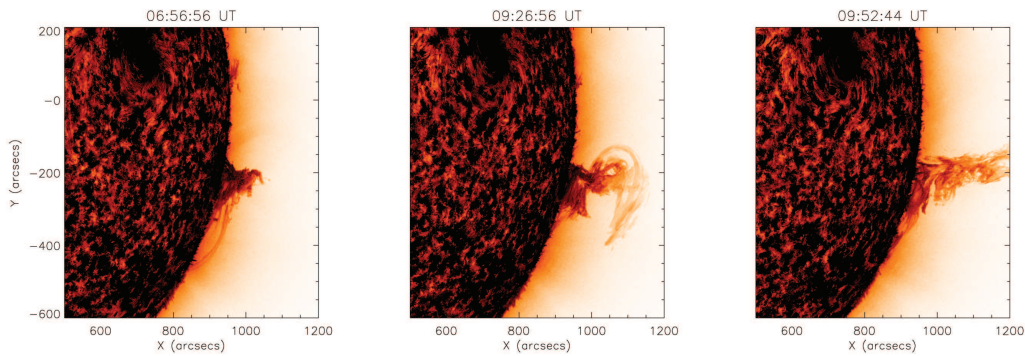


Фигура 3.4: Графики височина–време $h(t)$ (ляво) и скорост–време $v(t)$ (дясно) за ЕП от 2010/08/07 преди (горе) и след (долу) изглаждането на данните. Със стрелки са означени колебанията в графиките след изглаждане.

Определена е максималната височина, която достигат протуберансите в полето на инструмента AIA h_{max} (също в $10^3 km$), както и средната скорост на ЕП по време на ерупцията в $km s^{-1}$:

$$v_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}. \quad (3.3)$$

Някои автори използват други методи за изчисление на средна скорост (напр. $v_{mean} = \frac{v_{max} + v_{min}}{2}$ или $v_{avg} = \frac{h_n - h_1}{t_n - t_1}$). Въпреки това, за целите на изследването най-представителна информация носи средната скорост изчислена според Уравнение 3.3, тъй като при ерупцията на



Фигура 3.5: Кадри от инструмента AIA на ЕП от 2010/08/07.

протуберанси не винаги първата измерена височина е най-ниска $h_1 < h_i$, както и последната не винаги е максимална $h_n > h_i$ при $1 \leq i \leq n$. Моментните скорости в различните етапи на ерупцията варират в широк диапазон и тяхното осредняване носи повече информация за различните стойности, отколкото използването само на граничните (v_{max} и v_{min}).

На Фигура 3.6 е представен още един от ЕП (No. 21 от Таблица 3.3), при които се наблюдават осцилации на скоростта. Вижда се, че освен профилите височина–време $h(t)$ и скорост–време $v(t)$, колебанията се открояват и на диаграмата скорост–височина $v(h)$. Графиките обхващат втората ерупция на протуберансът от 2011/05/31, тъй като ден по-рано той претърпява и друга активация. При първата ерупция, която продължава по-малко от 60 минути, е определено само едно отклонение на скоростта. ЕП е спокоен, няма асоциирана АО, разположен на средни ширини и изхвърля част от веществото си, образувайки ИКМ. Повторната му ерупция продължава близо 4 часа, като в нейния край веществото достига височина $h_{max} = 270 \times 10^3$ km. Средната скорост на ерупцията е 11 km s^{-1} и е означена върху графиките.

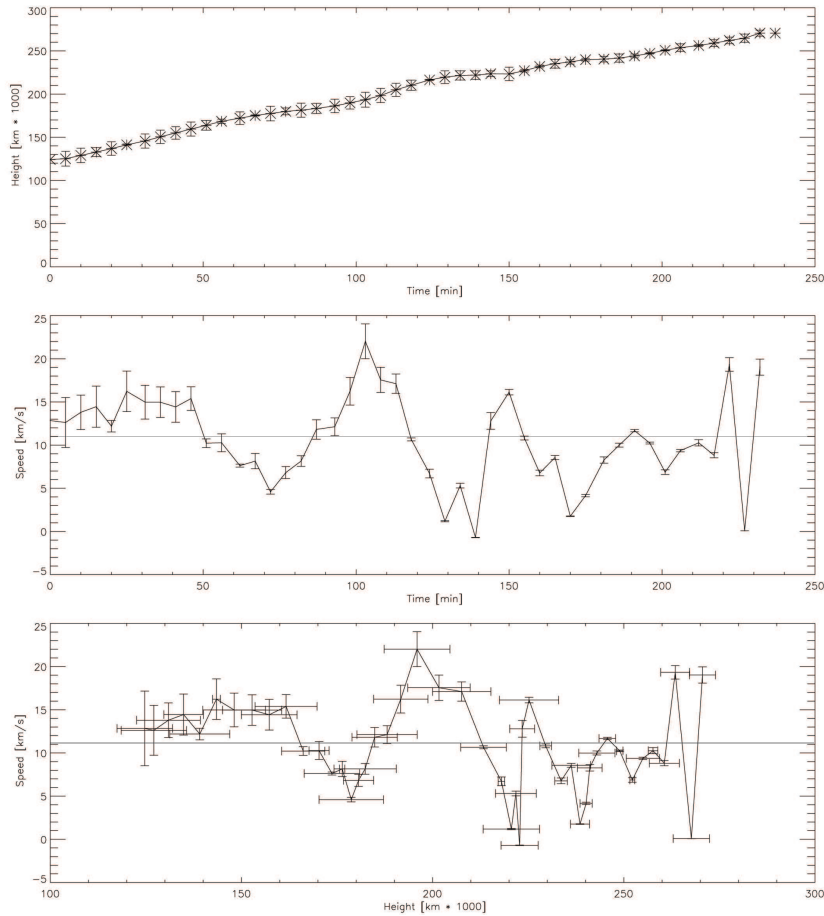
От измерените времеви интервали между осцилациите може да се направи заключението, че те не са периодични. Стойностите варират между 31 и 244 минути, като наблюдаваното при ИКМ нарастване на интервалите във височина [146] се наблюдава при едва 3 ЕП. Най-често продължителността на времето между осцилациите е 50–100 минути, но не са рядкост и такива с продължителност 0–50 минути или 100–150 минути (Фигура 3.7 ляво). По-продължителните отстояния (< 150 минути) са по-скоро спорадични. От протуберансите, при които осцилации на скоростта изобщо не са регистрирани, в 2/7 случая продължителността на

Таблица 3.3: Списък на протуберансите, за които е измерен интервал между осцилациите. Запазена е номерацията на протуберансите от Таблица А.1 в Приложение А. Всички времена и интервали са в минути, а всички измерени височини – в 10^3 km . Средната скорост е в km s^{-1} .

No.	Дата гг/мм/дд	Δt	Интервали				Височини					v_{cp}	h_{max}
			T_1	T_2	T_3	T_4	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5		
1	10/08/07	253	57	51	37	41	74	93	115	146	185	10	220
2	10/08/12-13	438	244				145	256				9	341
4	10/08/27-28	420	114	88	83		85	97	103	113		4	130
6	10/09/12	79	58				68	135				13	142
11	11/01/25	182	82				122	213				21	330
12	11/01/28	222	46	57	73		148	159	180	245		13	322
13	11/02/04	243	41	93			102	107	126			4	139
14	11/02/06	483	52	114	51	62	95	102	136	150	164	5	175
16	11/02/25	82	46				89	130				19	177
17	11/03/07a	69	53				143	296				55	317
21	11/05/31	237	67	31			179	223	239			11	270
22	11/06/05	227	140				182	281				14	342
23	11/06/06	291	65				153	152				16	377
24	11/06/11	341	57	129			102	114	173			9	227
26	12/07/28-29	513	186	73			132	162	189			10	380
27	12/10/07	165	51	31			93	109	125			7	157
28	13/02/27	249	119				144	171				9	274
31	14/03/24	109	68				65	109				11	127
35	15/04/12-13	181	67	31			55	81	101			11	161
40	16/07/29	149	57				95	62				11	100

ерупцията е под 31 минути ($\Delta T < T_{min}$), което ги прави непредставителни като показател за наличието на търсените отклонения.

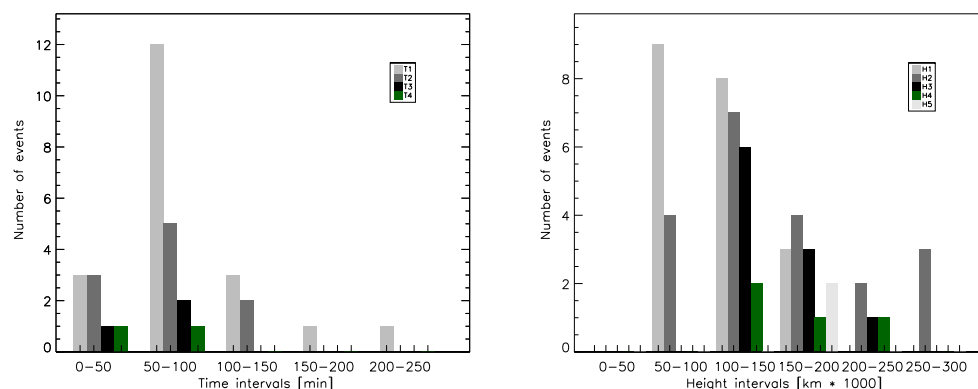
Височините, на които се наблюдава забавяне на издигане на веществото също са много различни и лежат в интервала 55 000–296 000 km. Най-често първите колебания се проявяват във височини между 50 000 и 100 000 km, но могат да се очакват и в интервала между 100 000 и 200 000 km. Следващите осцилации (от втори, трети и четвърти порядък) най-често се случват при височина на ЕП над лимба 100 000–150 000 km (Фигура 3.7 дясно). Прави впечатление добрата корелация между максималната височина, която достигат ЕП h_{max} и височините, на които се наблюдава забавяне на скоростта на издигане на плазмата H_l (Фигура 3.8). Коефициентите на Pearson (r) за височините от различен порядък (означени с различни символи върху графиката) са съответно:



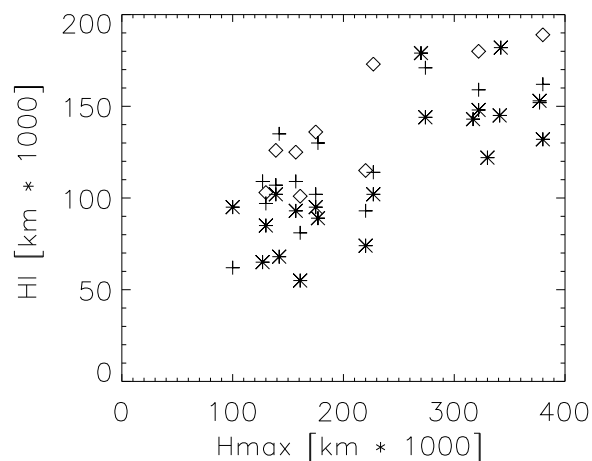
Фигура 3.6: Графики височина–време $h(t)$ (горе), скорост–време $v(t)$ (среда) и скорост–височина $v(h)$ за ЕП от 2011/05/31. С права линия е нанесена средната скорост v_{cp} .

$r_1 = 0.80$; $r_2 = 0.75$; $r_3 = 0.75$, т.е. влиянието на максималната височина, която ще достигне ЕП върху височините, на които се наблюдават осцилациите е определящо в $>56\%$ ($r_{min}^2 \times 100$) от изследваните случаи. Височини на осцилациите от по-голям порядък (Н4 и Н5) не са разглеждани поради малкото на брой ЕП, които проявяват такива и съответно недостатъчният брой стойности за определяне на зависимостта.

Средните скорости показват, че осцилиращите ЕП не са сред най-бързите ($4 \leq v_{cp} \leq 55 \text{ km s}^{-1}$). Фигура 3.9 показва, че 95% от протуберанси, показващи отклонения на скоростите имат $v_{cp} < 30 \text{ km s}^{-1}$. Само един протуберанс (No. 17 от Таблица 3.3) достига средна скорост

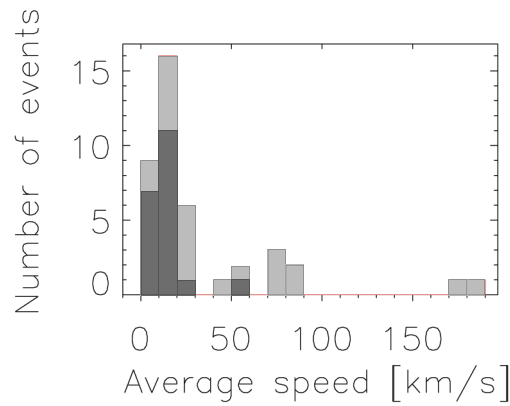


Фигура 3.7: Разпределение на интервалите между осцилациите според тяхната продължителност (ляво) и според височината, на която са регистрирани (дясно). С различни цветове са означени броят интервали от определен порядък (T1 – време между първото и второто колебание на различните ЕП, T2 – между второ и трето колебание при различните ЕП и т.н.; H1 – височина, на която се наблюдава първа осцилация и т.н.).



Фигура 3.8: Графично представяне на зависимостта между максималната височина на ЕП h_{max} и височините на забавяне на скоростта им H_l ($1 \leq l \leq 3$). С различни символи е означена порядността на осцилациите: H1 – със звездичка, H2 – кръстче и H3 – ромб.

$v_{cp} > 50 \text{ km s}^{-1}$, но сравнението с пълната извадка от ЕП показва, че селектираните 20 не са изключение от общата зависимост – само 24% от всички разглеждани протуберанси имат средни скорости $v_{cp} > 30 \text{ km s}^{-1}$. Вероятно това се дължи на факта, че голяма част от ерупциите включват фаза на активиране с характерни скорости 1–10 km s^{-1} (вж. Секция 2.3). Получените скорости попадат в границите определени от друго изследване ($< 100 \text{ km s}^{-1}$) [61].

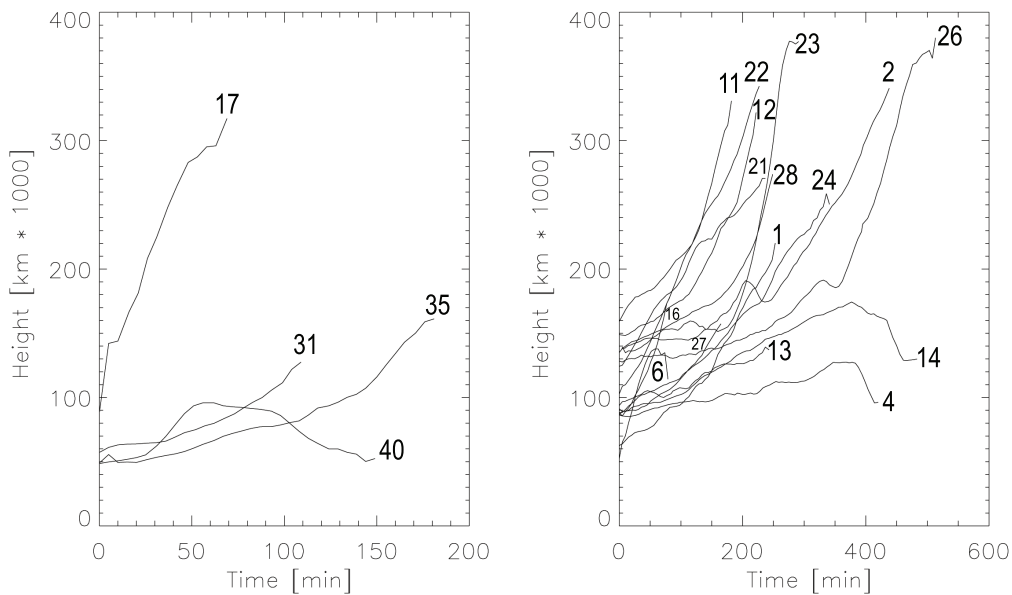


Фигура 3.9: Разпределение на ЕП по средни скорости. В светло сиво са всички 41 ЕП от извадката, а в тъмно сиво – изследваните за осцилации 20 от тях.

Селектираните 20 ЕП включват 3 ПАО, 1 ПМАО, 10 ПСО и 6 ПП. На Фигура 3.10 протуберансите са разделени според наличието на АО около тях. Вижда се, че от представената извадка имаме едва 4 случая на влакна, свързани с АО и само 1 от тях достига до височини $h_{max} > 200 \times 10^3 \text{ km}$. Също така тяхната продължителност е значително по-кратка от тази на протуберансите в спокойни области.

Често ерупцията на влакно продължава дълго след като върха на примката излиза извън обсега на инструмента AIA и проследяването на издигането на веществото на височина до $30R_{\odot}$ може да бъде проследено по данни от коронографите на инструмента LASCO. От селектираните 20 ЕП само 3 продължават ерупцията си след напускането на зрителното поле на AIA (протуберанси No. 23, 26 и 28). Освен тях 7 от протуберансите, които показват единични колебания в AIA също могат да бъдат проследени на големи височини. Профилите на всичките 10 ЕП са построени с помощта на инструмента StereoCat (вж. Секция 3.2).

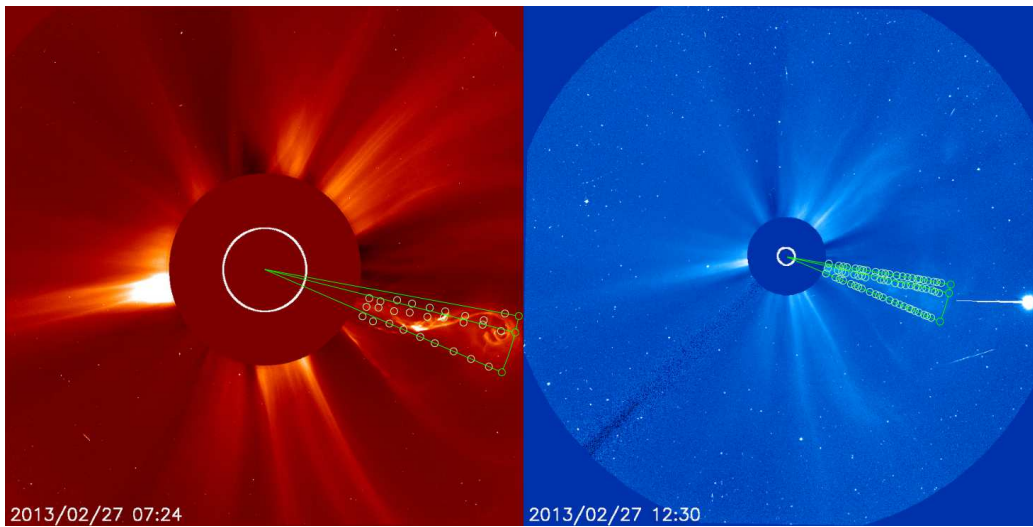
Измерванията на един от тях в полето на LASCO C2 и C3 са показани



Фигура 3.10: Профили височина–време $h(t)$ на асоциираните с АО ЕП (ляво) и неасоциираните с АО (дясно). Числата накрая на всяка линия показват номера на ЕП според номерацията от Таблица А.1 в Приложение А.

на Фигура 3.11. Ерупцията започва на югозападния лимб около полунощ на 2013/02/27 и може да бъде проследена в AIA за малко повече от 4 часа. Около 05:30 UT ЕП се появява в зрителното поле на LASCO C2 (достига височина $>2R_{\odot}$) и може да бъде проследен в C3 до 12:30 UT когато се простира на $>18.5R_{\odot}$ над слънчевия лимб. Средните скорости на издигане на веществото в обсега на двата инструмента (C2 и C3) са съответно 387 и 460 km s^{-1} .

Построените графики височина–време $h(t)$ и скорост–време $v(t)$, получени след изглаждане на данните, са показани на Фигура 3.12. Наблюдяваните на по-ниски височини (от AIA) осцилации тук не се забелязват. Зависимостта на височината от времето е близка до линейната, а вариациите на кривата на скоростта се дължат на по-големия интервал между 2 последователни измервания в случаите с липсващи данни. Подобни са и резултатите от измерванията на останалите 9 ЕП, видими от коронографите на SOHO. Вероятните причини за това са по-подробно описани в Секция 3.4.



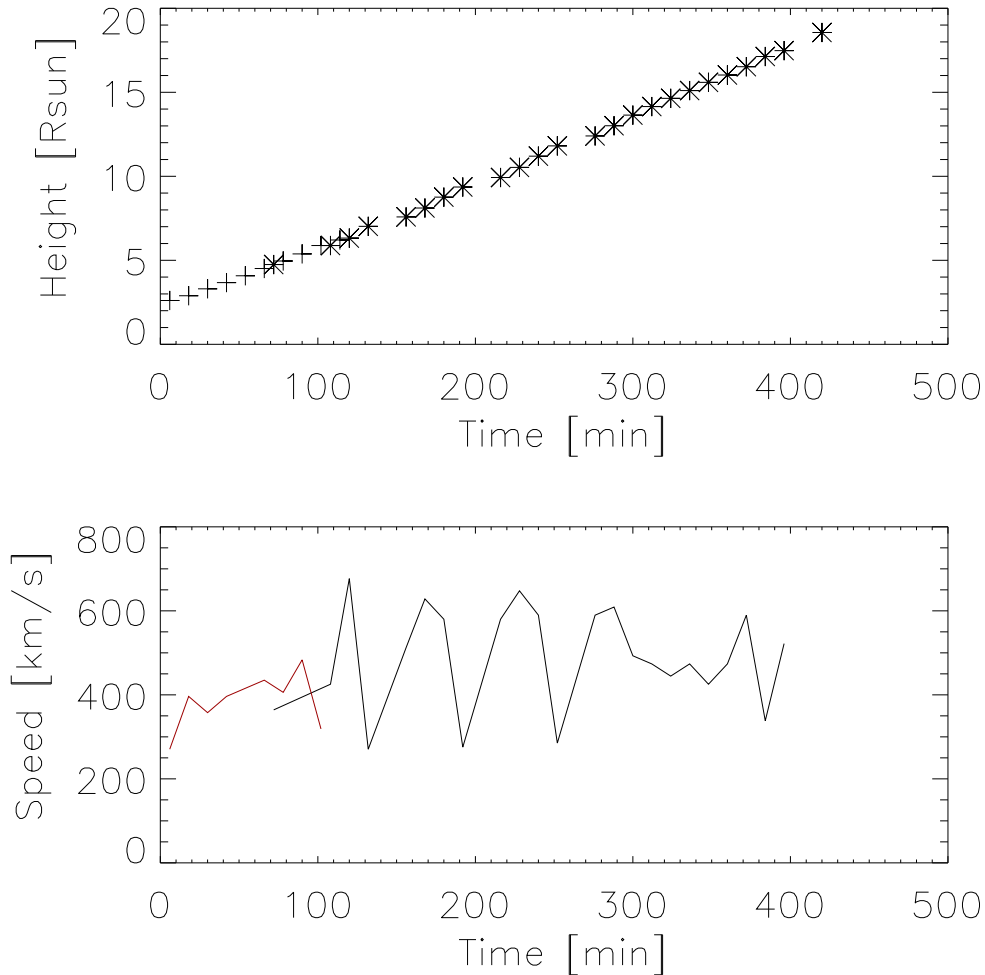
Фигура 3.11: Измерване на височината на ЕП от 2013/02/27 в полето на коронографите на LASC0 – C2 (ляво) и C3 (дясно).

3.4 Дискусия

Изследването представя статистическа проверка на хипотезата, че преминаването на веществото на ЕП през различни аркадни структури на обкръжаващото МП може да породи квазипериодични забавяния на издигането. Разгледаните ЕП достигат височини в диапазона $(100 - 380) \times 10^3 \text{ km}$ в зрителното поле на AIA и $4.4 - 22.8R_{\odot}$ в това на коронографите на LASC0.

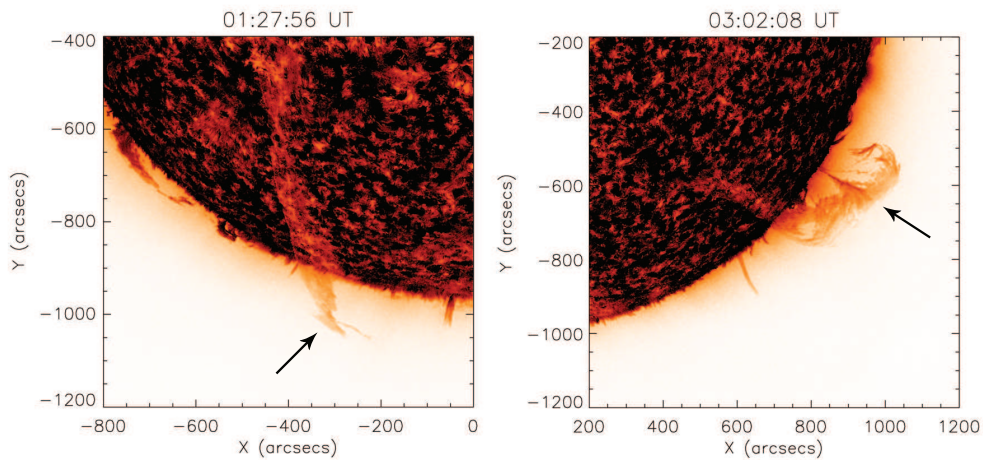
Вероятно поведението на протуберансовото тяло, което се забелязва по профилите на ерупциите се дължи на взаимодействие с обкръжаващата магнитна конфигурация. Често по време на ерупция се наблюдава сплескване на върхната част от протуберансовата примка (Фигура 3.13), която по този начин очертава границите на част от едромасщабна коронална структура, състояща се от протуберанс и кухня [8]. Началото на еруптивната фаза е знак за започващото едромасщабно магнитно присъединяване [72]. Този момент може да се свърже с преминаването на веществото през коронални кухни и се характеризира с нарастване на скоростта с $20-40 \text{ km s}^{-1}$.

Обикновено короналните структури се наблюдават в бяла светлина над протуберанси по време на ПСЗ или на дължина на вълната 211 \AA . На Фигура 3.14 са показани 2 ЕП и тяхното обкръжение в последните мо-



Фигура 3.12: Профили височина–време $h(t)$ (горе) и скорост–време $v(t)$ (долу) на ЕП от 2013/02/27 в полето на коронографите C2 (кръстчета) и C3 (звездички) на инструмента LASCO.

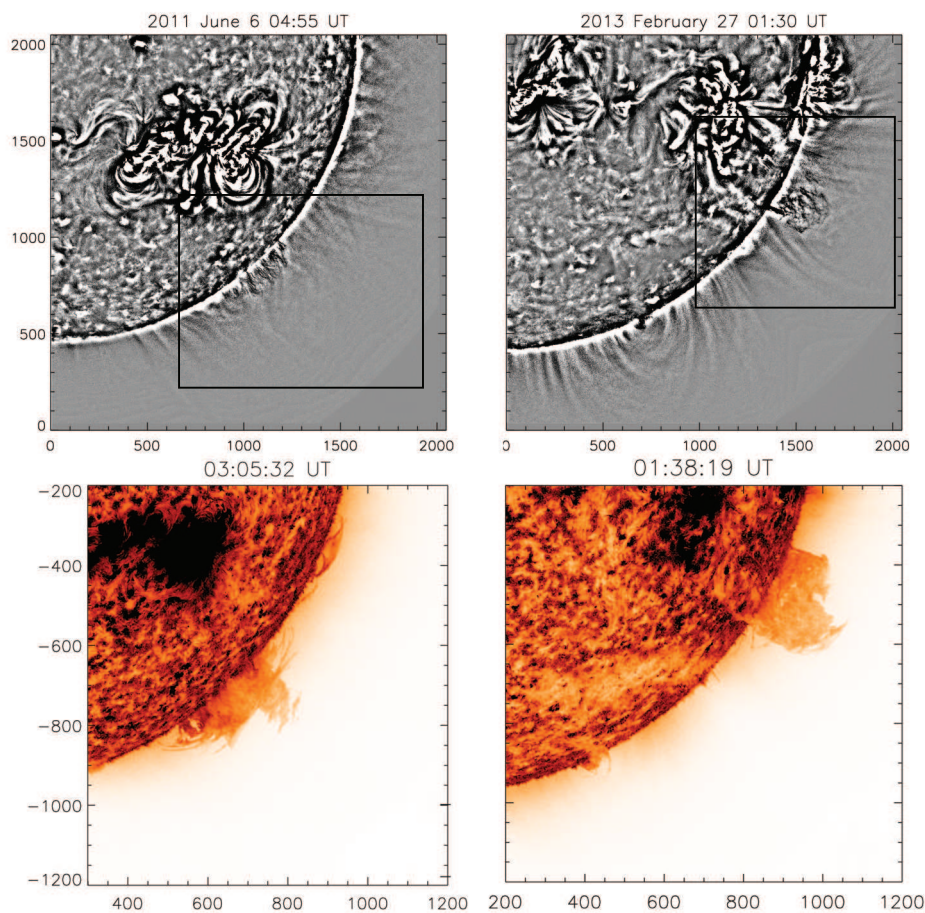
менти от активацията им и точно преди началото на еруптивната фаза. За засилване на контраста на магнитните образувания, изображенията са показани като разлики между оригиналния кадър на AIA и версия на същия с приложено премахване на еднородности чрез изглаждане. С контур са очертани областите, в които се наблюдават примкообразни структури и кухни над протуберансите. Въпросът за връзката между



Фигура 3.13: Изглаждане на връхната част на протуберансовата примка, която се наблюдава често при ерупция – ЕП от 2010/08/25 (ляво) и ЕП от 2011/01/25 (дясно).

протуберансите и кухините в короната все още няма категоричен отговор, макар че мнението, че всички влакна имат в обкръжението си кухина е все по-широкоразпространено (вж. Секция 1.3.3). Вероятно наблюденията на протуберанси без асоциирани кухини в короната се дължат на ефекти на проекцията по лъча на зрение при закриване на кухнята от излъчваща арка на преден план [39]. Нарастването на скоростта на издигане на ЕП продължава над кухините в отворените структури, наблюдавани в коронографите на LASCO. За магнитни структури в обкръжението на протуберансите са проверени още данните във филтър AIA 193 Å.

При преминаването през отворени магнитни структури на височини над $2R_{\odot}$ [32, 41] веществото достига зона на свободно ускорение без осцилации. А в диапазона $0.6-2R_{\odot}$, след като ЕП напусне обсега на AIA и преди да се появи в този на LASCO няма наблюдателни данни, които да показват наличието или липсата на осцилации.



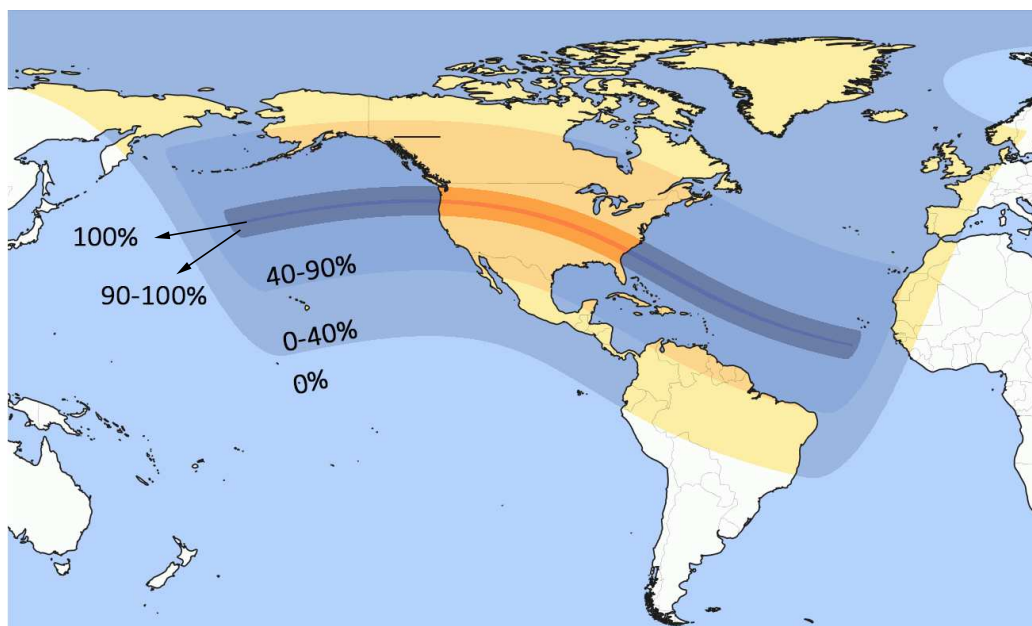
Фигура 3.14: Изображения на два ЕП (2011/06/06 – ляво и 2013/02/27 – дясно) от инструмента AIA: обкръжението на ЕП, изобразено чрез разлики между отделни кадри във филтър 211 \AA (горе) и структура на ЕП на дължина на вълната 304 \AA (долу).

3.5 Наблюдения на протуберанси по време на пълно слънчево затъмнение

3.5.1 Основни данни за затъмнението от 21 август 2017 г.

Ивицата на тоталитета на пълното слънчево затъмнение от 21 август 2017 г. пресича по дължина цяла Северна Америка. Пътят на лунната

сянка по Земята започва от Тихия океан в 16:48 UT и достига западното крайбрежие на САЩ в щата Орегон в 17:15 UT (Фигура 3.15). Преминва през щатите Айдахо, Уайоминг, Небраска, Канзас, Мисури, Илинойс, Кентъки, Тенеси, Джорджия, Северна и Южна Каролина и напуска бреговете на САЩ в 18:49 UT, за да продължи през Атлантическия океан. Краят на пълното затъмнение настъпва в 20:02 UT на повече от 1100 km западно от бреговете на Сенегал.



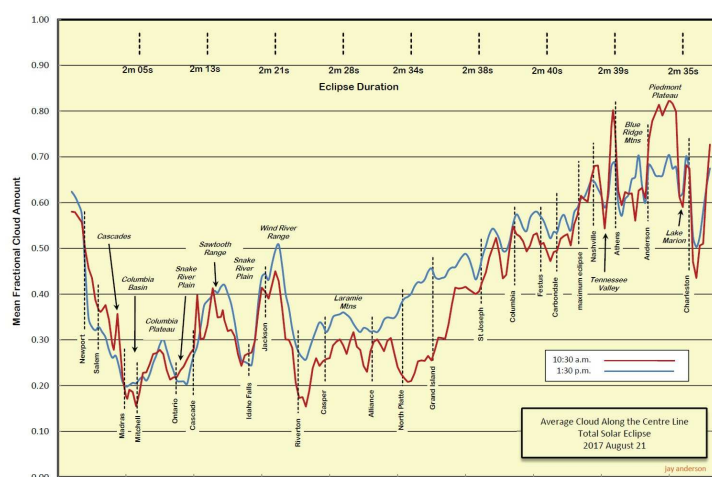
Фигура 3.15: Пътят на лунната сянка по Земята по време на ПСЗ от 21 август 2017 г. В проценти е показана площта от Слънцето, покриваната от Луната във фазата на максимално затъмнение от съответната локация. Източник: <https://www.timeanddate.com/eclipse/solar/2017-august-21>.

Затъмнението се наблюдава като частично от много по-широка ивица, обхващаща цяла Северна Америка, северните части на Южна Америка и североизточните на Азия.

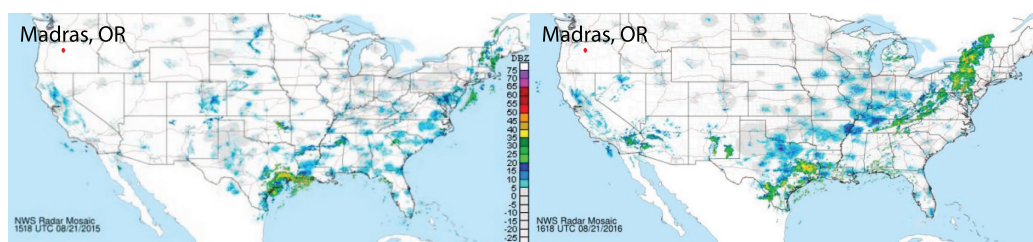
Най-дълга е пълната фаза (160.2 s) за наблюдателите от щата Илинойс, разположени на около 250 km южно от щатската столица Спрингфийлд.

3.5.2 Локация на екипа

Предварителната подготовка на експедицията, започнала повече от година преди затъмнението, включва избор на най-доброто място за наблюдение. С помощта на статистическите данни за средната облачна покривка по ивицата на тоталитета (Фигура 3.16) и метеорологичните условия на територията на САЩ на 21 август през годините (Фигура 3.17).



Фигура 3.16: Прогнозна графика на разпределението на облачната покривка по ивицата на тоталитета по данни на NOAA.



Фигура 3.17: Радарни карти, показващи количествата валежи и тяхното местоположение за деня на затъмнението през 2015 г. (ляво) и 2016 г. (дясно). Маркирана е приблизителната локация на избраното от екипа местоположение. Данни: NOAA/NWS.

Местата, от които пълната фаза е най-продължителна показват между 50% и 80% средна облачност сутринта в деня на затъмнението (Фигу-

ра 3.16, червената линия), докато на запад тези стойности са значително по-ниски. Прогнозните метеорологични данни изиграха най-съществена роля при взимането на решение нашият екип да се разположи в околностите на град Мадрас, Орегон ($44^{\circ}.70321$ С, $120^{\circ}.79783$ З), близо до западното крайбрежие на САЩ (Фигура 3.17) – под 20% очаквана средна облачна покривка за 21 август 2017 г., макар и при 36 s по-кратък тоталитет.

Детайли за затъмнението от избраното от екипа местоположение са обобщени в Таблица 3.4.

Таблица 3.4: Основни данни за затъмнението за избраната от екипа наблюдателна площадка. Означения: LT – местно време, h – височина на Слънцето над хоризонта, α – азимут на Слънцето.

Ширина на сянката	101.0 km
Съотношение Луна/Слънце	1.02700
Скорост на сянката	1.002 km s^{-1}
Продължителност на пълната фаза	2' 03.8"
Продължителност на затъмнението	2 ^h 34' 35.8"
Начало на частична фаза (C1)	09:07:04.2 LT $h = 29^{\circ}.7, \alpha = 103^{\circ}.3$
Начало на пълна фаза (C2)	10:20:04.1 LT $h = 41^{\circ}.7, \alpha = 119^{\circ}.6$
Максимално затъмнение	10:21:05.9 LT $h = 41^{\circ}.9, \alpha = 119^{\circ}.9$
Край на пълна фаза (C3)	10:22:07.9 LT $h = 42^{\circ}.0, \alpha = 120^{\circ}.2$
Край на частична фаза (C4)	11:41:40.0 LT $h = 52^{\circ}.5, \alpha = 144^{\circ}.6$

3.5.3 Проведени експерименти и резултати

При наблюденията на пълното слънчево затъмнение от 21 август 2017 г. нашият екип проведе изследвания свързани с определяне сплеснатостта на короната, изследване на нейната фина структура на разстояния до $10R_{\odot}$, изследване поляризацията на бялата корона, феноменът бягаци сенки и връзката му с атмосферните промени на Земята по време на затъмнение и др. Резултатите от тях обаче не са обект на настоящата дисертация. Тук ще разгледаме само изследванията на наблюдаваните по време на затъмнението протуберанси.

Заснемането на слънчевата корона и протуберансите се осъществи с 3 цифрови фотоапарата – Canon EOS 60D, оборудван с 200-мм обектив, Canon EOS 350D с 200-мм обектив, конвертор за двукратно увеличение и поляризационен филтър, както и Canon EOS-1Ds Mark II, снимащ през рефрактор Vixen 81/625 с конвертор (2x) и поляризационен филтър. Всички монтирани на стативи с глави без системи за водене.

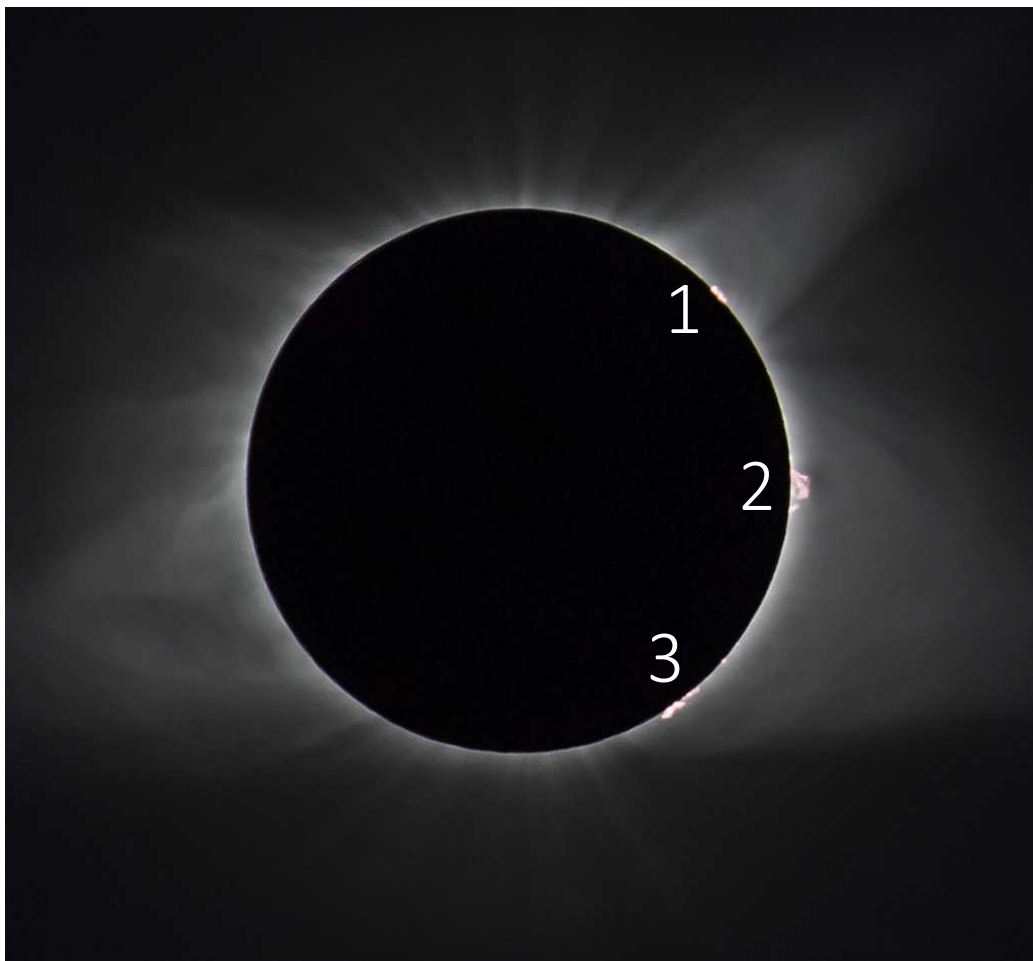
Изображение, получено чрез комбинация на 9 кадъра с различни експозиции (1/1000, 1/800, 1/640, 1/500, 1/320, 1/250, 1/200, 1/160 и 1/125 s), заснети по време на пълната фаза показва три протуберанса на западния слънчев лимб (Фигура 3.18). Още кадри на протуберансите с по-голямо увеличение са показани на Фигури 3.19 и 3.20. Основните данни за тях са обобщени в Таблица 3.5.

Таблица 3.5: Информация за протуберансите, наблюдавани по време на затъмнението. Позиционният ъгъл е измерен спрямо северния полюс на Слънцето по посока обратна на часовниковата стрелка. Използвана е номерацията от Фигура 3.18

Параметър	Протуберанс 1	Протуберанс 2	Протуберанс 3
Поява [мм/дд]	08/19	08/19	08/20
Изчезване [мм/дд]	08/23	08/23	08/23
Позиционен ъгъл	314°	270°	216°
Ъглов размер	≈4°	≈12°	≈8°
Асоциирани АО	няма	няма	няма
Асоциирани ИКМ	няма	няма	няма
Височина [$\times 10^3$ km]	22 ± 6	50 ± 6	28 ± 6

Протуберанс 1 се заражда като малко влакно седмица преди затъмнението, но се появява като протуберанс на лимба на 19 август (около 6:30). Протуберанс 2 е най-големият от трите и във височина, и по дължина, формира се 2 дни преди затъмнението, като се разполага по слънчевия екватор. Третият протуберанс е разположен близо до южния полюс на Слънцето (на ≈ 36° средно ъглово отстояние), на границата между две характерни зони на образуване на влакната – средните ширини и полярната област.

Детайлна структура на слънчевата корона на разстояние до $0.5R_{\odot}$ от лимба ни показват данните от инструмента AIA в канала 171 Å (Фигура 3.21a). Този филтър предлага възможност за наблюдение на спокойната корона и горната част на преходната област от слънчевата атмосфера (Таблица 3.1). На кадъра се виждат централно разположената АО 12671, както и новопоявяващата се на източния лимб 12672. Ясно изра-



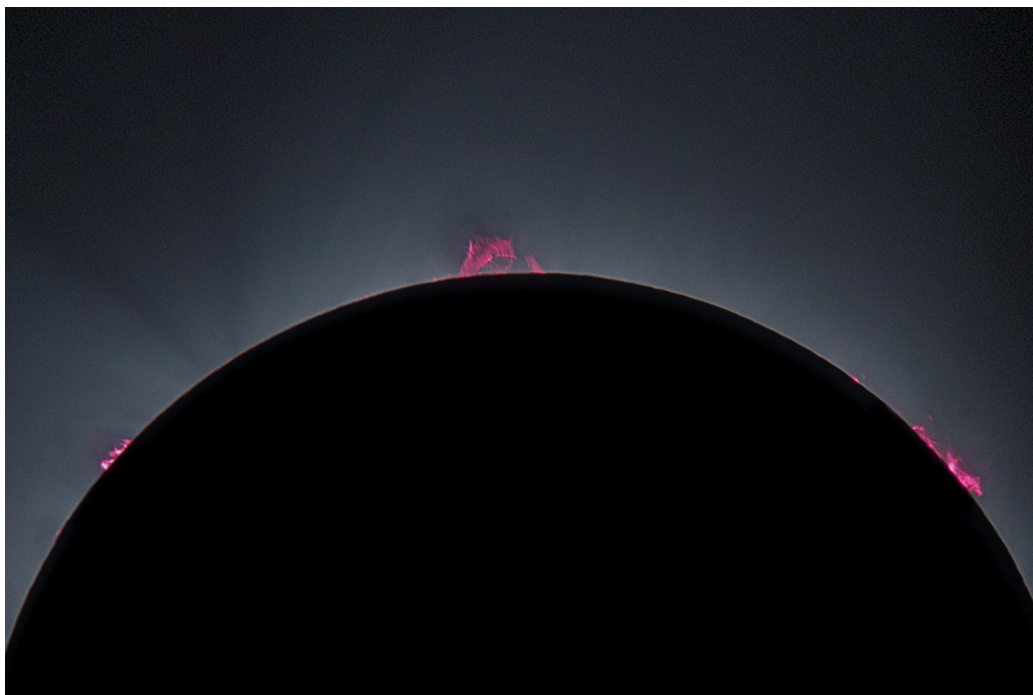
Фигура 3.18: Композитно изображение, съставено от 9 снимки, заснети с Canon EOS 350D с 200-мм обектив и конвертор за двукратно увеличение, с различни експозиции между 1/1000 и 1/125, показващо наблюдаваните протуберанси.

зена е структурата на короната в полярните области с характерните образувания – полярни пера, но хладните протуберанси не се наблюдават, освен части от протуберанс 2, видими на западния лимб. Изображения от AIA 211 Å (Фигура 3.21c) показват обкръжението на протуберансите в ниската корона. Най-характерна е структурата над екваториалния протуберанс, където се забелязва короналната кухня в основата на аркообразната структура, разположена в единия край на коронален стример. Наличието на области с по-ниска плътност над влакната на разстояния



Фигура 3.19: Протуберансите по време на ПСЗ от 21 август 2017 г., заснети с Canon EOS-1Ds Mark II, снимащ през рефрактор Vixen 81/625 с конвертор (2x).

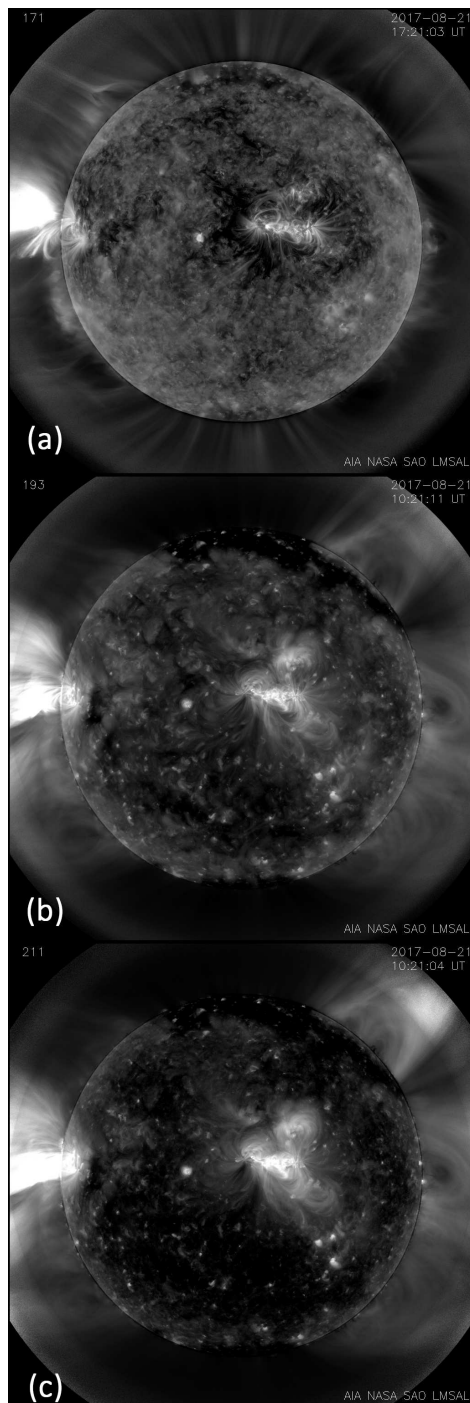
$<0.5R_{\odot}$ от лимба предполага взаимодействие между свързаните с тях магнитни структури при вертикални движения на протуберансовото вещество, което може да подпомогне изучаването на трудните за наблюдение кухни. В другият край на същия стример е разположен протуберанс 3, чиято кухня и аркада не са толкова добре изразени. Във височина шлемовидните стримери могат да бъдат проследени на Фигури 3.18 и 1.13.



Фигура 3.20: По-активната част от Слънцето с трите протуберанса, заснета от Canon EOS-1Ds Mark II с рефрактор Vixen 81/625 и конвертор (2x). Изображението не е ориентирано по посока север-юг.

В обкръжението на протуберанс 1, разположен на северозападния лимб се наблюдава подобна структура, макар и в основата на далеч по-малък псевдостример. По наблюдения на дължина на вълната 193 \AA (Фигура 3.21b) обаче се забелязва, че протуберансът и неговото обкръжение са разположени в коронална дупка.

Известно е, че явления като короналния дъжд, разположени на границите около или в самите коронални дупки могат да играят ключова роля в загряването на слънчевата корона [102]. Възможно е подобна роля да имат и малките, възвратни протуберанси, разположени в коронални дупки с ясно изразени магнитни аркади в обкръжението си (подобно на протуберанс 1), но тази хипотеза все още не е проверена.



Фигура 3.21: Изображения, получени след комбиниране на по 5 кадъра от инструмента AIA на SDO по време и около ПСЗ с различни филтри в крайна ултравиолетова област. (a) Слънчевата корона по време на затъмнението на дължина на вълната 171 \AA . (b) Короналната дупка, разположена около северния полюс на Слънцето в канала 193 \AA . (c) Обкръжението на протуберансите няколко часа преди първия контакт заснети в линията 211 \AA . Процедурата *aia_rfilter* позволява изостряне на короналната структура и разкрива детайли от обкръжението на протуберансите.

Глава 4

Връзка между протуберанси и потоци заредени частици

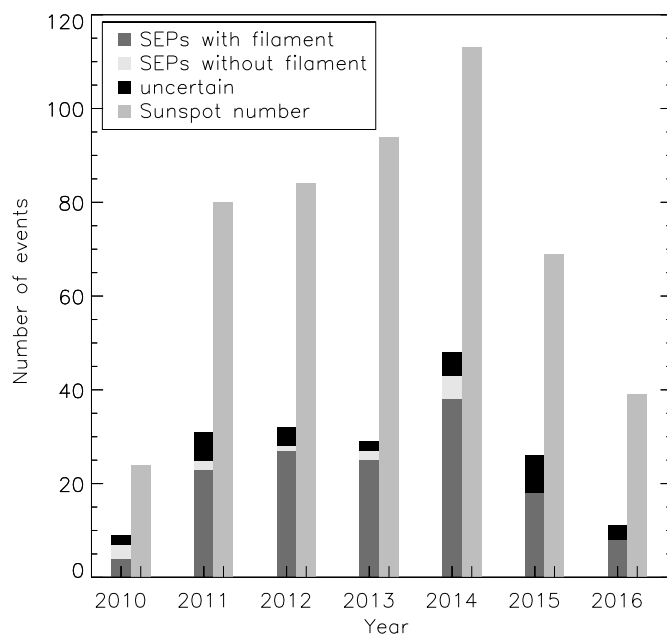
Връзката между различните прояви на слънчева активност е установена преди повече от едно столетие. Всички тези процеси съществуват благодарение на слънчевото магнитно поле и представляват различни начини на взаимодействие между него и плазмата, която ги изгражда [126]. Многообразните слънчеви ерупции могат да се наблюдават като протуберанси, избухвания и изхвърляния на коронална маса, но и да се изразяват в промени в радиоизлъчването, потоци от заредени частици и разпространяващи се вълни, и имат важна роля в определянето на космическото време. Мощните ерупции често прерастват в ИКМ, които се разпространяват из Слънчевата система и оказват пряко въздействие върху земната магнитосфера [48, 114]. Предполага се, че голяма част от тези ИКМ произхождат от ерупция на протуберанси [46]. Независимо от своята сила, еруптивните процеси са ключов елемент от разгадаването на въпросите за структурата и динамиката на слънчевата атмосфера [61].

Статистическата връзка между ЕП и потоците от заредени частици (над 10 MeV) остава неизследвана. Предишни проучвания разглеждат изолирани случаи [62, 74, 76] или малобройни извадки от събития [45, 73] и показват, че наличието на АО или импулсна фаза на избухванията не са задължителни за появата на заредени частици. Сценарият, на който се приписват по-голяма част от събитията се дължи на ударни вълни, следствие от ИКМ.

Целта на представените изследвания е оценка на връзката между протуберансите и заредените частици, използвайки най-обширната извадка от събития и най-висококачествените наблюдения на протуберанси до сега.

4.1 Селекция на събитията

Подборът на протонни събития е направен по данни от инструмента SOHO/ERNE [160] в канала 17–22 MeV. За изследвания период (2010–2016 г.) са регистрирани 186 случая на слънчеви енергетични частици, достигащи околното пространство. Разпределението на събитията през различните години е показано на Фигура 4.1.



Фигура 4.1: Разпределение на всички 186 детектирани протонни събития за периода 2010–2016 от SOHO/ERNE (лявата колона), съпоставено със средногодишния брой слънчеви петна (дясната колона). В различни цветове са представени асоциираните с протуберанс частици (тъмно сиво), несвързаните с влакна (светло сиво) и събитията с неясен произход (черно). Информация за средногодишният брой на слънчевите петна е от архива на SILSO, Кралската обсерватория на Белгия, Брюксел.

Известни са два основни механизма за генериране на слънчеви енергетични частици – в резултат на ударна вълна от ИКМ [131] или ускоряване от магнитно присъединяване в ниската корона при слънчеви избухвания [12]. За определянето на източника на изследваните събития

(асоциирането им с ИКМ или избухване) са приети следните съображения: избира се най-мощното избухване и най-бързото и голямо ИКМ за период от едно денонощие преди началото на протонното събитие и с помощта на данните за тяхната локация и разпространение, както и с профилите на детектираните частици, се прави оценка на асоциацията. Понякога наблюдавано по-рано във времето еруптивно явление (и често разположено в източната хелиосфера) може да бъде предпочетено, в случай, че интензитетът на протонното събитие нараства бавно (за време от порядъка на няколко часа). Друг използван индикатор за източника на частици са и радиоизбухвания от тип III (регистрирани от Wind/WAVES). Крайната цел е асоцииране на протонното събитие както с избухване, така и с ИКМ. Това се оказва възможно при 111/186 (60%) от случаите, докато при други 45 случая е асоциирана само една от формите на слънчева активност. Установяването на източника на останалите 30 протонни събития е затруднено (поради липса на данни, комплексни случаи, голяма степен на несигурност и др.) и тези събития не се отчитат в направената статистика.

Сред използваните допълнителни източници на информация за събитията са: списъците с избухвания на GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites)¹, идентификацията на радиоизбухвания [108] и каталогът с ИКМ на SOHO/LASCO² [47].

4.2 Наблюдения на асоциирани протуберанси

Свързаните със заредени частици протуберанси са определени по данни за протонните събития (време на регистрация и мощност), техните източници и асоциирани явления (времена за начало и максимум, хелиографски координати, размер и позиционен ъгъл, асоциация с АО).

Solar Dynamics Observatory (SDO)

Наблюдателен материал от инструмента AIA³ на дължина на вълната 304 Å е основен източник на наблюдения на влакна и протуберанси. Освен това, данни от каналите 1600 Å, 1700 Å и 4500 Å, както и идентификацията на SolarMonitor⁴ помагат за търсене на свързани АО.

¹https://hesperia.gsfc.nasa.gov/goes/goes_event_listings/

²https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/

³Повече информация за мисията SDO в Секция 3.1.

⁴<http://solarmonitor.org>

Solar Terrestrial Relation Observatory (STEREO)

При търсенето на протуберанси, разположени зад слънчевия лимб от гледна точка на SDO са използвани наблюдения на телескопите на STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory) – мисия на NASA, която включва 2 почти идентични космически обсерватории, разположени по земната орбита, съответно преди (STEREO Ahead) и след (STEREO Behind) Земята [26]. Изстреляни са на 26 октомври 2006 г. Чрез координираните наблюдения от двете обсерватории става възможно първото в историята стереоскопично изследване на Слънцето, което позволява и триизмерно моделиране на активните образувания в слънчевата атмосфера. Подобни 3D наблюдения не винаги са възможни заради постоянната промяна на позициите на STEREO A & B спрямо Слънцето.

И двата космически кораба разполагат с 4 пакета от инструменти – SECCHI, SWAVES, IMPACT и PLASTIC. Данните, включени в настоящите изследвания са от ултравиолетовата камера с висока резолюция – 1.6" (EUVI/SECCHI – Extreme Ultraviolet Imager/Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation) в линията HeII 304 Å.

Наземни наблюдения на протуберанси

В случаите когато данните от космическите телескопи не са достатъчни за асоцииране на протуберанси с протонни събития, са използвани и наземни наблюдения на част от телескопите, обединени в The Global High-Resolution H_{α} Network – Big Bear Solar Observatory (BBSO) в Калифорния, която разполага с 3 телескопа на обща монтировка (65-см рефлексор, 25-см и 15-см рефрактори, последният, от които наблюдава в H_{α}), както и все още най-големият действащ слънчев телескоп Goode Solar Telescope (1.6 м); Kanzelhöhe Solar Observatory (KSO) в Австрия – 3 рефрактора, един, от които за H_{α} (с апертура 10 см).

Списък с протуберанси

За пълната статистика е важно определянето и на обратната връзка (колко от протуберансите водят до протонни събития). За целта е необходим пълен списък на наблюдаваните влакна, какъвто не ни е известен. Затова е използван каталогът с наблюдения от AIA⁵ [103]. Това не е пълен списък на всички наблюдавани протуберанси, а само на еруптивните. Обхваща периода април 2010 г.–октомври 2014 г. и съдържа 980

⁵http://aia.cfa.harvard.edu/filament/catalog_table.txt

записа. След премахване на повтарящите се случаи за изследване остават 954, чиято връзка със заредени частици разглеждаме в Глава 4.3.2. За целите на описаните там изследвания приемаме каталога на ЕП като пълна и представителна извадка за такива събития.

Основните характеристики на влакната, протонните събития и асоциираните активни образувания са описани в Таблица Б.1 в Приложение Б.

4.3 Статистически резултати

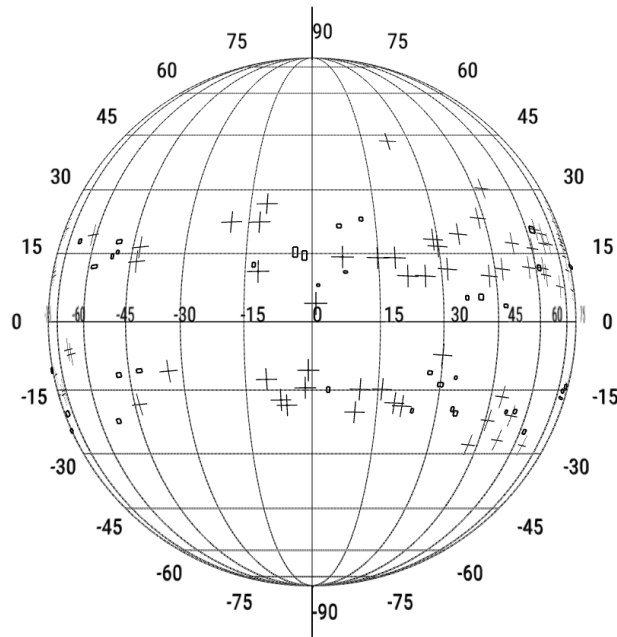
4.3.1 Корелационен анализ на връзката на заредени частици с протуберанси

Връзката на потоците от заредени частици с протуберанси е определена с помощта на данните за асоциираните избухвания и ИКМ – 143/156 протонни събития са съпътствани от появата на влакно (92%), докато в останалите 13/156 случая (8%) такова не се наблюдава. Нарастване честотата на появата на потоци от заредени частици се наблюдава при достигане на 24-тият слънчев максимум през април 2014 г. (Фигура 4.1).

За всички 156 събития е известна връзка с поне една проява на активност (избухване и/или ИКМ) като в 112 от случаите могат да бъдат определени точните координати на източника. Още данни за асоциираната с избухването АО и посоката на разпространение на съответното ИКМ (позиционен ъгъл) помагат за нанесянето на тези 112 събития върху слънчевия диск (Фигура 4.2). В други 40 случая е известна само полусферата, от която произхождат явленията, а още 4 случая остават напълно неопределени, тъй като местоположението на техния източник е твърде близко разположена или до еkvатора, или до централния слънчев меридиан. Затова тези 44 събития не са нанесени върху Фигура 4.2.

Забелязва се, че протонните събития с определен източник често възникват в областта $\pm 30^\circ$ около еkvатора, предпочитайки хелиографски ширини до $\pm 15^\circ$. Освен това, 57% (86/152 случая) от частиците произхождат северно от еkvатора и 43% (66/152 случая) – на юг от него, което потвърждава резултатите от предишни изследвания [13]. Забелязва се, че частиците предпочитат северната полусфера преди максимума на слънчевия цикъл и южната след това. Потвърждава се и добре известният наблюдателен факт за доминиращия произход на частици от западната полусфера (68% или 103/152 случая).

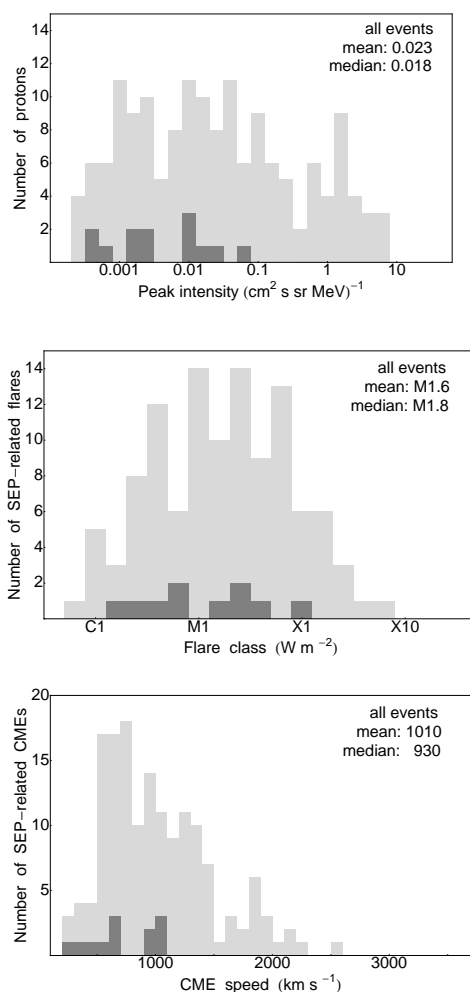
Хистограми с „натрупани-данни (stacked histograms) за протонните събития и свързаните с тях избухвания и ИКМ са показани на Фигу-



Фигура 4.2: Хелиографски координати на избухванията свързани с 112 протонни събития с известни локации по слънчевия диск за периода 2010–2016 г. Всички събития наблюдавани преди максимума на 24-тия слънчев цикъл (април 2014 г.) са отбелязани с кръст, а тези след него – с квадрат.

ра 4.3. В различни цветове са означени потоците частици асоциирани с протуберанси (светло сиво) и тези, при които влакно не се наблюдава (тъмно сиво). Най-отгоре е представено разпределението на всички 156 протонни събития по интензитет в брой протони/ $(\text{cm}^2 \text{ s sr MeV})$. Средноаритметичната и медианната стойност на всички разглеждани събития са съответно $0.023/0.018 (\text{cm}^2 \text{ s sr MeV})^{-1}$. Протонните събития, при които протуберанс не се наблюдава имат по-малък интензитет. Средната графика демонстрира разпределение по клас на избухването със средноаритметична и медианна стойност за цялата извадка съответно M1.6 и M1.8. Избухванията, които пораждаят потоци от заредени частици без протуберанс са от класове от C до X. Разпределението по скорост на ИКМ (най-отдолу) показва, че събитията, които не са свързани с влакна се асоциират с по-бавни ИКМ. Средноаритметичната скорост на всички ИКМ е 1010 km s^{-1} , а медианната – 930 km s^{-1} .

Протуберансите, свързани с поява на поток от заредени частици възникват в АО в 88% от случаите. Едва 17 (около 12%) от 143 протуберанса, са локализирани извън АО.



Фигура 4.3: Разпределения на протонните събития и техните източници: по интензитет на потоците от частици (горе), по клас на избухването (в средата) и по скорост на ИКМ (долу). В светло сиво са оцветени асоциираните с влакна събития, а в тъмно сиво – останалите. Сборът на стойностите, показани от двете колони (светло и тъмно сива) показва общият брой събития в съответният диапазон.

Освен с избухвания и ИКМ, е разгледана и връзката на всяко събитие с радиоизбухване тип II. Част от асоциациите са направени с помощта на каталог, изследващ връзката на протонни събития с радиоизбухвания [109]. Има данни за общо 149 случая в короналния диапазон, като в 87 от тях е установено наличие на радиоизбухване от тип II (означени са с "д" в Таблица Б.1), както и за 152 случая в междупланетния диапазон

Таблица 4.1: Асоциации между протонни събития с/без протуберанси и радиоизбухвания тип II в слънчевата корона (по наземни данни) и в междупланетното пространство (по спътникови данни).

Протонни събития	тип II в короната		междупланетно тип II	
	да	не	да	не
асоциирани с влакна	56% (77/137)	44% (60/137)	63% (87/139)	37% (52/139)
неасоциирани с влакна	83% (10/12)	17% (2/12)	77% (10/13)	23% (3/13)

– 97 от тях придружени от тип II ("Д"). От 156 събития в списъка има и такива, при които е невъзможно еднозначното определяне на наличието или отсъствието на радиоизбухване. В короналния диапазон неопределените събития са 7 (6 от тях свързани с влакна), а в междупланетния – всички 4 неопределени събития са от свързаните с протуберанси. В Таблица 4.1 е представена статистиката за наличието или отсъствието на коронални/междупланетни радиоизбухвания от тип II при свързаните или не с протуберанси случаи на потоци от заредени частици. Резултатите в таблицата са нормализирани към броя изследвани случаи, при което неопределените случаи отпадат.

От протонните събития свързани с протуберанси, 77 са в короната и 87 – в междупланетното пространство. Резултатите показват, че малко повече от половината събития с влакна са придружени от радиоизбухване и в короната (56%), и в междупланетната среда (63%). Повечето от случаите на частици, неасоциирани с влакна, се асоциират с радиоизбухвания тип II, въпреки че малкият общ брой такива събития (12/13) предполага, че статистиката не може да бъде представителна.

Случаите, в които протонните събития са придружени както от коронално, така и от междупланетно радиоизбухване ("дД" в Таблица Б.1) представляват 45% (61/135) за протоните с протуберанси и 10% (1/10) за тези без протуберанси. Същевременно, радиоизбухванията от тип II, които възникват в короната и не се разпространяват в междупланетната среда ("дН") са 14%, 18/135 (с влакно) и 30%, 3/10 (без). Признаци на радиоизбухвания тип II в короната не се детектират, но се регистрират междупланетни такива ("нД") в 19%, 26/135 събития с протуберанс и в 10%, 1/10 от останалите случаи. В другите 30 случая на асоциирани с влакна заредени частици и 5 регистрирани потока от частици без протуберанс липсват данни за радиоизбухвания тип II както в короната, така и в околослънчевото космическо пространство ("нН").

В търсене на връзка между физическите характеристики на протонните събития и кинематиката на свързаните с тях ЕП, от всички 143 протуберанса в списъка са изключени 67 влакна, които се наблюдават

върху слънчевия диск, тъй като техните кинематични криви не могат да бъдат построени по наблюдения от АІА. Останалите събития включват 11 спокойни протуберанса, 29 активни и 36 еруптивни. Пренебрегвайки бързите ерупции (които продължават по-малко от 15 минути), както и протуберансите, които не са включени в изследването по други съображения (напр. размерите им са пренебрежимо малки, показват само хоризонтални движения или представляват твърде тънък плазмен стълб) остават 13 протуберанса, чието поведение при ерупция е проследено. По-подробна информация за свързаните с тях потоци от заредени частици е обобщена в Таблица 4.2. Въпреки че източник на протонно събитие може да бъде както ИКМ, така и слънчево избухване, в 6 от случаите прави впечатление липсата на избухване, което да може да бъде еднозначно свързано със заредените частици.

Таблица 4.2: Основни данни за избрани протонни събития, свързани с изследваните 13 ЕП: начало на протонното събитие в SOHO/ERNE ~ 20 MeV; асоциирано избухване (клас/начало/хелиографски координати); асоциирано ИКМ (поява/линейна скорост v /ъглов размер/среден позиционен ъгъл); асоциирани АО; γ - спектрален индекс на протонното събитие, изчислен по наблюдения в диапазона 14–131 MeV; v_{avg} – средна скорост на ЕП за цялата ерупция; v_{er} – средна скорост на ЕП по време на еруптивната фаза на ускорение на веществото. Времената са в универсално време (UT), скоростта – в km s^{-1} , ъгловите размери и позиционните ъгли на ИКМ – в градуси. Съкращения: Д – да; Н – не; u – неопределеност/несигурност.

Събитие No.	Начало гггг/мм/дд	ч	Избухване		ИКМ час/ v /размер/ъгъл	АО	γ	ЕП	
			клас/час/позиция					v_{avg}	v_{er}
1	2011/03/07	22	M3.7/19:43/N30W48		20:00/2125/360/313	11164	5.20	40	190
2	2011/05/11	4	B8.1/02:23/N17W85		02:48/745/225/283	11203-11205	3.15	72	125
3	2011/06/11	13	u		12:00/522/9/58	Н	3.40	8	8
4	2012/03/04	19	M2.0/10:29/N19E61		11:00/1306/360/52	11429	3.67	9	9
5	2012/10/07	16	u		07:36/663/149/207	Н	5.83	7	7
6	2014/02/11	24	u		19:24/613/271/273	11975	2.47	86	86
7	2014/03/24	12	u		07:12/809/159/237	Д	6.08	11	13
8	2014/11/09	14	u		11:12/632/69/149	12207	2.95	21	40
9	2015/02/21	11	u		09:24/1120/360/215	Н	4.03	178	285
10	2015/04/12	26	C6.4/23:24/S14W30		23:48/678/175/285	12320	3.52	10	13
11	2015/05/12	5	C2.6/02:15/S21W83		02:48/772/250/283	12335&12337	4.09	76	76
12	2015/06/18	4	M1.2/00:33/S16W81		01:26/1714/195/270	12365	4.31	69	69
13	2015/07/19	12	C2.1/09:22/S25W62		09:48/782/194/241	12384	4.21	28	60

Основните кинематични характеристики на ЕП се получават при построяването на диаграми височина–време $h(t)$ чрез процедурите използвани в Глава 3. По тези графики е определена средната скорост на издигане за цялата ерупция (v_{avg} в Таблица 4.2). В случай, че същинската ерупция е предшествана от фаза на активиране (ЕП 7, 8, 10 и 13), е

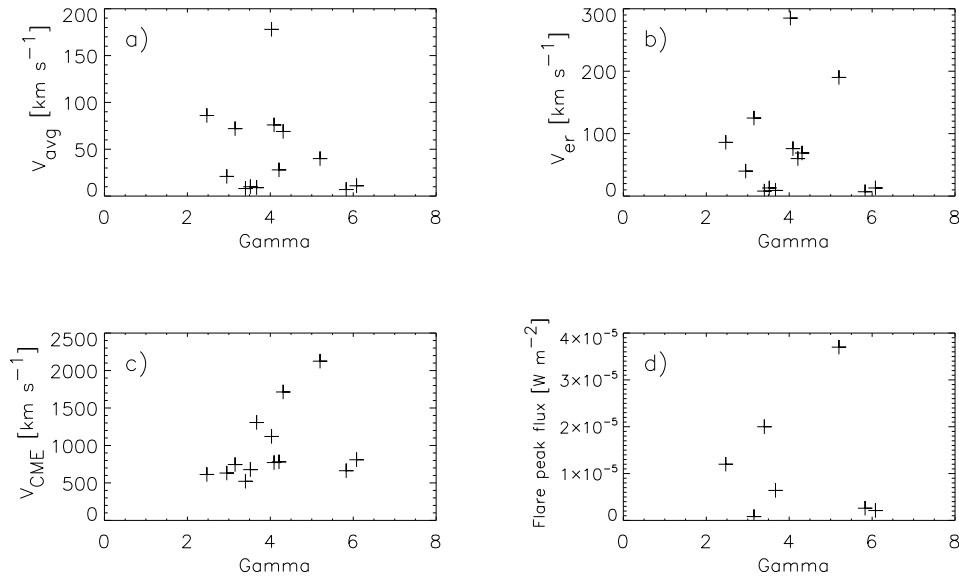
отчитена също и средната скорост на издигане по време на еруптивната фаза (v_{er}). Когато ерупцията се състои от еруптивна фаза на бързо ускорение, последвана от еруптивна фаза на издигане с постоянна или постепенно нарастваща скорост (а фаза на активиране липсва), за v_{er} се приема скоростта от фазата на бързо ускорение (ЕП 1, 2 и 9), а когато е налице само една от двете еруптивни фази без активация, $v_{avg} = v_{er}$ (ЕП 3, 4, 5, 6, 11 и 12).

По-голямата част от селектираните събития са свързани с АО (10/13), но има и 3 случая на потоци от заредени частици, свързани с протуберанси и ИКМ, възникнали извън АО (събития 3, 5 и 9), което потвърждава изводите на [76]. Забелязва се, че в тези 3 случая протуберансът еруптира бавно ($v_{avg} < 15 \text{ km s}^{-1}$), макар да са наблюдавани подобни бавни ерупции и при ЕП в АО (напр. ЕП 4 и 10).

Направена е съпоставка на кинематичните криви на ЕП с енергийните спектри на заредените частици, получени по наблюдения на SOHO/ERNE в каналите 14-17, 17-22, 21-28, 26-32, 32-40, 40-51, 51-67, 64-80, 80-101 MeV. Инспектирана е също информацията от канала 101-131 MeV, но никое от събитията не достига енергии $> 101 \text{ MeV}$. Получените спектри се описват от степенна функция във вида $\frac{dN}{dE} = kE^{-\gamma}$, където N – плътност на потока от частици, E – енергия, k – константа. Това позволява да се определи спектралният индекс γ . Получените резултати са описани в Таблица 4.2. Изследваните събития имат спектрални индекси в интервала $2.95 \leq \gamma \leq 6.08$, който съвпада с определената по-рано долна граница $\gamma \geq 2$ [76], но е по-широк от диапазона $4.15 \leq \gamma \leq 4.69$ [45]. Това разминаване вероятно се дължи на факта, че нашето изследване съдържа по-голяма извадка от събития, данни от повече енергийни канали и не всички изследвани събития произхождат извън АО. Освен това получените стойности са изместени спрямо интервала $2 < \gamma < 4.5$ [75], но $\gamma > 4.5$ само в 3 особени случая (събития 1, 5 и 7). При първото събитие се забелязва срыв в спектъра (spectral break), което може да окаже влияние върху стойността на γ , а в останалите 2 случая са налични данни само от по 3 енергийни канала.

Разпределението по спектрален индекс γ е съпоставено с 4 основни параметъра на асоциираните активни образувания – средна скорост v_{avg} и скорост от еруптивната фаза v_{er} на ЕП, скорост на ИКМ v_{CME} и мощност на избухването P (Фигура 4.4). Анализ на връзките между тях е направен с помощта на коефициентите на Pearson (r) за всяка двойка. Между γ и v_{avg} , v_{er} , и мощността на избухване P , ако изобщо съществува връзка, тя е слабоизразена: $r_{v_{avg}} = -0.23$; $r_{v_{er}} = -0.04$; $r_P = 0,33$. В същото време скоростта на ИКМ v_{CME} показва висока положителна корелация със спектралния индекс на заредените частици γ ($r = 0.70$).

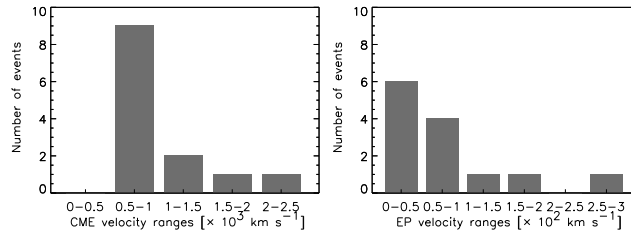
Коефициентът на детерминация $r^2 = 0.49$ показва, че 49% от промените на v_{CME} са в резултат на промени на γ . По-стръмните енергийни спектри на протонни събития (с по-големи стойности на γ) са свързани с по-бързи ИКМ. Този резултат потвърждава, че нискоенергетичните протони имат по-силна зависимост със скоростта на ИКМ [23].



Фигура 4.4: Разпределения по спектрален индекс γ на: (а) средна скорост на ЕП v_{avg} , (б) средна скорост на ЕП за еруптивната фаза v_{er} , (с) скорост на ИКМ и (д) мощност на изригване.

ИКМ са асоциирани с всички от селектираните събития. Разпределението им по скорост на разпространение (Фигура 4.5а) показва, че повечето ИКМ имат линейни скорости $v_{CME} < 1000 \text{ km s}^{-1}$, но нито едно $v_{CME} < 500 \text{ km s}^{-1}$. В 2/13 случая скоростта е в интервала $1000 < v_{CME} < 1500 \text{ km s}^{-1}$, а случаите с $v_{CME} > 1500 \text{ km s}^{-1}$ изглеждат спорадични. Това е в съответствие с други резултати по темата [23].

Отчетените стойности за скорост на протуберансите в еруптивната фаза са в интервала $7 \leq v_{er} \leq 285 \text{ km s}^{-1}$ и обхващат издигането на височини до $0.5R_{\odot}$. Според разпределението на Фигура 4.5б всички разглеждани ЕП имат скорости по-ниски от характерните за еруптивна фаза – 305 km s^{-1} [76] и $\sim 275 \text{ km s}^{-1}$ [45]. Единствено ЕП 9 от 2015/02/21 се приближава до типичните стойности.



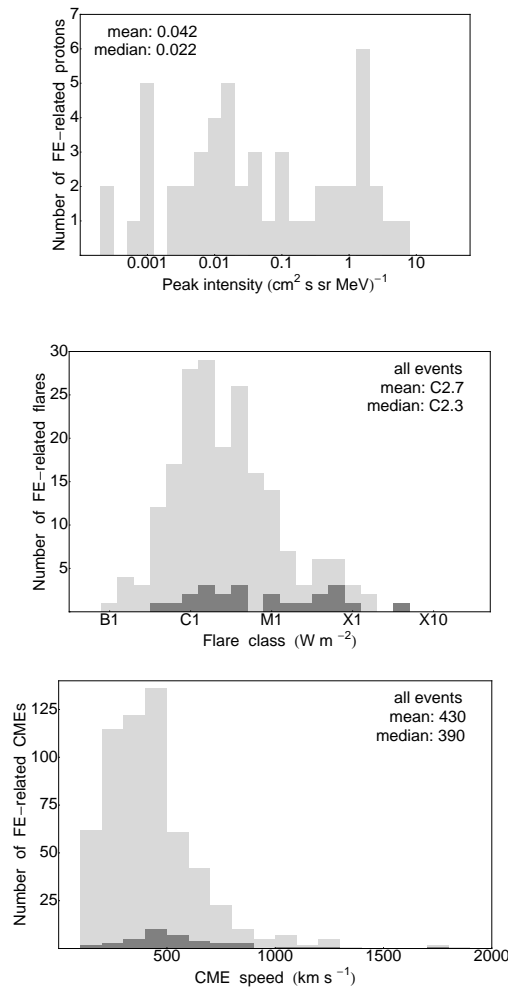
Фигура 4.5: Разпределение по скорости на: (а) асоциираните с изследваните събития ИКМ и (б) ЕП.

4.3.2 Корелационен анализ на връзката на еруптивни протуберанси със заредени частици

За обратната асоциация на влакна с потоци от частици са използвани описаните в каталога на AIA [103] времена на ерупция и данни за асоциираните с протуберансите други активни явления (избухвания, ИКМ, АО). Считаме за свързани ЕП и протонно събитие в случай, че началото на регистрирането на частиците на 1 а. ед. става в рамките на 4 часа след края на ерупцията. Това време е необходимо за ускорението и придвижването на частиците до детекторите особено за събитията, възникващи в източната полусфера на Слънцето. Този времеви интервал е съобразен със средния период между началото на слънчево избухване и съответно протонно събитие, установен от [108] – 4.6/2.3 ч. средноаритметична/медианна стойност. Тези съображения са изпълнени за едва 51 случая от каталога на ЕП, което оценява вероятността за поява на протонно събитие при наблюдение на еруптивен протуберанс на около 5% (51/954). Заради гореописаните критерии и пропуснатите в каталога събития (активни и спокойни протуберанси) този процент може да се разглежда като долна граница на степента на асоциираност.

Предвид представената в каталога на ЕП класификация можем да направим следните изводи: 20/51 влакна, след които се наблюдават протонни събития възникват в спокойни области; 16/51 са ЕП в АО; 4/51 са разположени между АО; само 1 ЕП е разположен близо до екватора; и 7/51 – полярни протуберанси; 3 от случаите не са класифицирани.

Хистограми на асоциираните с ЕП протонни събития, избухвания и ИКМ са представени на Фигура 4.6. Най-отгоре е разпределението на потоците заредени частици по максимален интензитет със средноаритметична/медианна стойност за извадката $0.042/0.022 \text{ (cm}^2 \text{ s sr MeV)}^{-1}$. Разпределението на избухванията по клас (в средата) и на ИКМ по скорост (долу) показват средноаритметични/медианни стойности съответно $С2.7/С2.3$ и $430/390 \text{ km s}^{-1}$ – много по-ниски в сравнение с тези за свър-



Фигура 4.6: Разпределения на свързаните с ЕП протонни събития и асоциирани явления: по интензитет на потоците от частици (горе), по клас на асоциираното с ЕП избухване (в средата) и по скорост на асоциираното с ЕП ИКМ (долу). В тъмно сиво са оцветени свързаните с потоци от частици избухвания/ИКМ.

заните с частици явления на Фигура 4.3.

Нанесените в тъмно сиво разпределения само на активните образувания, асоциирани с протонни събития показват по високи средни стойности – C8.9/C6.9 (средноаритметично/медиана) за клас избухване и 570/510 km s⁻¹ (средноаритметично/медиана) за скорост на ИКМ. Тези резултати потвърждават очакванията, че източниците на заредени частици са сред по-мощните еруптивни явления.

Статистическите различия между резултатите в 4.3.1 и 4.3.2 са определени с помощта на теста на Kolmogorov–Smirnov (Таблица 4.3). Единствената изследвана двойка, която има общ корен в разглежданото ниво на доверие 95% (и ниво на значимост 5%) е тази на всички протонни събития и свързаните с ЕП. За извадките от избухвания и ИКМ, свързани с протони и ЕП лесно откриваме статистически различия – избухванията, източници на потоци заредени частици и тези, асоциирани с ЕП съдържат 2 различни групи от събития, а същото важи и за ИКМ. И за избухвания, и за ИКМ важи зависимостта, че по-мощните явления са свързани повече с регистрацията на заредени частици, отколкото с ЕП.

Таблица 4.3: Таблица на статистическите различия според теста на Kolmogorov–Smirnov. Приема се, че съществува статистическа разлика между две извадки когато изчислената вероятност (D) е по-голяма от избрана референтна стойност на нивото на значимост (в случая 5%), $D_{0.05} = 1.36[(n_1 + n_2)/n_1 * n_2]^{0.5}$, където n_1 и n_2 е броят събития в двете групи.

	Свързаните с частици (n_1) и ЕП (n_2) извадки		
	протони	избухвания	ИКМ
разлика	няма	има	има
вероятности	$D = 0.12$; $D_{0.05} = 0.22$	$D = 0.49$; $D_{0.05} = 0.16$	$D = 0.68$; $D_{0.05} = 0.12$
обем	$n_1 = 156$; $n_2 = 51$	$n_1 = 112$; $n_2 = 197$	$n_1 = 155$; $n_2 = 595$

Глава 5

Заклучение

5.1 Основни резултати и изводи

- След анализ на профилите височина–време, скорост–време и скорост–височина на 41 ЕП по данни от инструмента AIA на SDO са отчетени осцилации на скоростта на издигане на протуберансовото вещество в 34 случая (83%). Подобни движения до момента са наблюдавани единствено при ИКМ [79, 110, 146].
- При 20 от 34 ЕП за времето на изследване е регистрирано повече от едно колебание, което позволява измерване времевите интервали между тях. Строга периодичност не е открита, като интервалите варират между 31 и 244 минути с най-голяма честота в диапазона между 50 и 100 минути. Височините, на които се наблюдава забавяне на издигането, варират в границите 55 000–296 000 km. Първото забавяне обикновено се наблюдава на височина 50 000–100 000 km, а следващите – между 100 000 и 150 000 km.
- Осцилациите не са детектирани при нито един от 10 случая, в които ЕП продължава издигането си в зрителното поле на коронографите C2 и C3 на инструмента LASCO на SOHO.
- Причината за наблюдаваните осцилации вероятно се крие във взаимодействието на магнитната структура, в която протуберансовото вещество остава замръзнало по време на ерупция и обкръжаващите магнитни аркади.
- Заснети и обработени са кадрите на протуберансите и слънчевата корона, видими по време на ПСЗ от 21 август 2017 г. Сред трите видими протуберанса на западния лимб няма нито един еруптивен,

което не позволява изследване на кинематичните им характеристики. Проследено е тяхното формиране назад във времето, потърсени са връзки с други активни образувания, разгледано е обкръжението им по данни от SDO. Над един от протуберансите има ясно изразена коронална кухина – коронални области с по-ниска плътност от обкръжаващата я среда, свободна от затворени магнитни структури. Преминаването на протуберансово вещество по време на ерупция през тях може да послужи като трасер, определящ границите на кухините.

- Представено е най-подробното статистическо изследване на връзката между протуберансите и потоците заредени частици, за което са използвани както космически наблюдения – от SDO, STEREO и SOHO, така и наземни – от H_{α} телескопите в Big Bear Solar Observatory и Kanzelhöhe Observatory. За периода 2010–2016 г. са изследвани 156 протонни събития.
- Установено е, че асоциираните с влакна протонни събития са по-чести от тези, които не са придружени от протуберанс (92–8%).
- Повече събития със заредени частици произлизат от северното полукълбо (57–43%), като предпочитаната полусфера се променя с настъпването на максимума на слънчева активност. Освен това в рамките на изследвания период западната полусфера е предпочитана пред източната (68–32%).
- Типичните области, от които произхождат протонните потоци, са на хелиографски ширини до $\pm 30^{\circ}$ от слънчевия екватор. А най-голям процент от събитията се образуват в зоните със средни ширини около $\pm 15^{\circ}$. Свързаните с протуберанси събития, имат по-широки граници на образуване (регистрирани са и 7 събития в полярните зони).
- 88% от свързаните с протуберанси потоци от заредени частици са свързани с АО. Останалите 12% представляват едва 17 случая за период от 6 години. Случаите на протуберанси извън АО, които се асоциират с енергетични частици, са рядкост. Две такива явления са докладвани и преди [45, 73] – от 2011/11/26 и 2013/09/29, макар че настоящото изследване свързва първото от тях с АО 11353.
- Протонните потоци, асоциирани с протуберанси, често са придружени от радиоизбухвания в короната (56%) и в междупланетната среда (63%). Случаите, в които протоните са придружени както

от коронално, така и от междупланетно радиоизбухване, представляват 45% от събитията с протуберанси, 14% се регистрират само в короната. Признаци на радиоизбухвания тип II в короната не се детектират, но се регистрират междупланетни такива в 19% от случаите, а в останалите 22% няма данни за възникнали радиоизбухвания от тип II.

- Установен е интервал от характерни спектрални индекси за 13 селектирани протонни събития, свързани с влакна – $2.95 \leq \gamma \leq 6.08$. Има съвпадение с определената по-рано долна граница $\gamma \geq 2$ [76], но е по-широк от друг диапазон $4.15 \leq \gamma \leq 4.69$ [45], което се дължи на факта, че настоящото изследване съдържа по-голяма извадка от събития, данни от повече енергийни канали и не всички изследвани събития произхождат извън АО.
- Висока положителна корелация е открита между спектралния индекс γ и скоростта на свързаните със заредените частици ИКМ. Постръмните енергийни спектри на протонни събития (с по-големи стойности на γ) се дължат на по-бързи асоциирани ИКМ в поне 49% от случаите.
- Едва 5% от описаните в каталог с наблюдения от AIA ЕП се свързват с потоци от заредени частици. Тъй като каталогът не съдържа данни за AP и SP, разглеждайки връзката на протонни събития с протуберанси като цяло, тази стойност следва да се възприема като долна граница.

5.2 Основни публикации

Резултатите от настоящата дисертация са публикувани в:

- **Tsvetkov, Ts.**, Miteva, R., Petrov, N.: 2019, *Filaments related to solar energetic particles*, AIP Conference Proceedings, Vol. 2075, Issue 1, id.090013.
- Miteva, R., **Tsvetkov, Ts.**: 2019, *Spectral analysis of SOHO/ERNE protons in solar cycles 23 and 24*, AIP Conference Proceedings, Vol. 2075, Issue 1, id.090014.
- **Tsvetkov, Ts.**, Petrov, N.: 2018, *Three case studies of height-time profiles of prominence eruptions observed by AIA and LASCO*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 177, p. 29-37.

- **Tsvetkov, Ts.**, Miteva, R., Petrov, N.: 2018, *On the relationship between filaments and solar energetic particles*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 179, p. 1-10.
- Bogomolov, A. V., Myagkova, I. N., Myshyakov, I., **Tsvetkov, Ts.**, Kashapova, L., Miteva, R.: 2018, *Comparative analysis of the proton generation efficiency during 17 March 2003 and 11 April 2004 solar flares*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol. 179, p. 517-526.
- Myshiakov, I., **Tsvetkov, Ts.**, Petrov, N.: 2018, *Comparison of kinematics of the solar eruptive prominence and spatial distribution of the magnetic decay index*, Tenth Workshop „Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere“, proceedings of the conference held 4-8 June, 2018 in Primorsko, Bulgaria. Edited by K. Georgieva, B. Kirov and D. Danov., pp. 109-113.
- Myagkova, I., Miteva, R., Kashapova, L., Bogomolov A. V., Petrov. V., **Tsvetkov, Ts.**, Meshalkina, N., Myshyakov, I.: 2018, *The efficiency of solar energetic particle generation: CORONAS-F mission data analysis*, Tenth Workshop „Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere“, proceedings of the conference held 4-8 June, 2018 in Primorsko, Bulgaria. Edited by K. Georgieva, B. Kirov and D. Danov., pp. 114-118.
- **Tsvetkov, Ts.**, Petrov, N.: 2018, *Kinematics of Prominence Eruptions*, Astronomical & Astrophysical Transactions, Vol. 30, Issue 4, p. 479-488.
- Miteva, R., Kashapova, L., Myagkova, I., Meshalkina, N., Petrov, N., Bogomolov, A., Myshyakov, I., **Tsvetkov, Ts.**, Danov, D., Zdanov, D.: 2017, *The origin of SEP events: New research collaboration and network on space weather*, Space, Ecology, Safety - SES 2017, Thirteenth International Scientific conference "Space, Ecology, Safety – SES2017 held 2-4 November 2017 in Sofia, Bulgaria. Edited by G. Mardirossian, Ts. Srebrova and G. Jeleu. ISSN: 1313-3888, p. 57-62.

5.3 Други публикации

- Petrov, N., Kjurkchieva, D., **Tsvetkov, Ts.**: 2018, *Modern History of Astronomy in Bulgaria*, Astronomical & Astrophysical Transactions, Vol. 30, Issue 4, p. 441-452.

- Ovcharov, E., Enikova, P., Kurtenkov, A., Nikolov, G., Trifonov, T., Bozhilov, V., Ganchev, G., **Tsvetkov, Ts.**, Genkova, Ts., Valcheva, A., Nedialkov, P.: 2013, *Probable nova and R-band photometry of another four novae in M31*, The Astronomer's Telegram, No.5569.
- Ovcharov, E., Kurtenkov, A., Enikova, P., Ganchev, G., Bozhilov, V., **Tsvetkov, Ts.**, Genkova, Ts.: 2013, *Optical photometry of B2 2308+34 and MASTER OT J234843.23+250250.4*, The Astronomer's Telegram, No.5564.
- Ovcharov, E., Kurtenkov, A., Enikova, P., Ganchev, G., Bozhilov, V., **Tsvetkov, Ts.**, Genkova, Ts.: 2013, *Optical photometry of BL Lac*, The Astronomer's Telegram, No.5558.

5.4 Участия в научни форуми

Резултатите от настоящата дисертация са представени като доклади:

2019

- Tsvetkov, Ts., Miteva, R., Petrov, N., Myshyakov, I., Dynamic features of eruptive prominences related to solar energetic particles, Fourteenth Annual Conference "Plasma physics in the solar system Moscow, Russia (доклад).
- Kashapova L. K., Miteva R, Myagkova I. N., Bogomolov A. B., Myshyakov I. I., Tsvetkov Ts., On the characteristics of SEP events and their solar sources, Fourteenth Annual Conference "Plasma physics in the solar system Moscow, Russia (доклад).
- Tsvetkov Ts., Miteva R., Temmer M., Petrov N., 3D Analysis of SEP-related CMEs, Fourteenth Annual Conference "Plasma physics in the solar system Moscow, Russia (постер).
- Tsvetkov Ts., Myshyakov I., Petrov N., Relationship between solar eruptive prominences kinematic properties and magnetic decay index, Fourteenth Annual Conference "Plasma physics in the solar system Moscow, Russia (постер).

2018

- Tsvetkov, Ts., Ivanov, E., Petrov, N., Atmospheric phenomena during the total solar eclipse on 21 August 2017, XI Bulgarian-Serbian Astronomical Conference, Белоградчик (доклад).
- Tsvetkov, Ts., Miteva, R., Petrov, N., On the relationship between filament eruptions and solar energetic particles, XI Bulgarian-Serbian Astronomical Conference, Белоградчик (постер).
- Miteva, R., Danov, D., Kashapova, L., Tsvetkov, Ts., Myagkova, I., Meshalkina, N., Petrov, N., Bogomolov, A., Myshyakov, I., Zdanov, D., First year results from the SEP origin project, XI Bulgarian-Serbian Astronomical Conference, Белоградчик (постер).
- Tsvetkov, Ts., Miteva, R., Petrov, N., Prominences and solar energetic particles, X-th Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, Приморско (доклад).
- Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Dynamic properties of prominence eruptions observed by AIA and LASCO, XVIth Hvar Astrophysical Colloquium, Hvar, Croatia (доклад).
- Myshiakov, I., Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Influence of the Magnetic Decay Index Spatial Distribution on the Kinematics of the Solar Eruptive Prominence XVIth Hvar Astrophysical Colloquium, Hvar, Croatia (доклад).
- Tsvetkov, Ts., Miteva, R., Kashapova, L., Myagkova, I., Petrov, N., Meshalkina, N., Bogomolov, A., Myshyakov, I., Zdanov, D., Danov, D., First year results of the Bulgarian-Russian project on the origin of solar energetic particles” XVIth Hvar Astrophysical Colloquium, Hvar, Croatia (постер).
- Tsvetkov, Ts., Miteva, R., Petrov, N., Dynamics of Eruptive Prominences, The International Workshop “Eruptive energy release processes on the Sun and stars: origins and effects”, Irkutsk, Russia.

2017

- Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Kinematics of solar eruptive prominences according to space-based observations, IXth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, Слънчев бряг, България (постер).

- Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Variations in the velocity distribution of eruptive prominences, 15th European Solar Physics Meeting, Budapest, Hungary (постер).
- Miteva, R., Kasharova, L., Myagkova, I., Meshalkina, N., Petrov, N., Bogomolov, A., Myshyakov, I., Tsvetkov, Ts., Danov, D., Zdanov, D., The new SEP-origin project: from network to prospect results, 15th European Solar Physics Meeting, Budapest, Hungary (постер).
- Цветков, Цв., Иванов, Е., Кокотанекова, Р., Димитрова, Р., Петров, Н., Първи резултати от наблюдение на пълното слънчево затъмнение от 21 август 2017 г., XII-та научна конференция на Съюза на астрономите в България, Ивайловград (доклад).
- Miteva, R., Danov, D., Kasharova, L., Myagkova, I., Meshalkina, N., Petrov, N., Bogomolov, A., Myshyakov, I., Tsvetkov, Ts., Zdanov, D., Space weather research: solar energetic particles and their origin, XII-та научна конференция на Съюза на астрономите в България, Ивайловград (доклад).
- Tsvetkov, Ts., Miteva, R., Petrov, N., Relationship between solar eruptive events and energetic particles, Thirteenth International Scientific conference "Space, Ecology, Safety - SES2017 София (доклад).
- Tsvetkov, Ts., Rudawy, P., Petrov, N., Zapior, M., Plasma velocities of the fine structure of solar prominences, Thirteenth International Scientific conference "Space, Ecology, Safety - SES2017 София (постер).

2016

- Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Kinematics of prominence eruptions, X Serbian-Bulgarian Astronomical Conference, Belgrade, Serbia.
- Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Velocity variations of eruptive prominences, XIVth Hvar Astrophysical Colloquium, Hvar, Croatia (доклад).
- Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Kinematics of Prominence Eruptions, International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun-Earth System, ISROSES III, Златни пясъци, България (постер).
- Tsvetkov, Ts., Petrov, N., Dynamics of Eruptive Prominences, 4th SOLARNET Workshop, United Kingdom (доклад).

5.5 Минимални национални изисквания

Таблица 5.1: Минимални изисквани точки за придобиване на образователна и научна степен „доктор“ според ЗРАС от 13 февруари 2019 г.

Показател	Критерий	Необходим брой точки	Натрупан брой точки
Дисертационен труд за присъждане на образователна и научна степен „доктор“	50	50	50
Публикувана монография, която не е представена като основен хабилитационен труд	30		0
Публикувана книга на базата на защитен дисертационен труд за присъждане на образователна и научна степен "доктор"	30		0
Научна публикация в издания, които са реферирани и индексирани в световноизвестни бази данни с научна информация (Web of Science и Scopus), извън хабилитационния труд	25 т. – Q1 20 т. – Q2 15 т. – Q3 12 т. – Q4 10 т. – издание със SJR без IF 6 т. – други	30	3×20 т. + 2×10 т. + 3×6 т. = 98 т.
Публикувана глава от колективна монография	15		0
Изобретение, патент или полезен модел, за което е издаден защитен документ по надлежния ред	25		0
Публикувана заявка за патент или полезен модел	15		0
Общо		80	148

5.6 Благодарности

Научната работа по време на докторантурата ми е обезпечена благодарение на:

- Националната програма „Млади учени и постдокторанти“ на Министерство на образованието и науката, одобрена с РМС No. 577/17.08.2018 г. с проект на тема: „Изследване на активни процеси на Слънцето“.
- Проекти към Фонд научни изследвания:
 - „Изследване на активни слънчеви процеси по време на пълни слънчеви затъмнения и извън тях“ с договор No. КП-06-Н28/4.
 - „Произход на слънчевите енергетични частици: слънчеви избухвания или коронални изнасяния на маса“ по програма за двустранно сътрудничество 2016 г. България–Русия с договор ДНТС Русия 01/6 (23.06.2017 г.).
 - „Пренос на маса и ъглов момент в астрофизиката“ с договор 08/1 от 13.12.2016 г.
- Проект за двустранно сътрудничество:
 - България–Полша: „Дестабилизация и ерупция на спокойни и активни протуберанси: наблюдения и анализ“, P-25/06.08.2015 г.
 - България–Сърбия: „Оптично търсене на остатъци от свръхнови и III региони в близки галактики (M81 и M101 групи от галактики)“, P-22/04.07.2017 г.

Дисертантът изказва специални благодарности на гл. ас. д-р Галин Борисов за помощта при разработването на процедурата за определяне кинематичните характеристики на протуберансите по данни от космическата обсерватория SDO.

Приложение А

Списък на изследвани протуберанси

Таблица А.1 включва списък на всички протуберанси, включени в изследванията в Глава 3. Обобщени са техните характеристики като начален час на измерванията в полетата на различните инструменти, в които влакното се наблюдава (AIA и коронографите на LASCO), локация (дали средната хелиографска ширина на протуберанса надвишава 50° ; със СШ са маркирани протуберансите, които се наблюдават на средни ширини, а с ПШ – тези близо до полюсите), тип на протуберанса според МИЛ, върху която е образуван (ПАО – протуберанс в АО, ПСО – протуберанс извън АО, ПМАО – протуберанс, разположен между две АО, ПП – протуберанс от полярните области), вид на протуберанса (симетричен или асиметричен) и типа на ерупцията според количеството вещество напускащо гравитационното поле на Слънцето (пълна, частична или ограничена). В случай, че протуберансът е асоцииран с една или повече АО, или ИКМ са отбелязани и техните основни параметри (номер на АО, начален час, линейна скорост, ъглов размер и позиционен ъгъл на ИКМ).

Таблица А.1: Списък на изследваните протуберанси, техните характеристики и асоциираните с тях явления: АО (номер според NOAA), ИКМ (време на първа поява в коронографите на LASCO/SOHO, линейна скорост v , ъглов размер и среден позиционен ъгъл). Посочените часове са в универсално време (UT), скоростта - в km s^{-1} , ъгловите размери и позиционните ъгли на ИКМ - в градуси. Съкращения: v - скорост, СШ - средни ширини, ПШ - полярни ширини, ПАО - протуберанс в активна област, ПСО - протуберанс в спокойна област, ПМАО - протуберанс между АО, ПП - полярен протуберанс, С - симетричен (протуберанс), А - асиметричен, П - пълна (ерупция), Ч - частична, О - ограничена, Д - да.

No.	Дата гггг/мм/дд	Начален час			АО	ИКМ	v	размер	ъгъл	Локация	Тип	Вид ЕП	Вид ерушция
		А1А	С2	С3									
1	2010/08/07	06:00			няма	228	82	250	СШ	ПСО	А	Ч	
2	2010/08/12-13	23:00			няма		няма		СШ	ПСО	А	П	
3	2010/08/25	01:00			няма		няма		ПШ	ПП	А	Ч	
4	2010/08/27-28	23:00			няма	11:12	34	323	ПШ	ПП	С	О	
5	2010/09/10	12:00			няма	12:24	37	316	ПШ	ПП	С	П	
6	2010/09/12	05:50			няма		няма		ПШ	ПП	С	О	
7	2010/09/30	18:30	01:25	03:30	няма	23:05	95	258	СШ	ПСО	А	П	
8	2011/01/22a	11:00			няма		няма		СШ	ПСО	С	Ч	
9	2011/01/22b	21:00	01:48		няма	00:48	113	302	СШ	ПСО	С	П	
10	2011/01/24	00:00	04:48	08:06	няма	02:00	79	260	ПШ	ПП	А	Ч	
11	2011/01/25	02:00			няма		няма		СШ	ПСО	А	Ч	
12	2011/01/28	00:00			няма	05:00	45	116	СШ	ПСО	С	Ч	
13	2011/02/04	15:00			няма	20:00	5	81	СШ	ПСО	С	О	
14	2011/02/06	00:00			няма		няма		СШ	ПСО	А	О	
15	2011/02/23-24	21:00			няма	00:48	32	121	СШ	ПСО	А	О	
16	2011/02/25	16:30			няма		няма		ПШ	ПП	А	Ч	
17	2011/03/7a	15:15			11164		няма		СШ	ПАО	А	П	
18	2011/03/7b	19:45	20:24	21:18	няма	20:00	360	Хало	СШ	ПАО	А	П	
19	2011/03/20	15:00			няма		няма		СШ	ПСО	А	О	
20	2011/05/30	09:00			няма	10:00	88	52	СШ	ПСО	А	П	
21	2011/05/31	10:00			няма	14:12	75	72	СШ	ПСО	А	Ч	
22	2011/06/05	11:30			няма	16:59	47	103	СШ	ПСО	А	О	

Таблица А.1: продължение

No.	Дата гггг/мм/дд	Начален час		АО	час	v	ИКМ	размер	тъгъл	Локация	Тип	Вид ЕП	Вид сгупция
		А1А	С2										
23	2011/06/06	03:00	08:29	10:35	няма	07:30	582	72	241	ППШ	ПП	С	Ч
24	2011/06/11	16:30			няма	19:47	449	9	77	ППШ	ПП	А	Ч
25	2012/03/04	11:15			11429	11:00	1306	360	Нало	СШ	ПАО	С	О
26	2012/07/28-29	15:30	01:25		няма	23:48	460	113	136	СШ	ПСО	А	Ч
27	2012/10/07	03:00			няма	07:36	564	29	220	ППШ	ПП	А	П
28	2013/02/27	00:00	05:30	06:42	няма	04:00	622	138	259	СШ	ПСО	С	П
29	2013/04/19	14:00			няма	16:48	266	56	358	ППШ	ПП	А	Ч
30	2014/02/11	18:40			11972	19:24	613	>271	248	СШ	ПМАО	С	П
31	2014/03/24	05:00			11975				288	СШ	ПАО	А	Ч
32	2014/11/01	04:00	05:24		12004	07:12	809	159		СШ	ПАО	А	Ч
					12200			няма		СШ	ПМАО	С	П
					12201								
33	2014/11/09	09:00			12207	10:24	633	131	312	СШ	ПМАО	С	Ч
					12208								
34	2015/02/21	09:20	10:12	11:18	няма	09:24	1120	360	Хало	СШ	ПСО	С	П
35	2015/04/12-13	22:00			12318	23:48	678	175	296	СШ	ПМАО	А	О
					12320								
36	2015/05/12	02:00			12335	02:48	772	250	286	СШ	ПМАО	С	П
					12337								
37	2015/06/18	00:30			12365	01:26	1714	195	279	СШ	ПМАО	С	П
					12368								
38	2015/07/19	08:00	10:12	11:18	12384	09:48	782	194	246	СШ	ПАО	С	П
39	2016/06/25	02:00			Д ^c	02:48	540	128	82	СШ	ПАО	А	Ч
40	2016/07/29	07:00			12569		няма			СШ	ПАО	С	О
41	2017/01/02	08:00			12622		няма			СШ	ПАО	С	О

^cПротуберансът се асоциира с малка недобре развита АО, която не получава NOAA номер, но се отличава по магнитограми на Слънцето.

Приложение Б

Списък на протонни събития и асоциирани явления

Таблица Б.1 включва списък на протонните събития, регистрирани от SOHO/ERNE 20 MeV за периода 2010–2016 г. и избрани параметри на асоциираните с тях слънчеви избухвания, ИКМ, влакна и тип II радиоизбухвания (по наземни наблюдения за коронални и космически – за междупланетни признаци на радиоизбухване). В случаите, когато протуберанс е асоцииран с протонно събитие, в таблицата е посочено дали протуберансът произхожда от АО, както и дали е публикуван в каталога с еруптивни протуберанси [103]. Всички тези случаи са част от изследванията в Глава 4.

Приложение Б. Списък на протонни събития и асоциирани явления¹⁰³

Таблица Б.1: Списък на събитията със слънчеви енергетични частици детектирани от ~ 20 MeV SOHO/ERNE (2010–2016) и асоциирани слънчеви структури: слънчеви избухвания (клас/начален час), ИКМ (време на първа поява в коронографите на LASCO/SOHO, линейна скорост), протуберанси (Д/Н и свързани АО), поява на тип II радиоизбухване (в короната: д/н, в междупланетното пространство: Д/Н), дали влакното е публикувано в онлайн каталогът на [103] (Д/Н). Времената са в универсално време (UT); скоростта – в km s^{-1} . Съкращения: v – скорост g – липса на данни; д/Д – да; н/Н – не; u – неопределеност/несигурност.

Протонно събитие	Избухване	ИКМ	Протуберанси	Тип	Каталог		
гггг/мм/дд	час	клас/час	поява/ v	Д/Н	АО	II	Д/Н
2010/02/12	17	M8.3/11:19	u	Н	-	дН	-
2010/06/12	3	M2.0/00:30	01:32/486	Н	-	дД	-
2010/08/14	11	C4.4/09:38	10:12/1205	Д	11097	дД	Н
2010/08/18	7	C4.5/04:45	05:48/1471	Д	11098	дД	Н
2010/08/31	23	u	21:17/1304	Д	Д	нД	Н
2010/09/08	25	C3.3/23:05	23:27/818	Д	11105	нД	Н
2010/12/31	6	C1.3/04:18	05:00/363	Н	-	дН	-
2011/01/28	2	M1.3/00:44	01:26/606	Д	11149	дД	Д
2011/02/15	4	X2.2/01:44	02:24/669	Д	11158	дД	Д
2011/03/07	17	C5.8/14:46	15:50/698	Д	11163	дД	Н
2011/03/07	22	M3.7/19:43	20:00/2125	Д	11164	дД	Д
2011/03/16	22	C3.7/17:52	19:12/682	Д	11166/11169	uН	Н
2011/03/21	5	u	02:24/1341	Д	11174	дД	Н
2011/03/29	22	u	20:36/1264	Д	11180/11183	нН	Д
2011/05/11	4	B8.1/02:23	02:48/745	Д	11203/11205	дД	Д
2011/06/04	12	u	06:48/1407	Д	Д	нД	Н
2011/06/07	9	M2.5/06:16	06:49/1255	Д	11233	дД	Д
2011/06/11	13	u	12:00/522	Д	Н	нН	Д
2011/08/02	7	M1.4/05:19	06:36/712	Д	11261	дД	Н
2011/08/03	15	M6.0/13:17	14:00/610	Д	11261	дД	Н
2011/08/04	6	M9.3/03:41	04:12/1315	Д	11261	дД	Д
2011/08/08	19	M3.5/18:00	18:12/1343	Д	11261/11263	дД	Н
2011/08/09	9	X6.9/07:48	08:12/1610	Д	11263	дД	Н
2011/09/04	6	C9.0/04:36	05:12/262	Д	11280	дН	Н
2011/09/04	32	C7.9/23:58	00:48/622	Н	-	нН	-
2011/09/06	3	M5.3/01:35	02:24/782	Д	11283	дД	Д
2011/09/07	2	X2.1/22:12	23:05/575	Д	11283	дД	Д
2011/09/21	24	u	22:12/1007	Н	-	нН	-
2011/10/22	12	M1.3/10:00	10:24/1005	Д	11314	нД	Н
2011/11/03	24	M2.1/23:28	23:30/991	Д	11330/11333	нД	Н
2011/11/17	8	u	20:36/1041	Д	11353	нД	Н
2011/11/26	9	C1.2/06:09	07:12/933	Д	11353	нД	Д
2012/01/19	19	M3.2/13:44	14:36/1120	Д	11402	нД	Д
2012/01/27	20	C2.4/14:31	15:13/2508	Д	Н	дД	-
2012/02/24	5	u	03:46/800	Д	Н	нД	-
2012/03/04	19	M2.0/10:29	11:00/1306	Д	11429	нД	Н

Приложение Б. Списък на протонни събития и асоциирани явления¹⁰⁴

Таблица Б.1: продължение

Протонно събитие	Избухване	ИКМ	Протуберанси	Тип	Каталог		
гггг/мм/дд	час	клас/час	поява/ v	Д/Н	АО	П	Д/Н
2012/03/07	7	X1.3/01:05	01:30/1825	Д	11429/11430	дД	Н
2012/03/13	19	M7.9/17:12	17:36/1884	Д	11429	нД	Н
2012/03/29	31	B6.2/23:19	23:36/753	Д	11442	нН	Д
2012/04/05	24	C1.5/20:49	21:25/828	Д	11450	дД	Д
2012/04/09	15	C3.9/12:12	12:36/921	Д	11452	дД	Д
2012/04/18	42	C1.8/14:42	15:12/540	Д	11462	нН	Н
2012/04/20	3	B9.0/01:55	02:00/345	Д	11463	нН	Н
2012/05/17	3	M5.1/01:25	01:48/1582	Д	11476	дД	Д
2012/05/26	22	u	20:58/1966	Д	11484	дД	Н
2012/06/02	7	C1.5/04:15	04:36/1175	Д	Д	нН	Н
2012/06/08	7	C7.7/02:51	03:47/353	Д	11494	дН	Д
2012/06/12	11	u	05:24/864	Д	11494/11499	нН	Н
2012/06/14	17	M1.9/12:52	14:12/987	Д	11505	нД	Н
2012/07/06	24	X1.1/23:01	23:24/1828	Д	11515	дД	Н
2012/07/12	18	X1.4/15:37	16:48/885	Д	11520	дД	Н
2012/07/17	16	M1.7/12:03	13:48/958	Д	Н	нД	Н
2012/07/19	9	M7.7/04:17	05:24/1631	Д	11520	дД	Н
2012/07/23	8	u	02:36/2003	Д	11523	дД	Д
2012/08/31	23	C8.4/19:45	20:00/1442	Д	Д	нД	Д
2012/09/08	12	g	10:00/734	Д	11562/11564	нД	Н
2012/09/21	12	u	06:24/639	Н	-	нН	-
2012/09/27	g	C3.7/23:36	24:12/947	Д	11575/11577	дД	Д
2012/10/07	16	u	07:36/663	Д	Н	нН	Н
2012/11/08	g	u	11:00/972	Д	Д	нД	Н
2013/02/06	16	C8.7/00:04	00:24/1867	Д	11667	дН	Д
2013/02/26	13	u	09:12/987	Д	11675	нД	Н
2013/03/05	14	u	03:48/1316	Д	Д	нД	Н
2013/03/15	18	M1.1/05:46	07:12/1063	Д	11692	нД	Н
2013/04/11	8	u	07:24/861	Д	11719	дД	Н
2013/04/21	11	u	07:24/919	Н	-	ну	-
2013/04/24	24	C1.2/21:50	22:12/594	Д	11723	нН	Н
2013/05/02	9	M1.1/04:58	05:24/671	Д	11731	дН	Н
2013/05/13	20	X2.8/15:48	16:08/1850	Д	11745	дД	Н
2013/05/15	10	X1.2/01:25	01:48/1366	Д	11738	дД	Д
2013/05/22	15	M5.0/13:08	12:26/1466	Д	11745	дД	Н
2013/06/21	13	M2.9/02:30	03:12/1900	Д	11777	нД	Н
2013/06/28	8	C4.4/01:36	02:00/1037	Н	-	нД	-
2013/08/17	21	M3.3/18:16	19:12/1202	Д	11818	дД	Д
2013/08/20	5	u	08:12/784	Д	Н	нН	Н
2013/08/30	7	C8.3/02:04	02:48/949	Д	11836	дД	Н

Приложение Б. Списък на протонни събития и асоциирани явления 105

Таблица Б.1: продължение

Протонно събитие	Избухване	ИКМ	Протуберанси	Тип	Каталог		
гггг/мм/дд	час	клас/час	поява/ v	Д/Н	АО	П	Д/Н
2013/09/24	32	u	20:36/919	Д	Н	нН	Д
2013/09/29	43	C1.2/21:43	22:12/1179	Д	Н	дД	Д
2013/10/11	19	M1.5/07:01	07:24/1200	Д	Н	дД	Н
2013/10/22	24	M4.2/21:15	21:48/459	Д	11873/11875	дД	Н
2013/10/25	13	X2.1/14:51	15:12/587	Д	11882	дД	Н
2013/10/28	7	M5.1/04:32	04:48/1201	Д	11875	дД	Д
2013/12/07	12	M1.2/07:17	07:36/1085	Д	Д	дД	Н
2013/12/12	6	C4.6/03:11	03:36/1002	Д	11912	дД	Н
2013/12/13	29	u	21:24/518	Д	Д	нН	Н
2013/12/26	8	u	03:34/1336	Д	Д	нД	Н
2013/12/28	20	C9.3/17:53	17:36/1118	Д	11936	нД	Н
2014/01/04	23	M4.0/18:47	21:23/977	Н	-	нН	-
2014/01/06	9	u	08:00/1402	Д	11937/11938	дД	Д
2014/01/07	21	X1.2/18:04	18:24/1830	Д	11943/11944	дД	Н
2014/01/20	31	C3.6/21:39	22:00/721	Д	Д	нД	Н
2014/01/21	20	M1.3/18:57	18:48/1035	Н	-	уН	-
2014/02/11	15	C8.4/13:15	13:48/330	Д	11974	дН	Н
2014/02/11	24	u	19:24/613	Д	11975	уД	Н
2014/02/14	13	u	08:48/1165	Д	11974	нН	Н
2014/02/16	11	M1.1/09:20	10:00/634	Д	11977	ну	Н
2014/02/18	5	C3.3/09:49	01:36/779	Д	Н	дН	Д
2014/02/20	8	M3.0/07:26	08:00/948	Д	Д	дД	Н
2014/02/25	5	X4.9/00:39	01:26/2147	Д	11990	дД	Д
2014/03/22	13	u	10:00/756	Д	12005	нН	Н
2014/03/24	12	u	07:12/809	Д	Д	нН	Н
2014/03/28	25	M2.6/23:44	23:48/514	Д	12017	дД	Н
2014/03/29	19	X1.0/17:35	18:12/528	Д	12017/12018	дД	Н
2014/04/02	25	M6.5/13:18	13:36/1471	Д	12027	дД	Д
2014/04/05	4	u	06:24/798	Д	12021	нН	Н
2014/04/18	14	M7.3/12:31	13:26/1203	Д	Д	дД	Н
2014/04/25	2	X1.3/00:17	00:48/456	Д	12046	дН	Н
2014/05/07	19	M1.2/16:07	16:24/923	Д	12055/12056	нД	Н
2014/05/09	4	u	02:48/1099	Д	12049	дД	Д
2014/06/06	13	u	12:48/704	Д	Н	дН	Н
2014/06/12	25	M3.1/21:34	22:12/684	Д	12085	дД	Н
2014/06/17	17	C3.0/08:13	09:12/1198	Д	12093/12094	нН	Н
2014/07/08	18	M6.5/16:06	16:36/773	Д	12113	дН	Д
2014/08/22	13	u	11:12/600	Д	12139	дД	Н
2014/08/25	18	M2.0/14:46	15:36/55	Д	Д	дД	Н
2014/08/29	3	u	17:24/766	Д	Н	уН	Н

Приложение Б. Списък на протонни събития и асоциирани явления 106

Таблица Б.1: продължение

Протонно събитие		Избухване	ИКМ	Протуберанси		Тип	Каталог
гггг/мм/дд	час	клас/час	поява/ v	Д/Н	АО	П	Д/Н
2014/09/02	5	u	11:12/1901	Д	Н	дД	Д
2014/09/10	26	X1.6/17:21	18:00/1267	Д	12158	дД	Н
2014/09/22	9	u	06:12/618	Д	Н	нД	Н
2014/09/24	30	u	21:30/1350	Д	Н	дД	Н
2014/10/02	21	M7.3/18:49	19:12/513	Д	12173	дН	Н
2014/10/10	19	C3.0/15:42	16:12/782	Д	12182	нН	Н
2014/10/13	4	u	00:12/521	Д	12184	нН	Н
2014/10/15	24	M2.2/19:07	18:48/848	Д	12129	uН	Н
2014/11/01	9	C2.7/04:44	05:00/1628	Д	12200	ду	-
2014/11/07	6	M2.0/04:12	04:38/672	Н	-	ну	-
2014/11/09	14	u	10:24/633	Д	12207	нН	-
2014/11/10	11	C7.6/02:18	03:36/230	Н	-	нН	-
2014/12/05	8	C2.1/05:28	06:24/534	Н	-	дН	-
2014/12/13	11	g	14:24/2222	Д	12227	дД	-
2015/02/21	11	u	09:24/1120	Д	Н	нН	-
2015/04/12	26	C6.4/23:24	23:48/678	Д	12320	дН	-
2015/04/14	15	u	02:36/1198	Д	12321	дН	-
2015/05/06	15	M1.9/11:45	12:12/738	Д	12329	дН	-
2015/05/12	5	C2.6/02:15	02:48/772	Д	12335/12337	дН	-
2015/06/14	8	C5.9/03:48	04:12/1228	Д	12365	нН	-
2015/06/18	4	M1.2/00:33	01:26/1714	Д	12365	нН	-
2015/06/21	19	M2.6/02:06	02:36/1366	Д	12371	дД	-
2015/07/01	16	u	14:36/1435	Д	Н	uД	-
2015/07/19	12	C2.1/09:22	09:48/782	Д	12384	нН	-
2015/08/24	10	M5.6/07:26	08:48/272	Д	12403	нН	-
2015/09/20	19	M2.1/17:32	18:12/1239	Д	12418	дД	-
2015/09/30	19	g	09:36/586	Д	12422	нН	-
2015/10/22	7	C4.4/02:13	03:12/817	Д	12434	нН	-
2015/10/29	3	u	02:36/530	Д	12437	дД	-
2015/11/04	16	M3.7/13:31	14:48/578	Д	12443	дД	-
2015/11/09	22	M3.9/12:49	13:25/1041	Д	12449	дД	-
2015/12/28	14	M1.8/11:20	12:12/1212	Д	12472	нД	-
2016/01/01	24	M2.3/23:10	23:24/1730	Д	12473	дН	-
2016/01/28	13	C9.6/11:48	12:24/562	Д	12488	нН	-
2016/01/29	24	C2.0/20:48	22:12/800	Д	12488	нН	-
2016/02/11	27	C8.9/20:18	21:18/719	Д	12497	дН	-
2016/03/16	8	C2.2/06:34	07:00/592	Д	12522	дН	-
2016/04/18	27	M6.7/00:14	00:48/1084	Д	Д	дН	-
2016/05/15	17	C3.2/15:19	15:12/1118	Д	12544	uН	-
2016/07/20	25	C4.6/22:03	23:12/426	Д	12565/12657	нН	-

Библиография

- [1] D. Alexander, R. Liu, and H. R. Gilbert. Hard X-Ray Production in a Failed Filament Eruption. *Astrophys. J.*, 653:719–724, Dec. 2006.
- [2] I. Arregui, R. Oliver, and J. L. Ballester. Prominence oscillations. *Living Reviews in Solar Physics*, 9(1):2, Apr 2012.
- [3] H. W. Babcock and H. D. Babcock. The Sun’s Magnetic Field, 1952-1954. *Astrophys. J.*, 121:349, Mar. 1955.
- [4] F. Baily. Eclipse, solar, observations of the, of July 7, 1842. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 5:208, Nov. 1842.
- [5] D. N. Baker, S. G. Kanekal, J. B. Blake, and T. I. Pulkkinen. The global efficiency of relativistic electron production in the Earth’s magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, 106:19169–19178, Sept. 2001.
- [6] V. S. Bashkirtsev, N. I. Kobanov, and G. P. Mashnich. Observations of longperiod mass velocity oscillations in the sun’s chromosphere. *Solar Phys.*, 109:399–402, Sept. 1987.
- [7] R. D. Bentely and S. L. Freeland. SOLARSOFT - an Analysis Environment for Solar Physics. In *Crossroads for European Solar and Heliospheric Physics. Recent Achievements and Future Mission Possibilities*, volume 417 of *ESA Special Publication*, page 225, 1998.
- [8] T. Berger. The Prominence/Coronal Cavity System: A Unified View of Magnetic Structures in the Solar Corona. In T. R. Rimmele, A. Tritschler, F. Wöger, M. Collados Vera, H. Socas-Navarro, R. Schlichenmaier, M. Carlsson, T. Berger, A. Cadavid, P. R. Gilbert, P. R. Goode, and M. Knölker, editors, *Second ATST-EAST Meeting: Magnetic Fields from the Photosphere to the Corona.*, volume 463 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 147, Dec. 2012.

- [9] R. J. Bessey and D. H. Liebenberg. Coronal temperature measurements near a helmet structure base at the 1973 solar eclipse. *Solar Phys.*, 94:239–247, Sept. 1984.
- [10] D. H. Boteler. Geomagnetic Effects on the Pipe-To-Soil Potentials of A Continental Pipeline. *Advances in Space Research*, 26:15–20, 2000.
- [11] W. B. Cade and C. Chan-Park. The Origin of “Space Weather”. *Space Weather*, 13:99–103, Feb. 2015.
- [12] H. V. Cane, S. W. Kahler, and N. R. Sheeley, Jr. Interplanetary shocks preceded by solar filament eruptions. *J. Geophys. Res.*, 91:13321–13329, Dec. 1986.
- [13] R. Chandra, N. Gopalswamy, P. Mäkelä, H. Xie, S. Yashiro, S. Akiyama, W. Uddin, A. K. Srivastava, N. C. Joshi, R. Jain, A. K. Awasthi, P. K. Manoharan, K. Mahalakshmi, V. C. Dwivedi, D. P. Choudhary, and N. V. Nitta. Solar energetic particle events during the rise phases of solar cycles 23 and 24. *Advances in Space Research*, 52:2102–2111, Dec. 2013.
- [14] P. F. Chen. Coronal Mass Ejections: Models and Their Observational Basis. *Living Reviews in Solar Physics*, 8:1, Apr. 2011.
- [15] P. F. Chen and K. Shibata. An Emerging Flux Trigger Mechanism for Coronal Mass Ejections. *Astrophys. J.*, 545:524–531, Dec. 2000.
- [16] D. Cirigliano, J.-C. Vial, and M. Rovira. Prominence corona transition region plasma diagnostics from SOHO observations. *Solar Phys.*, 223:95–118, Sept. 2004.
- [17] H. E. Coffey and C. D. Hanchett. Digital “Cartes Synoptiques de la Chromosphere Solaire et Catalogues des Filaments et des Centres d’Activite”. In D. F. Webb, B. Schmieder, and D. M. Rust, editors, *IAU Colloq. 167: New Perspectives on Solar Prominences*, volume 150 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 488, 1998.
- [18] L. D’Azambuja. L’œuvre de BERNARD LYOT. *L’Astronomie*, 66:265, July 1952.
- [19] M. D’Azambuja and L. D’Azambuja. *Ann. Obs. Paris, Meudon*, 6, July 1948.

- [20] C. de Jager. Structure and Dynamics of the Solar Atmosphere. *Handbuch der Physik*, 52:80, 1959.
- [21] V. Dermendzhiev. *Spokoynoto i aktivnoto slynce*. Acad. press "Prof. Marin Drinov 1997.
- [22] H. A. Deslandres. Observation de l'Éclipse Totale du Soleil du 16 Avril 1893 – Rapport de la Mission Envoyée au Sénégal par le Bureau des Longitudes Pour l'Étude Physique du Phénomène. *Annales du Bureau des Longitudes, Gauthier-Villars, Paris*, 5:C1–C74, 1897.
- [23] M. Dierckxsens, K. Tziotziou, S. Dalla, I. Patsou, M. S. Marsh, N. B. Crosby, O. Malandraki, and G. Tsiropoula. Relationship between Solar Energetic Particles and Properties of Flares and CMEs: Statistical Analysis of Solar Cycle 23 Events. *Solar Phys.*, 290:841–874, Mar. 2015.
- [24] V. Domingo, B. Fleck, and A. I. Poland. The SOHO Mission: an Overview. *Solar Phys.*, 162:1–37, Dec. 1995.
- [25] V. Domingo, R. J. Hynds, and G. Stevens. a Solar Proton Event of Possible Non-Flare Origin. *International Cosmic Ray Conference*, 5:192, 1979.
- [26] A. Driesman, S. Hynes, and G. Cancro. The STEREO Observatory. *Space Sci. Rev.*, 136:17–44, Apr. 2008.
- [27] O. Engvold. Thermodynamic models and fine structure of prominences. *Solar Phys.*, 67:351–355, Sept. 1980.
- [28] O. Engvold and N. Brynildsen. Temperatures of quiescent prominences measured from hydrogen Paschen and CaII IR lines. In A. I. Poland, editor, *NASA Conference Publication*, volume 2442 of *NASA Conference Publication*, Dec. 1986.
- [29] O. Engvold, T. Hirayama, J. L. Leroy, E. R. Priest, and E. Tandberg-Hanssen. Hvar Reference Atmosphere of Quiescent Prominences. In V. Ruzdjak and E. Tandberg-Hanssen, editors, *IAU Colloq. 117: Dynamics of Quiescent Prominences*, volume 363 of *Lecture Notes in Physics*, Berlin Springer Verlag, page 294, 1990.
- [30] Y. Fan. Coronal Mass Ejections as Loss of Confinement of Kinked Magnetic Flux Ropes. *Astrophys. J.*, 630:543–551, Sept. 2005.

- [31] J. Feynman and S. F. Martin. The initiation of coronal mass ejections by newly emerging magnetic flux. *J. Geophys. Res.*, 100:3355–3367, Mar. 1995.
- [32] L. A. Fisk. The Open Magnetic Flux of the Sun. I. Transport by Reconnections with Coronal Loops. *Astrophys. J.*, 626:563–573, June 2005.
- [33] T. G. Forbes. Formation and support of prominence. In A. I. Poland, editor, *NASA Conference Publication*, volume 2442 of *NASA Conference Publication*, Dec. 1986.
- [34] T. G. Forbes and E. R. Priest. Photospheric Magnetic Field Evolution and Eruptive Flares. *Astrophys. J.*, 446:377, June 1995.
- [35] G. Forti and G. Godoli. Lettera alla Direzione - Sulla durata delle protuberanze quiescenti osservate sul disco solare. *Memorie della Società Astronomia Italiana*, 36:399, Sept. 1965.
- [36] V. Gaizauskas. On driving the eruption of a solar filament. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 58:331–335, 1990.
- [37] C. L. Gerrard, T. D. Arber, A. W. Hood, and R. A. M. Van der Linden. Numerical simulations of kink instability in line-tied coronal Loops. *Astron. Astrophys.*, 373:1089–1098, July 2001.
- [38] S. E. Gibson, D. Foster, J. Burkepile, G. de Toma, and A. Stanger. The Calm before the Storm: The Link between Quiescent Cavities and Coronal Mass Ejections. *Astrophys. J.*, 641:590–605, Apr. 2006.
- [39] S. E. Gibson, T. A. Kucera, D. Rastawicki, J. Dove, G. de Toma, J. Hao, S. Hill, H. S. Hudson, C. Marqu , P. S. McIntosh, L. Rachmeler, K. K. Reeves, B. Schmieder, D. J. Schmit, D. B. Seaton, A. C. Sterling, D. Tripathi, D. R. Williams, and M. Zhang. Three-dimensional morphology of a coronal prominence cavity. *Astrophys. J.*, 724(2):1133–1146, nov 2010.
- [40] H. Gilbert, G. Kilper, and D. Alexander. Observational Evidence Supporting Cross-field Diffusion of Neutral Material in Solar Filaments. *Astrophys. J.*, 671:978–989, Dec. 2007.
- [41] H. R. Gilbert, D. Alexander, and R. Liu. Filament Kinking and Its Implications for Eruption and Re-formation. *Solar Phys.*, 245:287–309, Oct. 2007.

- [42] H. R. Gilbert, A. G. Daou, D. Young, D. Tripathi, and D. Alexander. The Filament-Moreton Wave Interaction of 2006 December 6. *Astrophys. J.*, 685:629–645, Sept. 2008.
- [43] H. R. Gilbert, T. E. Holzer, and R. M. MacQueen. A New Technique for Deriving Prominence Mass from SOHO/EIT Fe XII (19.5 Nanometers) Absorption Features. *Astrophys. J.*, 618:524–536, Jan. 2005.
- [44] N. Gopalswamy. Coronal Mass Ejections of Solar Cycle 23. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 27:243–254, Sept. 2006.
- [45] N. Gopalswamy, P. Mäkelä, S. Akiyama, S. Yashiro, H. Xie, N. Thakur, and S. W. Kahler. Large Solar Energetic Particle Events Associated with Filament Eruptions Outside of Active Regions. *Astrophys. J.*, 806:8, June 2015.
- [46] N. Gopalswamy, M. Shimojo, W. Lu, S. Yashiro, K. Shibasaki, and R. A. Howard. Prominence Eruptions and Coronal Mass Ejection: A Statistical Study Using Microwave Observations. *Astrophys. J.*, 586:562–578, Mar. 2003.
- [47] N. Gopalswamy, S. Yashiro, G. Michalek, G. Stenborg, A. Vourlidas, S. Freeland, and R. Howard. The SOHO/LASCO CME Catalog. *Earth Moon and Planets*, 104:295–313, Apr. 2009.
- [48] J. T. Gosling. The solar flare myth. *J. Geophys. Res.*, 98:18937–18950, Nov. 1993.
- [49] M. J. Hagyard and A. A. Pevtsov. Studies of Solar Helicity Using Vector Magnetograms. *Solar Phys.*, 189:25–43, Oct. 1999.
- [50] R. A. Harrison, P. W. Waggett, R. D. Bentley, K. J. H. Phillips, M. Bruner, M. Dryer, and G. M. Simnett. The X-ray signature of solar coronal mass. *Solar Phys.*, 97:387–400, June 1985.
- [51] J. W. Harvey. *Magnetic Fields Associated with Solar Active-Region Prominences*. PhD thesis, National Solar Observatory, 1969.
- [52] D. Hastings and H. Garrett, editors. *Spacecraft-environment interactions*, 1996.
- [53] P. Heinzel, U. Anzer, B. Schmieder, and P. Schwartz. EUV-filaments and their mass loading. In A. Wilson, editor, *Solar Variability as an Input to the Earth's Environment*, volume 535 of *ESA Special Publication*, pages 447–457, Sept. 2003.

- [54] A. M. Heras, B. Sanahuja, V. Domingo, and J. A. Joselyn. Low-energy particle events generated by solar disappearing filaments. *Astron. Astrophys.*, 197:297–305, May 1988.
- [55] B. W. Hindman, D. A. Haber, and J. Toomre. Helioseismically Determined Near-Surface Flows Underlying a Quiescent Filament. *Astrophys. J.*, 653:725–732, Dec. 2006.
- [56] T. Hirayama. Modern observations of solar prominences. *Solar Phys.*, 100:415–434, Oct. 1985.
- [57] A. W. Hood and E. R. Priest. Kink instability of solar coronal loops as the cause of solar flares. *Solar Phys.*, 64:303–321, Dec. 1979.
- [58] K. Hori and J. L. Culhane. Trajectories of microwave prominence eruptions. *Astron. Astrophys.*, 382:666–677, Feb. 2002.
- [59] L. L. House, W. J. Wagner, E. Hildner, C. Sawyer, and H. U. Schmidt. Studies of the corona with the Solar Maximum Mission coronagraph/polarimeter. *Astrophys. J. Lett.*, 244:L117–L121, Mar. 1981.
- [60] T. A. Howard, C. E. DeForest, U. G. Schneck, and C. R. Alden. Challenging Some Contemporary Views of Coronal Mass Ejections. II. The Case for Absent Filaments. *Astrophys. J.*, 834:86, Jan. 2017.
- [61] N. Hurlburt. Automated detection of solar eruptions. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 5(27):A39, Dec. 2015.
- [62] C. L. Hyder. A Phenomenological Model for Disparitions Brusques followed by Flarelike Chromospheric Brightenings, I: The Model, its Consequences, and Observations in Quiet Solar Regions. *Solar Phys.*, 2:49–74, July 1967.
- [63] D. R. Inglis and E. Teller. Ionic Depression of Series Limits in One-Electron Spectra. *Astrophys. J.*, 90:439, Oct. 1939.
- [64] H. Isobe and D. Tripathi. Large amplitude oscillation of a polar crown filament in the pre-eruption phase. *Astron. Astrophys.*, 449:L17–L20, Apr. 2006.
- [65] G. S. Ivanov-Kholodny. *Astron. Zh.*, 36:589, 1959.

- [66] B. V. Jackson, K. V. Sheridan, G. A. Dulk, and D. J. McLean. A possible association of solar type III bursts and white light transients. *Proceedings of the Astronomical Society of Australia*, 3:241, 1978.
- [67] J. T. Jefferies and F. Q. Orrall. On the Interpretation of Prominence Spectra.VI. Temperature Determination and a Model for Quiescent Prominences. *Astrophys. J.*, 137:1232, May 1963.
- [68] E. Jensen and J. E. Wiik. Plasma Parameters in Quiescent Prominences. In V. Ruzdjak and E. Tandberg-Hanssen, editors, *IAU Colloq. 117: Dynamics of Quiescent Prominences*, volume 363 of *Lecture Notes in Physics*, Berlin Springer Verlag, page 298, 1990.
- [69] J. Jing, J. Lee, T. J. Spirock, and H. Wang. Periodic Motion Along Solar Filaments. *Solar Phys.*, 236:97–109, June 2006.
- [70] J. Jing, V. B. Yurchyshyn, G. Yang, Y. Xu, and H. Wang. On the Relation between Filament Eruptions, Flares, and Coronal Mass Ejections. *Astrophys. J.*, 614:1054–1062, Oct. 2004.
- [71] P. S. Joarder, V. M. Nakariakov, and B. Roberts. Oscillations in Prominence Fine-Structures. *Solar Phys.*, 173:81–101, June 1997.
- [72] B. Joshi, U. Kushwaha, A. M. Veronig, and K.-S. Cho. Pre-flare coronal jet and evolutionary phases of a solar eruptive prominence associated with the m1.8 flare:SDO and RHESSI observations. *Astrophys. J.*, 832(2):130, nov 2016.
- [73] S. Kahler, N. Gopalswamy, P. Makela, S. Akiyama, S. Yashiro, H. Xie, and N. Thakur. Filament Eruptions Outside of Active Regions as Sources of Large Solar Energetic Particle Events. In *34th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015)*, volume 34 of *International Cosmic Ray Conference*, page 48, July 2015.
- [74] S. W. Kahler. Origin and properties of solar energetic particles in space. *Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, 125:109–122, 2001.
- [75] S. W. Kahler. The correlation between solar energetic particle peak intensities and speeds of coronal mass ejections: Effects of ambient particle intensities and energy spectra. *J. Geophys. Res.*, 106:20947–20956, Oct. 2001.

- [76] S. W. Kahler, E. W. Cliver, H. V. Cane, R. E. McGuire, R. G. Stone, and N. R. Sheeley, Jr. Solar filament eruptions and energetic particle events. *Astrophys. J.*, 302:504–510, Mar. 1986.
- [77] G. Kilper, H. Gilbert, and D. Alexander. Mass Composition in Pre-eruption Quiet Sun Filaments. *Astrophys. J.*, 704:522–530, Oct. 2009.
- [78] S. Koutchmy. Space-borne coronagraphy. *Space Sci. Rev.*, 47:95–143, Mar. 1988.
- [79] J. Krall, J. Chen, R. T. Duffin, R. A. Howard, and B. J. Thompson. Erupting Solar Magnetic Flux Ropes: Theory and Observation. *Astrophys. J.*, 562:1045–1057, Dec. 2001.
- [80] T. A. Kucera and E. Landi. Ultraviolet Observations of Prominence Activation and Cool Loop Dynamics. *Astrophys. J.*, 645:1525–1536, July 2006.
- [81] M. Kuperus and M. A. Raadu. The Support of Prominences Formed in Neutral Sheets. *Astron. Astrophys.*, 31:189, Mar. 1974.
- [82] M. Kuperus and E. Tandberg-Hanssen. The Nature of Quiescent Solar Prominences. *Solar Phys.*, 2:39–48, July 1967.
- [83] L. N. Kurochka and L. B. Maslennikova. The dependence of the number of the extreme resolved line of Lyman series on electron density. *Veroeffentlichungen der Universitaets-Sternwarte Kiel*, 12:25–30, 1970.
- [84] D. A. Landman. Physical conditions in the cool parts of prominences. *Astrophys. J.*, 270:265–269, July 1983.
- [85] L. J. Lanzerotti. Space Weather Effects on Communications. In I. A. Daglis, editor, *Space Storms and Space Weather Hazards*, page 313, 2001.
- [86] J. R. Lemen, A. M. Title, D. J. Akin, P. F. Boerner, C. Chou, J. F. Drake, D. W. Duncan, C. G. Edwards, F. M. Friedlaender, G. F. Heyman, N. E. Hurlburt, N. L. Katz, G. D. Kushner, M. Levay, R. W. Lindgren, D. P. Mathur, E. L. McFeaters, S. Mitchell, R. A. Rehse, C. J. Schrijver, L. A. Springer, R. A. Stern, T. D. Tarbell, J.-P. Wuelser, C. J. Wolfson, C. Yanari, J. A. Bookbinder, P. N. Cheimets, D. Caldwell, E. E. Deluca, R. Gates, L. Golub, S. Park, W. A. Podgorski, R. I. Bush, P. H. Scherrer, M. A. Gummin, P. Smith, G. Auken, P. Jerram, P. Pool, R. Souffi, D. L. Windt, S. Beardsley, M. Clapp, J. Lang, and

- N. Waltham. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.*, 275:17–40, Jan. 2012.
- [87] J. L. Leroy. Observation of prominence magnetic fields. In E. R. Priest, editor, *Dynamics and Structure of Quiescent Solar Prominences*, volume 150 of *Astrophysics and Space Science Library*, pages 77–113, 1989.
- [88] J. L. Leroy, V. Bommier, and S. Sahal-Brechot. The magnetic field in the prominences of the polar crown. *Solar Phys.*, 83:135–142, Feb. 1983.
- [89] Y. Lin, O. Engvold, L. Rouppe van der Voort, J. E. Wiik, and T. E. Berger. Thin Threads of Solar Filaments. *Solar Phys.*, 226:239–254, Feb. 2005.
- [90] M. Littmann, F. Espenak, and K. Willcox. *Totality: Eclipses of the Sun (Third Edition)*. Oxford University Press, 2008.
- [91] R. Liu, D. Alexander, and H. R. Gilbert. Kinking and Solar Filament Eruptions. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts #210*, volume 39 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 223, May 2007.
- [92] R. Liu, D. Alexander, and H. R. Gilbert. Asymmetric Eruptive Filaments. *Astrophys. J.*, 691:1079–1091, Feb. 2009.
- [93] D. H. Mackay, V. Gaizauskas, G. J. Rickard, and E. R. Priest. Force-free and Potential Models of a Filament Channel in Which a Filament Forms. *Astrophys. J.*, 486:534–549, Sept. 1997.
- [94] D. H. Mackay, V. Gaizauskas, and A. R. Yeates. Where Do Solar Filaments Form?: Consequences for Theoretical Models. *Solar Phys.*, 248:51–65, Mar. 2008.
- [95] D. H. Mackay, V. Gaizauskas, and A. R. Yeates. Where Do Solar Filaments Form? In B. Schmieder, J.-M. Malherbe, and S. T. Wu, editors, *Nature of Prominences and their Role in Space Weather*, volume 300 of *IAU Symposium*, pages 445–446, Jan. 2014.
- [96] D. H. Mackay, J. T. Karpen, J. L. Ballester, B. Schmieder, and G. Aulanier. Physics of Solar Prominences: II – Magnetic Structure and Dynamics. *Space Sci. Rev.*, 151:333–399, Apr. 2010.

- [97] R. M. MacQueen, D. G. Sime, and J.-P. Picat. The properties of coronal voids. *Solar Phys.*, 83:103–114, Feb. 1983.
- [98] S. F. Martin. Preflare conditions, changes and events. *Solar Phys.*, 68:217–236, Dec. 1980.
- [99] S. F. Martin. Mass motions associated with solar flares. *Solar Phys.*, 121:215–238, Mar. 1989.
- [100] S. F. Martin, R. Bilimoria, and P. W. Tracadas. Magnetic field configurations basic to filament channels and filaments. In R. J. Rutten and C. J. Schrijver, editors, *NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C*, volume 433 of *NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C*, page 303, 1994.
- [101] M. J. Martres, Z. Mouradian, and I. Soru-Escout. Effect of local rigid rotation on sunspots. *Astron. Astrophys.*, 161:376–380, June 1986.
- [102] E. I. Mason, S. K. Antiochos, and N. M. Viall. Observations of solar coronal rain in null point topologies. *The Astrophysical Journal*, 874(2):L33, apr 2019.
- [103] P. I. McCauley, Y. N. Su, N. Schanche, K. E. Evans, C. Su, S. McKillop, and K. K. Reeves. Prominence and Filament Eruptions Observed by the Solar Dynamics Observatory: Statistical Properties, Kinematics, and Online Catalog. *Solar Phys.*, 290:1703–1740, June 2015.
- [104] P. Mein and N. Mein. Dynamical fine structure of a quiescent prominence. *Solar Phys.*, 136:317–333, Dec. 1991.
- [105] P. Mein and B. Schmieder. Velocity shear and microturbulence in solar filaments a differential cloud model. In J. L. Ballester and E. R. Priest, editors, *Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca (Spain)*, 1988.
- [106] D. H. Menzel and J. W. Evans. *Acad. Naz. Lincei. Conv. Volta*, 11:119, 1953.
- [107] Z. Mikic and J. A. Linker. Disruption of coronal magnetic field arcades. *Astrophys. J.*, 430:898–912, Aug. 1994.
- [108] R. Miteva, S. W. Samwel, and M. V. Costa-Duarte. The Wind/EPACT Proton Event Catalog (1996 - 2016). *Solar Phys.*, 293:id. 27, Feb. 2018.

- [109] R. Miteva, S. W. Samwel, and V. Krupar. Solar energetic particles and radio burst emission. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 7(27):A37, Dec. 2017.
- [110] Y.-J. Moon, K. S. Cho, Z. Smith, C. D. Fry, M. Dryer, and Y. D. Park. Flare-Associated Coronal Mass Ejections with Large Accelerations. *Astrophys. J.*, 615:1011–1020, Nov. 2004.
- [111] Z. Mouradian, M. J. Martres, and I. Soru-Escout. The heating of filaments as a disappearance process. In A. I. Poland, editor, *NASA Conference Publication*, volume 2442 of *NASA Conference Publication*, Dec. 1986.
- [112] Z. Mouradian, M. J. Martres, I. Soru-Escout, and L. Gesztelyi. Local rigid rotation and the emergence of active centres. *Astron. Astrophys.*, 183:129–134, Sept. 1987.
- [113] Z. Mouradian and I. Soru-Escout. Role of rigid rotation in the sudden disappearance of solar filaments. *Astron. Astrophys.*, 210:410–416, Feb. 1989.
- [114] R. H. Munro, J. T. Gosling, E. Hildner, R. M. MacQueen, A. I. Poland, and C. L. Ross. The association of coronal mass ejection transients with other forms of solar activity. *Solar Phys.*, 61:201–215, Feb. 1979.
- [115] B. B. Nath. *The Story of Helium and the Birth of Astrophysics*. Springer, 2013.
- [116] H. W. Newton. The distribution of radial velocities of dark Ha markings near sunspots. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 94:472, Mar. 1934.
- [117] R. Oliver. Prominence Oscillations: Observations and Theory. In A. Wilson and et al., editors, *Magnetic Fields and Solar Processes*, volume 448 of *ESA Special Publication*, page 425, Dec. 1999.
- [118] N. K. Panesar. *A Study of quiescent prominences using SDO and STEREO data*. PhD thesis, Georg-August-Universität Göttingen, Institut für Astrophysik, Germany, May 2014.
- [119] S. Patsourakos and J.-C. Vial. Intermittent behavior in the transition region and the low corona of the quiet Sun. *Astron. Astrophys.*, 385:1073–1077, Apr. 2002.
- [120] W. D. Pesnell, B. J. Thompson, and P. C. Chamberlin. The Solar Dynamics Observatory (SDO). *Solar Phys.*, 275:3–15, Jan. 2012.

- [121] E. Pettit. Characteristic Features of Solar Prominences. *Astrophys. J.*, 76:9, July 1932.
- [122] A. A. Pevtsov, K. S. Balasubramaniam, and J. W. Rogers. Chirality of Chromospheric Filaments. *Astrophys. J.*, 595:500–505, Sept. 2003.
- [123] A. A. Pevtsov, O. Panasenco, and S. F. Martin. Coronal Mass Ejections from Magnetic Systems Encompassing Filament Channels Without Filaments. *Solar Phys.*, 277:185–201, Mar. 2012.
- [124] S. Płoceniak and B. Rompolt. Positions of Filament Feet in Relation to the Supergranular Calcium Network. *Solar Phys.*, 29:399–401, Apr. 1973.
- [125] E. Priest. *Dynamics and Structure of Quiescent Solar Prominences*. Astrophysics and Space Science Library. Springer Netherlands, 1988.
- [126] E. Priest. *Magnetohydrodynamics of the Sun*. May 2014.
- [127] T. Pulkkinen. Space Weather: Terrestrial Perspective. *Living Reviews in Solar Physics*, 4:1, Dec. 2007.
- [128] M. A. Raadu, B. Schmieder, N. Mein, and L. Gesztelyi. Photospheric-induced destabilization and ejection of prominence material. *Astron. Astrophys.*, 197:289–296, May 1988.
- [129] R. Ramesh and G. A. S. Sundaram. Occurrence of Metric Noise Storms and the Onset of Coronal Mass Ejections in the Solar Atmosphere. *Solar Phys.*, 202:355–361, Sept. 2001.
- [130] H. E. Ramsey and S. F. Smith. Flare-initiated filament oscillations. *Astron. J.*, 71:197, Apr. 1966.
- [131] D. V. Reames. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere. *Space Sci. Rev.*, 90:413–491, Oct. 1999.
- [132] R. S. Richardson. Relation between Bright Chromospheric Eruptions and Fade-Outs of High-Frequency Radio Transmission. *Pub. Astron. Soc. Pac.*, 49:82, Apr. 1937.
- [133] B. Rompolt. Eruption of huge magnetic systems from the sun. *Advances in Space Research*, 4:357–361, 1984.
- [134] B. Rompolt. Small Scale Structure and Dynamics of Prominences. *Hvar Observatory Bulletin*, 14:37, 1990.

- [135] V. Rusin and M. Rybansky. Eruptive prominence of August 18, 1980. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 33:219–229, July 1982.
- [136] D. M. Rust. Magnetic Fields in Quiescent Solar Prominences. I. Observations. *Astrophys. J.*, 150:313, Oct. 1967.
- [137] K. Saito and E. Tandberg-Hanssen. The Arch Systems, Cavities, and Prominences in the Helmet Streamer Observed at the Solar Eclipse, November 12, 1966. *Solar Phys.*, 31:105–121, July 1973.
- [138] B. Sanahuja, V. Domingo, K.-P. Wenzel, J. A. Joselyn, and E. Keppler. A large proton event associated with solar filament activity. *Solar Phys.*, 84:321–337, Apr. 1983.
- [139] R. Schielicke and A. D. Wittmann. On the Berkowski daguerreotype (Königsberg, 1851 July 28): the first correctly-exposed photograph of the solar corona. *Acta Historica Astronomiae*, 25:128–147, 2005.
- [140] B. Schmieder, P. Demoulin, and G. Aulanier. Title. In *39th COSPAR Scientific Assembly*, volume 39 of *COSPAR Meeting*, page 1, July 2012.
- [141] P. Schwartz, F. Fárník, P. Heinzel, P. Kotrč, and U. Anzer. Mass of Solar Prominences Estimated from Multi-Wavelength Data. In T. Sekii, T. Watanabe, and T. Sakurai, editors, *Hinode-3: The 3rd Hinode Science Meeting*, volume 454 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 117, Aug. 2012.
- [142] R. Schwenn. Space Weather: The Solar Perspective. *Living Reviews in Solar Physics*, 3:2, Aug. 2006.
- [143] A. Secchi. *Le Soleil*. 1875.
- [144] A. Seppälä, P. T. Verronen, V. F. Sofieva, J. Tamminen, E. Kyrölä, C. J. Rodger, and M. A. Clilverd. Destruction of the tertiary ozone maximum during a solar proton event. *Geophys. Res. Lett.*, 33:L07804, Apr. 2006.
- [145] A. B. Severny and V. L. Khoklova. *Izv. Krymsk. Astrofiz. Obs.*, 10:9, 1953.
- [146] A. Shanmugaraju, Y.-J. Moon, K.-S. Cho, S. C. Bong, N. Gopalswamy, S. Akiyama, S. Yashiro, S. Umopathy, and B. Vrsnak. QUASI-PERIODIC OSCILLATIONS IN LASCO CORONAL MASS

- EJECTION SPEEDS. *The Astrophysical Journal*, 708(1):450–455, dec 2009.
- [147] I. Soru-Escout, M.-J. Martres, and Z. Mouradian. Singularity of solar rotation and flare productivity. *Astron. Astrophys.*, 145:19–24, Apr. 1985.
- [148] G. Stellmacher, E. Wiehr, and I. E. Dammasch. Spectroscopy of Solar Prominences Simultaneously From Space and Ground. *Solar Phys.*, 217:133–155, Oct. 2003.
- [149] A. C. Sterling and R. L. Moore. Tether-cutting Energetics of a Solar Quiet-Region Prominence Eruption. *Astrophys. J.*, 599:1418–1425, Dec. 2003.
- [150] A. C. Sterling and R. L. Moore. External and Internal Reconnection in Two Filament-Carrying Magnetic Cavity Solar Eruptions. *Astrophys. J.*, 613:1221–1232, Oct. 2004.
- [151] Z. Svestka and P. Simon, editors. *Catalog of solar particle events 1955-1969*, volume 49 of *Astrophysics and Space Science Library*, 1975.
- [152] D. Sviatsky. L'Astronomie dans les Chroniques Russes. *L'Astronomie*, 37:418–420, 1923.
- [153] L. Taliashvili, Z. Mouradian, and J. Páez. Dynamic and Thermal Disappearance of Prominences and Their Geoeffectiveness. *Solar Phys.*, 258:277–295, Sept. 2009.
- [154] E. Tandberg-Hanssen. Solar prominences. *Geophysics and Astrophysics Monographs*, 12, 1974.
- [155] E. Tandberg-Hanssen, editor. *The nature of solar prominences*, volume 199 of *Astrophysics and Space Science Library*, 1995.
- [156] E. Tandberg-Hanssen. The History of Solar Prominence Research (Review). In D. F. Webb, B. Schmieder, and D. M. Rust, editors, *IAU Colloq. 167: New Perspectives on Solar Prominences*, volume 150 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 11, 1998.
- [157] F. Tang. Quiescent prominences - Where are they formed? *Solar Phys.*, 107:233–237, Sept. 1987.

- [158] H. Tian, E. E. DeLuca, S. R. Cranmer, B. De Pontieu, H. Peter, J. Martínez-Sykora, L. Golub, S. McKillop, K. K. Reeves, M. P. Miralles, P. McCauley, S. Saar, P. Testa, M. Weber, N. Murphy, J. Lemen, A. Title, P. Boerner, N. Hurlburt, T. D. Tarbell, J. P. Wuelser, L. Kleint, C. Kankelborg, S. Jaeggli, M. Carlsson, V. Hansteen, and S. W. McIntosh. Prevalence of small-scale jets from the networks of the solar transition region and chromosphere. *Science*, 346(27):1255711, Oct. 2014.
- [159] T. Török and B. Kliem. Confined and Ejective Eruptions of Kink-unstable Flux Ropes. *Astrophys. J. Lett.*, 630:L97–L100, Sept. 2005.
- [160] J. Torsti, E. Valtonen, M. Lumme, P. Peltonen, T. Eronen, M. Louhola, E. Riihonen, G. Schultz, M. Teittinen, K. Ahola, C. Holmlund, V. Kelhä, K. Leppälä, P. Ruuska, and E. Strömmer. Energetic Particle Experiment ERNE. *Solar Physics*, 162:505–531, Dec. 1995.
- [161] D. A. Ulloa. Observations on the total (with duration) and annular eclipse of the Sun, taken on the 24th June, 1778, on board the *Espagne*, being the Admiral's ship of the fleet of New Spain, in the passage from the Azores towards Cape St. Vincent's. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 69:105–119, 1779.
- [162] B. Vassenio. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 38:134–135, 1733.
- [163] J. Vial and O. Engvold. *Solar Prominences*. Astrophysics and Space Science Library. Springer International Publishing, 2016.
- [164] B. Vrsnak. Prominence Eruptions (Review). In D. F. Webb, B. Schmieder, and D. M. Rust, editors, *IAU Colloq. 167: New Perspectives on Solar Prominences*, volume 150 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page 302, 1998.
- [165] B. Vrsnak, V. Ruzdjak, and B. Rompolt. Stability of prominences exposing helical-like patterns. *Solar Phys.*, 136:151–167, Nov. 1991.
- [166] B. Vršnak, A. M. Veronig, J. K. Thalmann, and T. Žic. Large amplitude oscillatory motion along a solar filament. *Astron. Astrophys.*, 471:295–299, Aug. 2007.
- [167] A. N. Vyssotsky. Astronomical records in the Russian chronicles from 1000 to 1600 A.D. (as collected by D.O. Sviatsky). *Meddelanden fran Lunds Astronomiska Observatorium Serie II*, 126:3–52, 1949.

- [168] M. Waldmeier. Threadlike Coronal Streamers. *Solar Phys.*, 27:143–148, Nov. 1972.
- [169] D. F. Webb, T. G. Forbes, H. Aurass, J. Chen, P. Martens, B. Rompolt, V. Rusin, and S. F. Martin. Material ejection. *Solar Phys.*, 153:73–89, Aug. 1994.
- [170] D. F. Webb and T. A. Howard. Coronal Mass Ejections: Observations. *Living Reviews in Solar Physics*, 9:3, June 2012.
- [171] R. xhahn and A. Schlüter. Eine Theorie der solaren Filamente. Mit 7 Textabbildungen. *Zeitschrift für Astrophysik*, 43:36, 1957.
- [172] X.-L. Yan, Z.-Q. Qu, and D.-F. Kong. Relationship between eruptions of active-region filaments and associated flares and coronal mass ejections. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 414:2803–2811, July 2011.
- [173] Z. Yi and O. Engvold. Vertical velocities and oscillations in quiescent filaments. *Solar Phys.*, 134:275–286, Aug. 1991.
- [174] Q. Z. Zhang, W. C. Livingston, J. Hu, and C. Fang. Spectral analysis and the two-dimensional distribution of physical parameters in a quiescent prominence. *Solar Phys.*, 114:245–252, Sept. 1987.
- [175] H. Zirin. *The solar atmosphere*. 1966.