

Българска академия на науките
Институт по астрономия
с Национална астрономическа обсерватория

Костадинка Желязкова Колева

Дестабилизация и ерупция на слънчеви протуберанси

АВТОРЕФЕРАТ на ДИСЕРТАЦИЯ
за присъждане на образователна и научна
степен "доктор"

София, 2013 г.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 2013 г. от.....часа в зала..... на..... бул. "Цариградско шосе"№ 72. Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в библиотеката на ИА, БАН и на адрес <http://www.astro.bas.bg/koleva/PhD/>

Българска академия на науките
Институт по астрономия
с Национална астрономическа обсерватория

Костадинка Желязкова Колева

Дестабилизация и ерупция на слънчеви протуберанси

АВТОРЕФЕРАТ на ДИСЕРТАЦИЯ
за присъждане на образователна и научна
степен "доктор"
направление 4.1 Физически Науки ("Хелиофизика" 01.04.10)

Научен ръководител:
доц. д-р Петър Духлев

Рецензенти:

проф. дфн Диана Кюркчиева
доц. д-р Борис Комитов

София, 2013 г.

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от обединения научен семинар на Института по Астрономия – БАН и Катедрата по Астрономия - СУ, проведен на 25.03.2013 г.

Дисертационният труд съдържа 129 страници, включващи 48 фигури, 3 таблици и 218 цитирани източника.

Дисертантът работи в Института по Астрономия с Национална астрономическа обсерватория, БАН.

1 Структура на дисертацията

Дисертацията съдържа увод и шест глави.

Глава 1. Физическа природа на еруптивните протуберанси.

Глава 2. Наблюдателен материал. Обработка на данните.

Глава 3. Ерупция на протуберанси от I и II тип.

Глава 4. Ерупция на протуберанс индуцирана от кинк неустойчивост.

Глава 5. Ерупция на протуберанс, причинена от магнитно присъединяване. На диагностика на пред-еруптивната фаза.

Глава 6. Основни резултати и приноси.

Увод:

Поради влиянието си върху живота на Земята, Слънцето е обект на човешкия интерес още от дълбока древност. Като централно тяло на Слънчевата система, то е най-близката до нас звезда (150 милиона километра), което позволява атмосферата му да бъде изследвана в подробности, а натрупаните знания да бъдат използвани при изучаването на другите звезди.

Слънцето представлява почти идеална сфера, съставена от гореща плазма и магнитно поле. Диаметърът му е близо 10^9 пъти по-голям от този на Земята, а масата му (330 000 пъти повече от земната) съставлява около 99,86% от общата маса на Слънчевата система. Слънцето е звезда от главната последователност и генерира енергията си чрез ядрен синтез на водородни ядра в хелий. Горещата му корона непрекъснато се разширява в пространството, създавайки слънчев вятър, поток от заредени частици, достигащ до хелиопаузата на около 100 астрономически единици. Областта в междузвездната среда, образувана от слънчевия вятър, се нарича хелиосфера и е най-голямата непрекъснатата структура на Слънчевата система.

Слънцето, като основен “двигател” на космическия климат, оказва директно влияние върху Земята, околземното космическо простран-

ство и междупланетната среда. Слънчевата активност, предизвиквайки геомагнитни бури и полярни сияния, оказва решаващо влияние върху нормалната работа на широк клас земни и космически технологични системи (сателитни и радио комуникации, навигации, енергопреносни мрежи и др.) и може да излага на опасност човешкия живот или здраве.

Явленията на Слънцето се разделят на два класа - спокойни и активни. Към активните спадат такива явления като слънчевите протуберанси, слънчевите избухвания, петната, короналните изхвърляния на маса и други. Една от най-атраktivните активни прояви на Слънцето са слънчевите протуберанси. Тяхната форма и движения чудесно визуализират конфигурацията на слънчевото магнитно поле. Слънчевите протуберансите са особено привлекателни обекти за изследване, от първите техни наблюдения в средата на 19-ти век до наши дни. Изследването на тяхното възникване, устойчивост, дестабилизация и ерупция позволява решаването на широка гама от физически проблеми, свързани с поведението и еволюцията на локалните магнитни полета.

Настоящата дисертация е посветена на изследването на кинематичните и морфологични свойства на еруптивните протуберанси и на процесите водещи до тяхната дестабилизация и ерупция. Основните цели са:

1. Да се изследват различни типове ерупции на протуберанси;
2. Да се определят кинематичните параметри на ерупцията и морфологичните изменения по време на еруптивния процес при различни видове еруптивни протуберанси;
3. Да се съпоставят резултатите от отделните типове ерупция;
4. Да се направят предположения за физическите механизми, които инициират еруптивния процес.

2 Наблюдателен материал. Обработка на данните

Настоящото изследване се базира на наблюдения на 8 еруптивни протуберанса, получени с наземни наблюдения и с инструменти на космически обсерватории.

ЕП от 30 Март 2010 е регистриран в линията на He II 304 Å от Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на борда на Solar Dynamics Observatory (SDO). Наблюденията са през минута. Пространствената резолюция на инструмента е ~ 1.5 arcsec. За анализа на този протуберанс са използвани и данни от Extreme Ultraviolet Imager (EUVI) на борда на STEREO (B). Регистрациите са през 10 минути в линията на He II 304 Å.

Другите еруптивни протуберанси, изследвани в дисертацията, са наблюдавани във водородната линия H_{α} между 1979 г. и 2001 г. с малкия коронограф (Small Coronagraph - 130/3450 mm) на Астрономическия Институт на Вроцлавския Университет в Полша. Филтрограмите са получени с H_{α} филтър с ивица на пропускане 3 Å и покриват различни фази от еволюцията на ЕП.

За обработка на наблюденията сме използвали процедури, включени в библиотеките на SolarSoftware. SolarSoft представлява IDL базирана система от интегрирани софтуерни библиотеки, бази данни и инструменти, които осигуряват обща среда за програмиране и анализ на данни от областта на слънчевата физика.

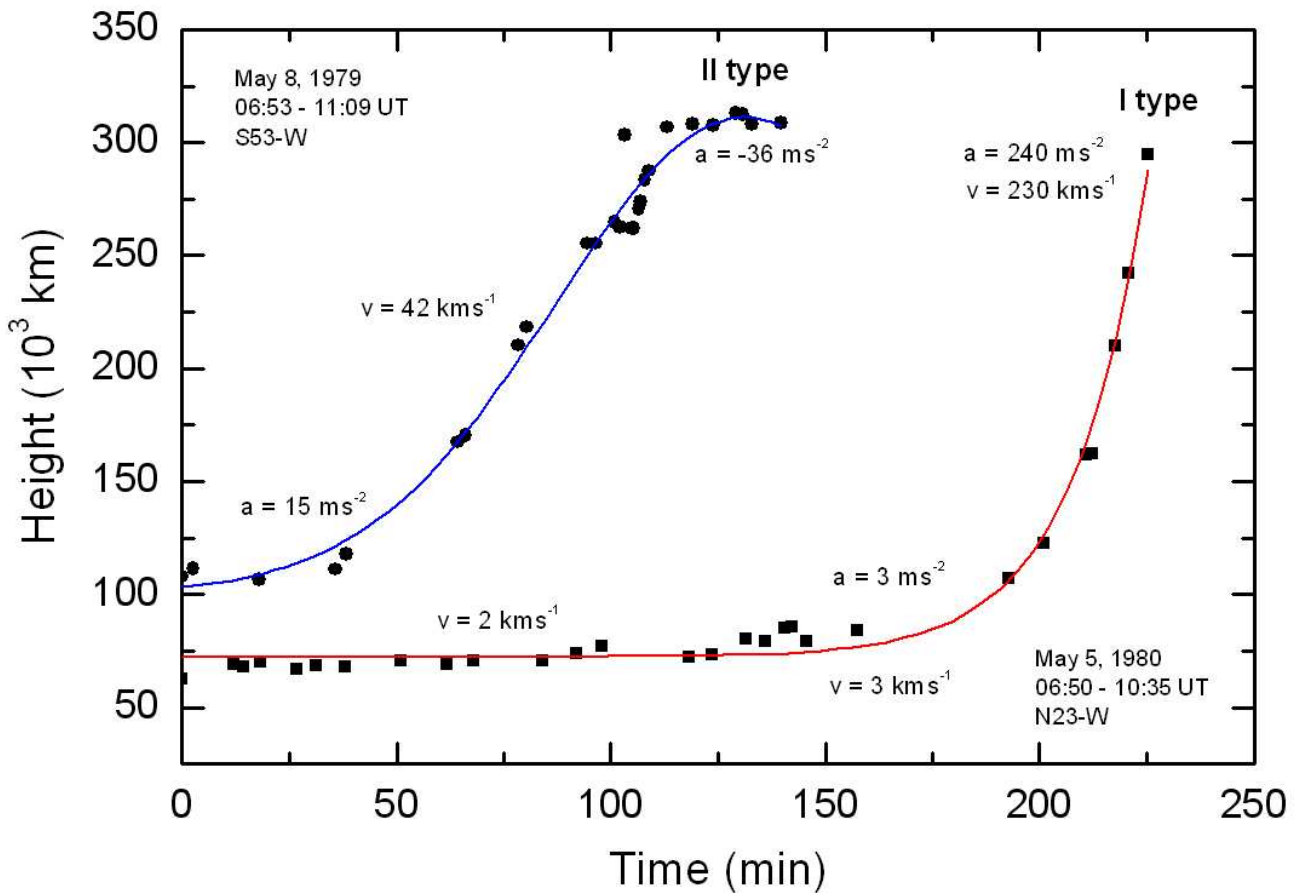
Филтрограмите са дигитализирани с автоматичния микроденситометър Joaze-Loebl MDM6 в Националната Астрономическа Обсерватория Рожен, България.

3 Ерупция на протуберанси от I и II тип

В Глава 3 са изследвани еруптивни протуберанси, чиито ерупции са класически примери за двата основни топологични типа протуберансова ерупция - I и II (Rompol, 1984, 1990). Някои общи положения от еволюцията им са установени от Rompol (1984, 1990, 1998). В насто-

ящото изследване ние сме представили резултати от сравняването на физичните свойства на протуберансите, на базата на подробен анализ на тяхната кинематика и еволюция. Изследването включва пет ЕП от 5 май 1980 г., 8 май 1979 г., 14 август 1979 г., 20 септември 1980 г. и 14 август 2001 г.

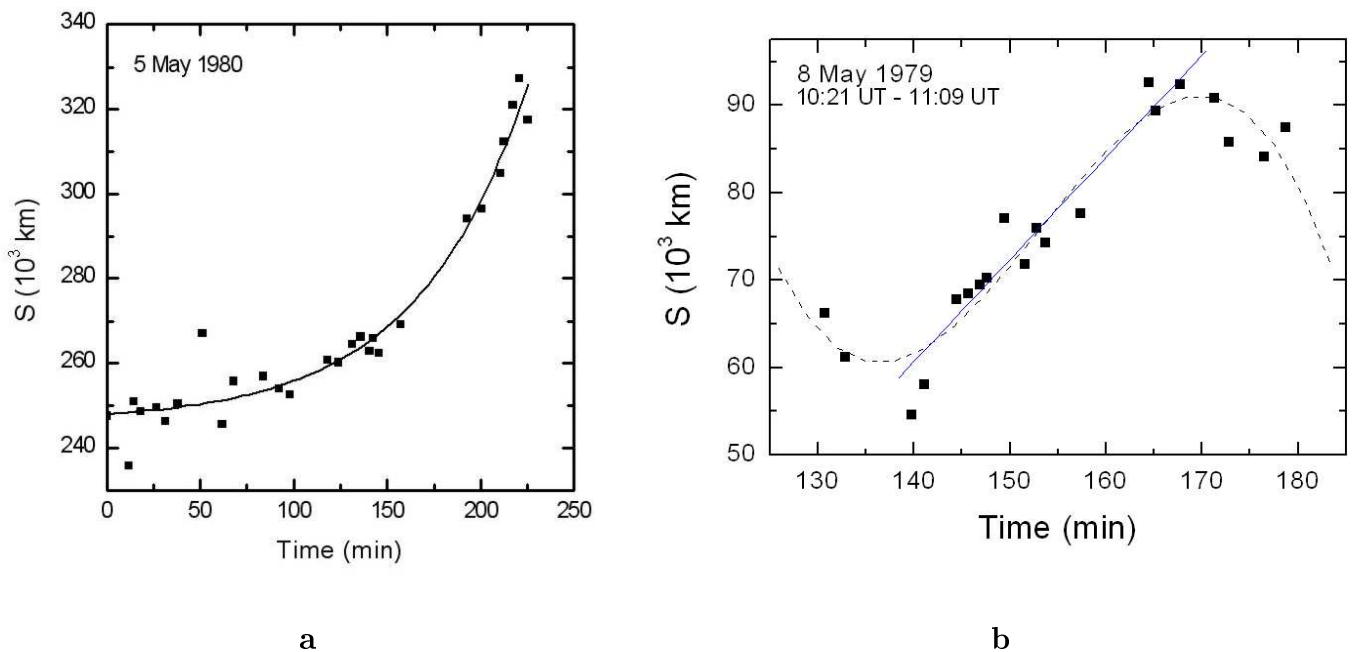
Ерупцията на два от протуберансите (5 май 1980 г., 8 май 1979 г.) е класически пример за ерупция от I и II тип. Зависимостите височина-време за двата протуберанса са сравнени на Фиг. 3.1.



Фигура 3.1: Диаграма височина-време за ЕП от 5 май 1980 г ЕП от 8 май 1979 г. Времето е дадено в минути след 06:50 UT.

Кинематичните параметри подсказват съществени различия между процесите на ерупция при протуберанса от I тип (5 май 1980 г.) и този от II тип (8 май 1979 г.). След началото на ерупцията, протуберансът от I тип се издига ускорително, до пълното му избледняване в линията H_{α} , докато ерупцията на ЕП от II тип протича на три динамични етапа: издигане с ускорение, движение с постоянна скорост

и издигане с отрицателно ускорение. Издигането на ЕП от II тип е резултат от изправянето на магнитното въже, съдържащо протуберансовата плазма. Този процес добре се описва от ъгъла на наклона между тяло на ЕП и слънчевия лимб, в наблюдателния случай, когато тялото на протуберанса се издига в равнина, перпендикулярна или почти перпендикулярна на лъча на зрение. Вариациите на ъгъла, който тялото на ЕП сключва с лимба, е важен количествен параметър, описващ геометрията и кинематиката на ниските части на еруптиращата ЕМС. Посоката на движение на плазмата по време на ерупцията зависи от местоположението на протуберансовия материал в еруптиращата магнитна арка, скоростта на ерупцията в даден момент, широко-мащабната геометрия на арката, и от формата на фините магнитни тръби, формиращи арката (усукани или не) (Rompolt, 1990).



Фигура 3.2: Хоризонтално отместване: а -5 май 1980 г. ; б -8 май 1979 г.

По време на ерупцията краката на протуберансовата арка на ЕП I показват ясно изразено хоризонтално отместване. Двете фази от еволюцията на протуберанса са различни и в кинематиката на хоризонталното движение (Фиг. 3.2 а). Арката на протуберанса е изградена от две основни, спирално усукани магнитни въжета. Всяко от МВ

е съставено от множество тънки, спирално усукани магнитни тръби (нишки). Магнитните въжета, съставляващи всеки крак на арката се отместват хоризонтално едно спрямо друго по време на наблюдателния период. Двата различни вида хоризонтално отместване по време на ерупцията на протуберанса от 5 май 1980 г. са наблюдателни признаци на специфични физически процеси, свързани с ерупцията на главното МВ на протуберанса. Хоризонталното отместване на краката на протуберансовата арка е тясно свързано с разтягането на арката, което е предимно по височина, но така също и странично. Хоризонталното отместване между магнитните въжета в краката на арката най-вероятно е свързано с промени в степента на тяхното спирално усукване, наблюдавани при стъпките на арката.

По време на пост-еруптивната фаза двете МВ (снопове) на ЕП II са напълно разделени едно от друго и вертикални към слънчевата повърхност, което обуславя три процеса, характерни за тази фаза. Двете МВ на ЕП показват явно раздалечаване (отместване) едно от друго (Фиг. 3.2 b). Тънките магнитни тръби във всяко от МВ започват явно да се разсукват. Поради вертикалната позиция на МВ и разсукването на тънките тръби в тях, решаваща роля през пост-еруптивната фаза играе силата на тежестта, т.е. скоростта на свободно падане на плазмата, поради което през цялата пост-еруптивната фаза се наблюдава явно стичане на плазмата, обратно в хромосферата.

Останалите протуберанси, въпреки някои специфични особености, могат да бъдат определени според своите еволюция и динамични характеристики като ЕП от II тип.

Основните кинематични различия при ерупциите на протуберанси от тип I и тип II могат да бъдат обяснени чрез специфичното поведение на топологично различните части на еруптиращата ЕМС, където са локализирани различни видове ЕП. За ЕМС е използван модел на магнитното въже, който се налага от преки сравнения на теоретичните и наблюдателни данни, например при наблюдения на ИКМ, при които динамичните свойства са резултат от разширяването на маг-

нитното въже (Chen et al., 2006).

И двата типа протуберанси I ЕП и II ЕП са част от едромащабната система ЕП-ИКМ-MFR, но се формират и развиват в топологично различни части на ЕМС. Анализът на петте протуберанса, два от които са класически примери за ЕП от I и II тип, асоциирани с ИКМ, разкрива някои характерни свойства. Останалите три еруптивни протуберанса, въпреки някои специфични особености, по своите кинематични свойства и морфологична еволюция могат да бъдат класифицирани като ЕП от II тип.

1. Свойствата на еруптивните протуберанси от I и II тип по време на фазата на активиране са сходни. Те се издигат бавно със скорост от няколко km s^{-1} , но след началото на ерупцията тяхната динамика и еволюция стават съществено различни. Ерупцията на ЕП I се извършва с нарастващо ускорение до пълното изчезване на протуберанса. Ерупцията на ЕП II е съставена от три различни фази: бързо ускоряване, фаза с постоянна скорост или незначително (ако го има) ускорение и фаза с отрицателно ускорение. При някои ЕП от II тип ерупцията е съставена само от първите две фази. Нарастването на ъгълът между протуберансовото тяло и лимба при този тип ерупции може да се разглежда като визуализация на разширяването на ЕМС, което води до появата на ИКМ. Съществена разлика между двата типа ЕП е ясно изразената пост-еруптивна фаза в еволюцията на ЕП от II тип, по време на която се наблюдава втичане на протуберансовата плазма обратно към хромосферата.

2. Хоризонталното отместване на ЕП от I и II тип се дължи на ерупцията на ЕМС, съдържаща протуберанса. ЕП от I тип показват значително хоризонтално отместване със сложен характер. Едромащабното раздалечаване на краката на примката продължава до края на ерупцията. Промяната в разстоянието между стъпките на тънките магнитни тръби (нишки), съставлящи краката на протуберансовата арка може да се обясни чрез теоретично предсказаните дребномащабни хоризонтални осцилации на издигащите се тръби на еруптиращата ЕМС. При ЕП от II тип явно хоризонтално отместване се наблюдава

само през последната фаза от ерупцията (пост-еруптивната фаза), когато основните протуберансови тръби се разсукват.

3. Съществува и друга важна разлика в еволюиите на ЕП от I и II тип. ЕП I, асоцииран с бързо ИКМ, представлява финален стадий от живота на асоциираното с него влакно. Този факт подсказва, че ерупцията на протуберанса от 5 май 1980 г. представя динамично DB от типа водещ до драстична реорганизация на магнитното поле в областта на ЕП (Mouradian and Soru-Escout, 1989). Действително, в долната част на ЕМС се наблюдава реорганизация на магнитните полета. През цялото време на ерупцията част от протуберансовия материал се стича обратно към хромосферата, до пълното изчезване на протуберанса. Фактът, че полярното влакно, асоциирано с ЕП от II тип (8 май 1979 г.) и бавно ИКМ, продължава да съществува през следващите 7 ротации, подсказва че в южния крак на ЕМС магнитното поддържане на протуберанса се възстановява след ерупцията. Следователно, ЕП от II тип представя динамично DB от типа, водещ до възстановяване на магнитната конфигурация на протуберанса, на същото място и с почти същата форма (Mouradian and Soru-Escout, 1989).

4. Еруптивните протуберанси от 14 август 1979 г. и 14 август 2001 г. са доста сходни както по профилите на височината и хоризонталното отместване с времето, така и по специфичния ракурс на наблюдение на слънчевия лимба. Въпреки спецификата им, тяхната динамика и еволюция е типична за ЕП от II тип. И двата ЕП са наблюдавани в късен етап от тяхната ерупция, поради което техните профили на височините са аналогични на по-късни фази от ерупцията на протуберанса от 8 май 1979 г. Поради това, профилът на височината на ЕП от 14 август 2001 г. съответства на фазата на издигане с постоянна скорост на ЕП от 8 май 1979 г., докато този на ЕП от 14 август 1979 г. съответства на фазата с отрицателно ускорение при ЕП от 8 май 1979 г. Освен това, някои от разликите между кинематичните характеристики на ЕП от 14 август 1979 г. спрямо тези на ЕП от 8 май 1979 г. най-вероятно се дължат на нормалната му магнитна

конфигурация, докато ЕП от 8 май 1979 г. има инверсна магнитна конфигурация. Друга специфична особеност на двата ЕП е свързана с разположението на магнитните арки, съдържащи протуберансите, спрямо лъча на зрение. Тези два ЕП представят другия екстремален случай на наблюдение на ЕП от II тип на лимба, при който плоскостта на магнитната арка почти съвпада с лъча на зрение. В такива случаи, нарастването на ъгъла между тялото на ЕП и лимба не може да се наблюдава и поради това този параметър липсва в кинематичните им картини.

5. Протуберансът от 20 септември 1980 г. се идентифицира като ЕП от II тип по няколко причини. Еруптивните протуберанси от 20 септември 1980 г. и 8 май 1979 г. са наблюдавани от спокойно състояние до пълното им изчезване в линията H_{α} и в един и същ ракурс на слънчевия лимб. И в двата случая профила на височината обхваща активация, ерупция и пост-еруптивна фаза. Съществено различие в кинематичните им картини е, че профилът на височината на ЕП от 20 септември 1980 г. се състои само от фаза на ускоряване и фаза на издигане с постоянна скорост, което се среща при някои ЕП от II тип. Друга съществена разлика между двата ЕП е свързана с типа на асоциираните с тях влакна. Докато ЕП от 8 май 1979 г. е асоцииран с дългоживущо полярно влакно, за което ерупцията има само временен характер, то ЕП от 20 септември 1980 г. е асоцииран с краткоживущо влакно, разположено между две активни области с висока степен на активност, поради което ерупцията най-вероятно представлява последен стадий от живота на влакното. Този протуберанс (20 септември 1980 г.) е доста интересен от гледна точка на опростяването на вътрешната му структура по време на последните стадии от ерупцията и по-специално по време на пост-еруптивната му фаза. Еволюцията на неговата вътрешна структура ще бъде детайлно разгледана в предстоящо изследване. Особено внимание ще бъде обърнато на развитието на вътрешната структура и хоризонталното отместване между краката на фините нишки които я съставят.

4 Ерупция на протуберанс индуцирана от кинк неустойчивост

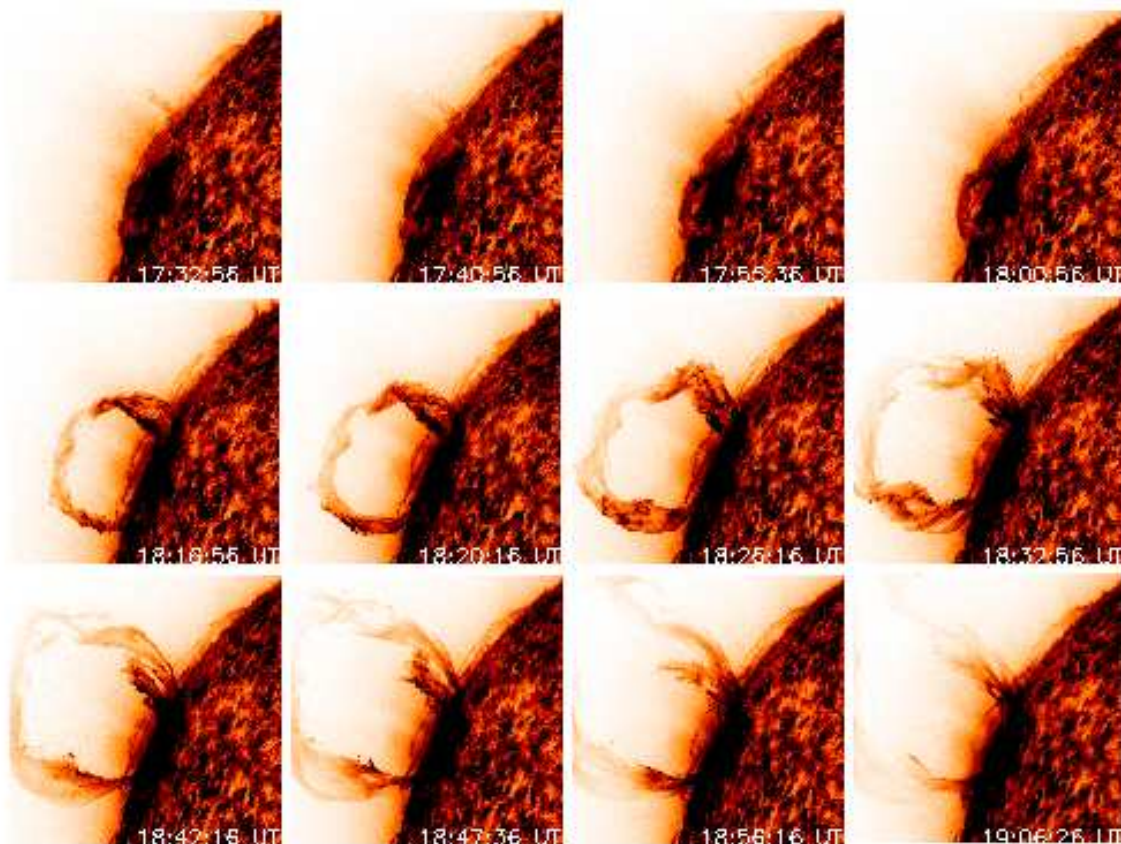
Разгледани са два случая на ерупция на протуберанси, предизвикана от т. нар. кинк-неустойчивост. И двата протуберанса имат примкообразна, спирално усукана структура с фиксирани в слънчевата повърхност крака. В изследването са използвани данни от космически мисии и наземни обсерватории. Единият от протуберансите е регистриран на 30 март 2010 г. Данните, използвани при анализа на неговата еволюция са получени в ултравиолетовата линия $\text{He II } 304 \text{ \AA}$ от Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на борда на Solar Dynamics Observatory (SDO) и от EUVI на борда на слънчевата обсерватория STEREO B. Използването на данни от двата инструмента предоставя уникалната възможност за комбиниране на наблюдения на лимба и върху диска на Слънцето. Другият протуберанс, включен в изследването е регистриран на 7 май 1979 г. в линията $\text{H}\alpha$ от Малкия коронограф на Астрономическия Институт към Вроцлавския Университет.

4.1 Примкообразен протуберанс от 30 март 2010 г.

Изследвахме кинематиката, морфологията, спиралността и геометричната еволюция на ЕП от 30 март 2010 г. на базата на изображения в $\text{He II } 304 \text{ \AA}$ от AIA/SDO (Фиг. 4.1) и EUVI/STEREO B. Уникалната комбинация от регистрации с висока разделителна способност на лимба (AIA) и наблюдения на диска (EUVI B) ни позволи да направим детайлен анализ на ерупцията на протуберанса.

При изследвания ЕП се наблюдава много ясно усукване около основната ос на примката му, чиято степен е над критичната стойност от 2π , което впоследствие довежда до усукване (кинк) на самата ос. Това е съществена предпоставка за да предпологаме кинк-нестабилност като основна причина за дестабилизацията на протуберанса. Възможно е кинк-нестабилността да не е единствената причина за ерупцията. Като алтернативен задействащ механизъм може

да се разглежда магнитното присъединяване. Във всички налични данни за периода, които включват AIA и EUVI He II 304 Å и Fe XII 195 Å потърсехме индикации за магнитно присъединяване. Няма данни на лимба или диска (EUVI), които да показват повишаване на яркостта в краката на протуберанса, в съседство с тях или по тялото му. Следователно, магнитното присъединяване в този конкретен случай не може да бъде разглеждано като причина за дестабилизацията и ерупцията на протуберанса.



Фигура 4.1: Изображения на AIA/SDO (в обърнати цветове), получени в линията на He II 304 Å показващи морфологията и, в частност, еволюцията на спиралността на еруптиращия протуберанс.

В разглеждания от нас случай MB (примката) на протуберанса има ляво (обратно на часовниковата стрелка) усукване от 6π около основната му ос, което по време на ерупцията се пренася от ниски-

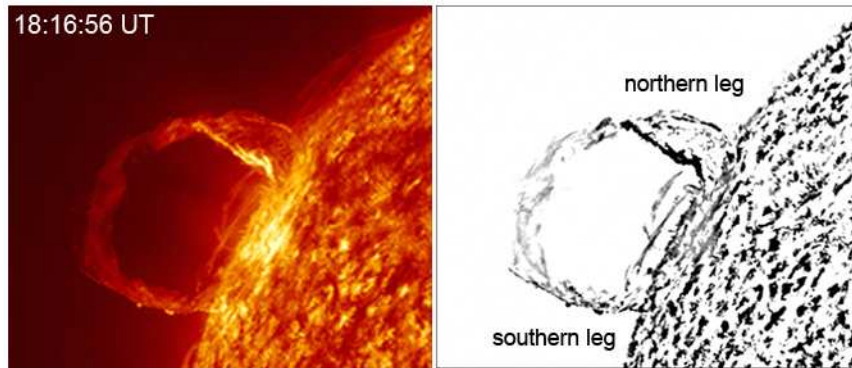
те части на МВ на ЕП към върха (апекса) му, предизвиквайки ляво извъртане на цялото МВ. Усукването около тръбата ясно се забелязва на регистрациите на АІА He II 304 Å докато извъртането на МВ на ЕП е видимо в изображенията на EUVI/STEREO B. Много е важен фактът, че двата вида усуквания са в една и съща посока, което е главно условие за наличието на кинк-нестабилност (Hood and Priest, 1979). Това ни позволява да направим заключението, че разглеждания тук протуберанс е дестабилизиран от кинк-нестабилност, въпреки, че не бива да се изключва възможната роля и на друг тип нестабилности. Категорично заключение за началото на ерупцията би могло да се направи ако са налични измервания на магнитното поле в стъпките на протуберанса, комбинирани със спектроскопични данни.

Два дена след ерупцията протуберансът частично се възстановява на същото място. На 31 март и 2 април 2010 г. На 31 март влакното е видимо във факелна площадка на изображенията в H_{α} , получени от обсерваторията в Коимбра. Потърсихме индикации за повторна поява в далечната ултравиолетова област, но дори и в горещата линия на He II не успяхме да открием такива. Едно възможно обяснение е, че част от протуберансовия материал може да се е стекъл обратно във фотосферата, докато друга част е останала в магнитния скелет на протуберанса, високо в короната. Друга възможност е материалът да не се е възстановил напълно при ниските температури, характерни за влакната.

Въз основа на анализа и изследването на кинематичната картина на ЕП бяха получени следните основни резултати.

1. ЕП се наблюдава като магнитна арка (примка) с фиксирани във фотосферата крака. Протуберансовото тяло е формирано от ляво спирално усукани нишки около оста на примката. Усукването е изчислено на 6π (3 оборота) (Фиг. 4.2).

2. По време на ерупцията, усукването на магнитното поле около оста на протуберанса прогресивно се трансформира в ляво усукване (лявовъртящ кинк) на цялата примка, което се вижда ясно на

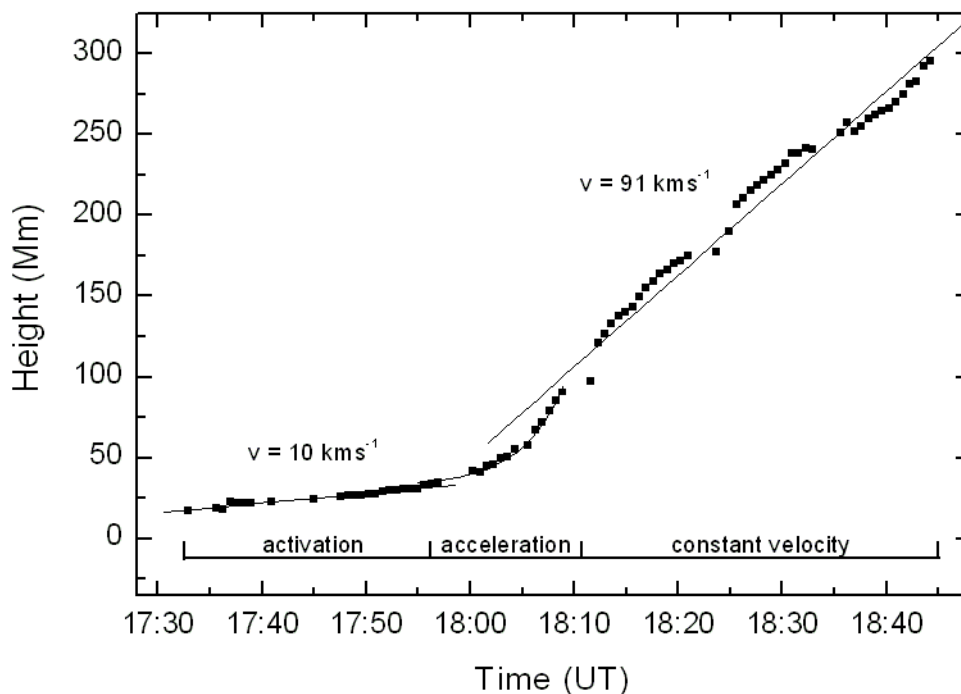


Фигура 4.2: AIA/SDO регистрация на еруптивния протуберанс от 30 март 2010 г. в 18:17 UT (вляво) и рисунка на съответното изображение (вдясно).

изображенията на EUVI/STEREO B. Проекцията на пресечната точка на краката на усукващата се протуберансова примка се измества към слънчевата повърхност (намаляваща височина) с нарастването на степента на извъртане (кинк) на примката. Едновременно с това се наблюдава (на изображенията на AIA/SDO) стичане на протуберансова плазма към хромосферата.

3. По диаграмата височина-време (Фиг. 4.3) бяха определени отделните фази от еволюцията на ЕП: фаза на активиране на протуберанса, ускоряване и фаза на ерупция с постоянна скорост. ЕП достига максимална височина от 526 000 km в зрителното поле на инструмента AIA/SDO. Изображенията на ЕП от EUVI/STEREO B, показват че проекцията на реалната максимална височина на ЕП е от порядъка на $1 R_{\odot}$. От тези изображения е установено също, че след достигане на височина от $\sim 700\,000$ km, примката на ЕП започва да се снижава, т.е. показва поведение типично за ерупция от ограничен тип. Тези факти ни дават основание да смятаме, че е напълно възможно фазата на издигане с постоянна скорост да е била последвана от фаза с отрицателно ускорение, преди примката на ЕП да започне да се снижава.

4. Установено бе, че падащи надолу "капки" плазма имат високи температури на ниски височини, което може да се дължи на сблъсъка им със статичната плазма в краката и резултатното нагряване, поради свиването на плазмата.



Фигура 4.3: Диаграма височина-време на протуберансовата ерупция. Означени са трите фази на ерупцията: активация, ускоряване, и издигане с постоянна скорост.

5. След ерупцията протуберансът възстановява първоначалната си позиция. Протуберансът (vlakното) частично се реформира, което означава, че или част от материала се е върнал обратно във хромосферата, или, че не целият протуберансов материал е възстановил първоначалната си температура, типична за наблюдението му в H_{α} линията.

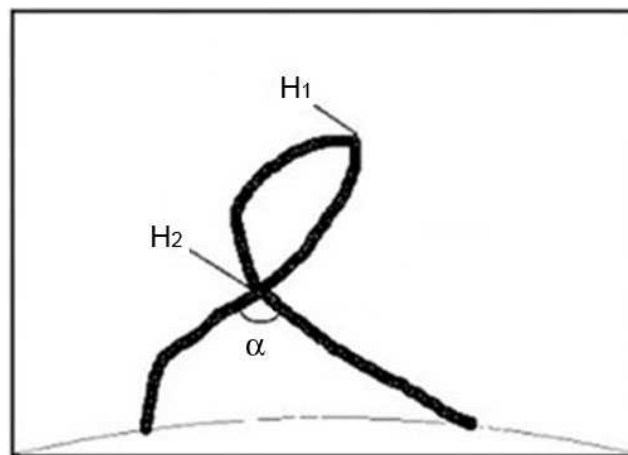
6. Еруптивният протуберанс е асоцииран с издигаща се тясна примка, съдържаща празна кухня и разположена в северната периферия на обширно ИКМ, което се наблюдава на източния лимб. Изхвърлянето на тясната примка най-вероятно е било инициирано от протуберансовата ерупция. Предвид разположението на асоциираната с ЕП тясна примка в структурата на ИКМ, магнитното поле обкръжаващо протуберанса е силно асиметрично по отношение на неговата позиция. Частичното реформиране на vlakното след ерупцията и силно асиметричното магнитно обкръжение на ЕП са допълнителни аргументи в полза на заключението, че ерупцията на протуберанса от 30 март 2010 г. представлява един от редките случаи на ограничена

(провалена) ерупция.

4.2 Еруптивен протуберанс от 7 май 1979

Още един пример за ерупция, иницирана от кинк-нестабилност е ограничената ерупция на протуберанс от 7 май 1979 г. В този случай наблюденията са направени с наземен инструмент. Протуберансът е наблюдаван в линията $H\alpha$ на западния лимб, на ширина $N38^\circ$. Регистрациите са направени между 13:50 UT и 14:27 UT, през интервал от време около 1.5 минути.

ЕП от 7 май 1979 г. представлява спирално усукана примка с фиксирани във фотосферата крака (Фиг. 4.4). Протуберансът е еруптивна фрагмент от дългоживущо влакно, разположено по МИЛ в мултиполярна магнитна област.



Фигура 4.4: Рисунка на протуберансовата примка, ляво извъртяна около оста "апекс - слънчевата повърхност". Означени са основните точки (H_1 и H_2), използвани при измерванията, както и ъгълът α .

Основните резултати от изследването са:

1. Спираловидното завъртане (writhing) на примката (МВ) на ЕП и усукването (twist) на магнитното поле в магнитното въже на примката, около нейната ос, показват един и същи знак - ляво (обратно на часовниковата стрелка) въртене, т.е налице е условието за развитие на кинк-неустойчивост.

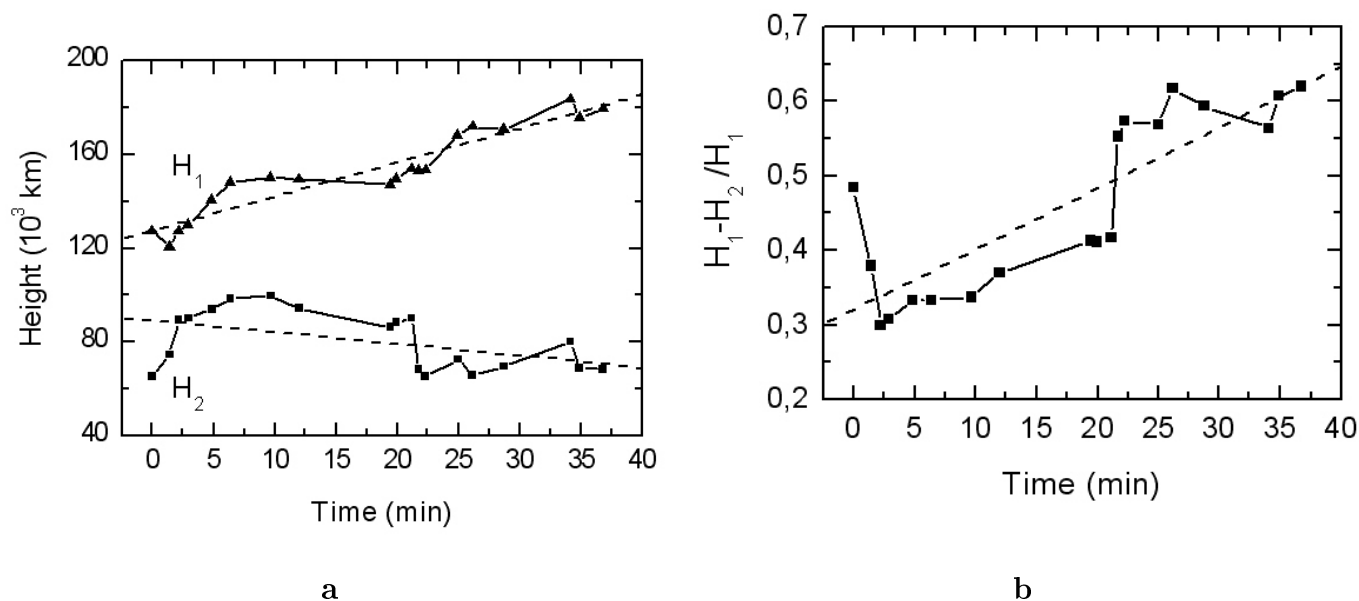
2. Степента на завъртане на примката е оценена качествено посредством измерване на два параметъра: нормализираните разлики меж-

ду апекса на примката и проекцията на пресечната точка на краката (Фиг. 4.5 b) и ъгълът α между краката на протуберанса под пресечната точка. По наше мнение, кинк-неустойчивостта вече е била в ход, когато са започнати наблюденията и до края на ерупцията примката на ЕП представлява силно извъртяно магнитно въже. Резултатите са в съгласие с други наблюдателни (напр. Ji et al., 2003) и теоретични изследвания (напр. Török and Kliem, 2005), които показват, че подобни измервания добре показват процеса на извъртане (kinking) на примката на ЕР около оста “апекс - слънчевата повърхност”, когато тя се наблюдава на лимба.

3. Профилът височина-време на апекса на протуберансовата примка (Фиг. 4.5 a), както и скоростта на издигане на протуберанса, също потвърждават, че наблюденията са започнали на по-късна фаза от ерупцията. Началото на ерупцията и ускоряващата фаза на ЕП не са регистрирани.

4. Наблюдавахме осцилации на ъгъла α с основен период от 14 минути, които заедно с нарастването на ъгъла, предполагат осцилиране на цялата протуберансова примка (магнитно въже) по време на ерупцията. Подобни осцилации могат да бъдат възбудени или от вътрешни причини (кинк-неустойчивост) или от външен агент - вълни на Моретон, разпространяващи се от областта с висока избухваща активност югоизточно от протуберанса, час преди наблюденията.

5. Предложили сме сценарий за ограничената ерупция протуберанс от 7 май 1979 г., в който се предполагаме възникване “breakout”-тип магнитно присъединяване над протуберансовата примка, вътре в магнитното въже. Протуберансът е асоцииран с бавно СМЕ, което може да се разглежда като следствие от образуването на вторично магнитно въже, над първоначално съществуващото, и неговата ерупция. Магнитното поле, обкръжаващо протуберанса, остава затворено и спира издигането на ЕП при височина от 180×10^3 км.



Фигура 4.5: Височината на върха на протуберансовата примка (H_1) и проекцията на пресечната точка на краката (H_2) (a); Нормализирани разлики между височините на апекса на примката на протуберанса и проекцията на пресечната точка между краката на усуканата примка ($(H_1 - H_2) / H_1$) като функция на времето (b). Времето е дадено в минути след 13:49 UT.

5 Ерупция на протуберанс, причинена от магнитно присъединяване. $H\alpha$ диагностика на пред-еруптивната фаза

Смята се, че ерупциите на протуберанси са физически свързани с присъединяването на магнитните силови линии (Rompolt, 1990; Švestka and Cliver, 1992; Tandberg-Hanssen, 1995; Tsuneta, 1996). Съществуват наблюдения в рентгеновата, далечната ултравиолетова област и $H\alpha$, които показват че усилването на излъчването в тези дължини на вълните може да се разглежда като индиректен признак на процес на магнитно присъединяване (Sterling and Moore, 2003; Attrill et al., 2005; Chifor et al., 2006). Тези наблюдения сочат, че процес на магнитно присъединяване, протичащ около стъпките на протуберансовата арка може да дестабилизира целия протуберанс и да доведе до неговата ерупция или до ерупция на част от тялото на протуберанса.

В настоящата глава е проследена еволюцията и кинематиката на еруптивен протуберанс, наблюдаван на 8 юни 1980 г. и разглеждан от Ромполт (1994) като пример за ерупция, инициирана от процес на присъединяване на магнитното поле. Както показва Martin (1980),

повишаването (потъмняването) на яркостта на протуберанс (влакно) в линията H_{α} е сигурен признак за неговата пред-еруптивна активност. Това ни мотивира да изследваме поведението на H_{α} яркостта на протуберанса от 8 юни 1980 г. Основният акцент в нашето изследване е пространствената и времевата връзка между процесите на активация и ерупция на протуберанса и усилването на излъчването в H_{α} линията. Нашата цел е да определим доколко изменението на яркостта на протуберанса може да се разглежда като индикатор за магнитно присъединяване, водещо до неговата ерупция и последващото възстановяване на магнитната конфигурация в околностите на протуберанса.

5.1 Анализ на данните и метод за диагностика

Еруптивният протуберанс от 8 юни 1980 г. (КР 1696) е наблюдаван на източния лимб между 07:06 UT и 09:02 UT, на средна хелиографска ширина $S18^{\circ}$. Тялото на протуберанса е съставено от две основни арки. Наблюденията покриват четири фази от еволюцията му: спокойно състояние (спокоен протуберанс); активация; ерупция; и пост-еруптивна фаза.

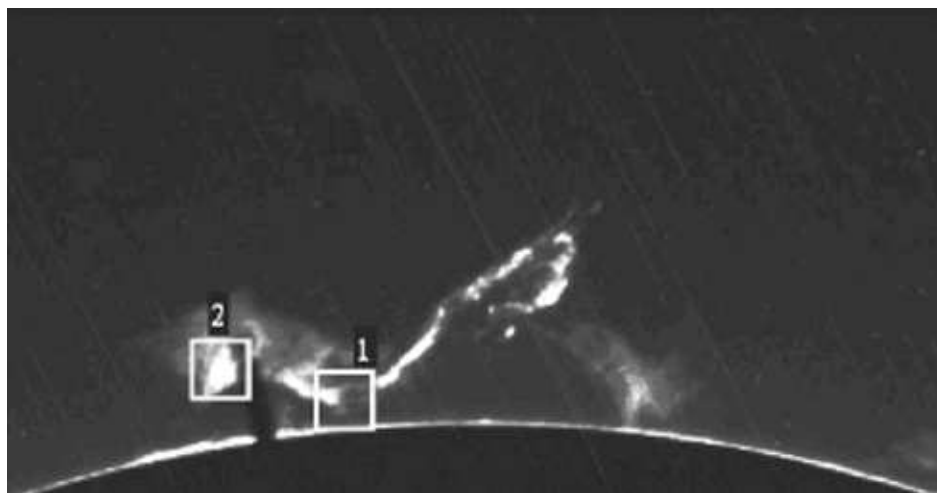
Еруптивният протуберанс е идентифициран като западния край на влакно в разрушаваща се активна област. Ерупцията е регистрирана по време на втората ротация от живота на влакното. Тъй като до настоящия момент поведението на яркостта на протуберансите не е изследвана като индикатор на процеси на магнитно присъединяване, ние разработихме метод за измерване на яркостта на протуберанса от 8 юни 1980 г.

Като индикатор на процеса на магнитно присъединяване сме използвали пред-еруптивното H_{α} увеличаване на яркостта в две различни части на протуберансовото тяло.

Използваният метод се базира на относителните яркости в H_{α} линията в условни единици. За проследяване на яркостния профил на изображенията сме използвали хистограми. Хистограмата дава информация, както за разпределението на яркостта, така и за контраста

в едно изображение. Всеки един от пикселите в изображението има числена стойност на градация, отговаряща на определена яркост и цвят. Хистограмата представлява честотата, с която се среща дадена числена стойност на пикселите. Пиковете в хистограмите представляват най-често срещаната стойност на пикселите в изображението. Височината на хистограмата отговаря на броя пиксели с дадена яркост. Освен това сме използвали и процедури за намиране на статистическите свойства на отделни области, като средна и максимална стойност на пикселите, стандартно (средно квадратично) отклонение, вариации в стойностите на пикселите. Тези функции, както и хистограмите, описват статистически областите на изследване.

Методът е приложен върху два еднакви квадратни участъка от тялото на протуберанса, всеки с размери 60×60 пиксела. Първата област (квадратче номер 1 на Фиг. 5.1) покрива централния крак между двете основни протуберансови арки, където се предполага, че протича процесът на магнитно присъединяване. Втората област (квадратче номер 2 на Фиг. 5.1) е избрана върху предната част, наречена от нас ("глава") на протуберанса. Изменението на яркостта в тези части от протуберансовото тяло е сравнено с неговата еволюция.



Фигура 5.1: H_α филтрограма на ЕП от 08:28 UT с двете области използвани за диагностика на магнитното присъединяване

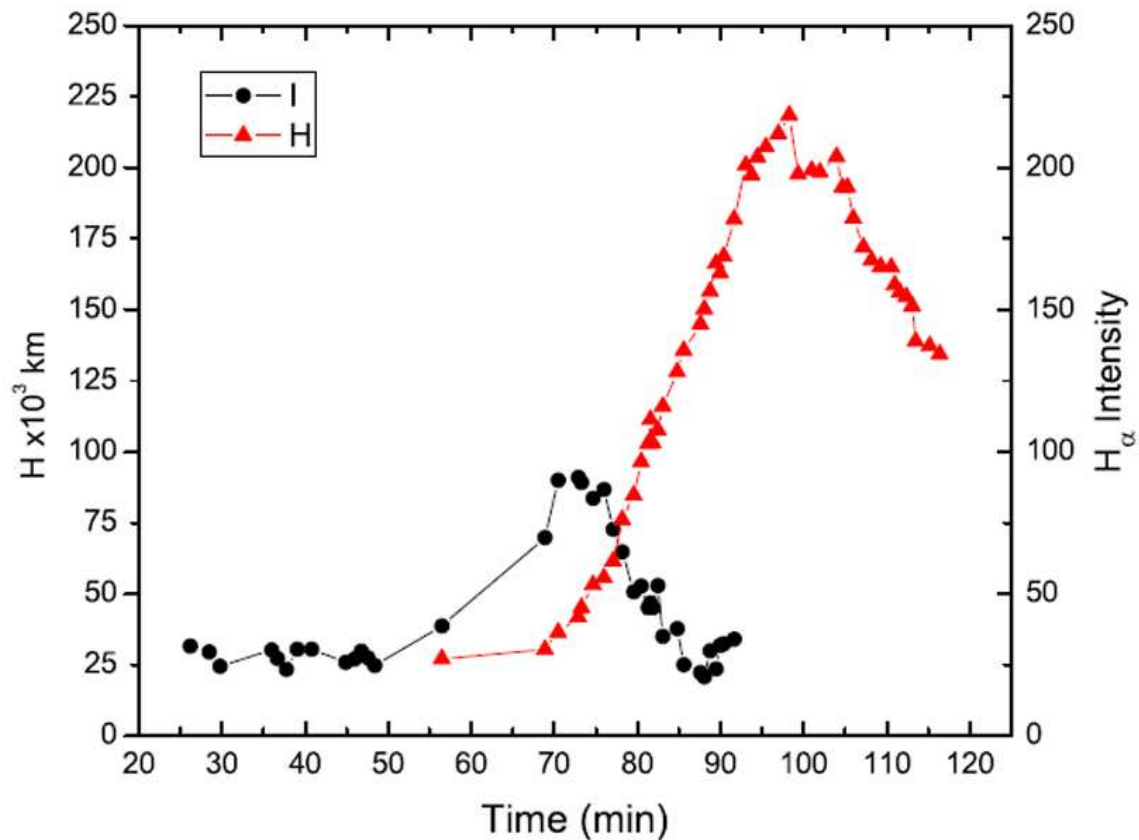
В разглежданите области H_α яркостта се увеличава през интервала от време между 07:55 UT и 08:16 UT. По същото време се наб-

людава ускоряване на изхвърлената структура. Процесът е по-ясно изразен в централния крак (Фиг. 5.1 кв. 1), където е и предполагаемото място на магнитното присъединяване. Въпреки по-неопределеното поведение на разпределението на яркостта в "главата" (Фиг. 5.1 кв. 2), можем да предположим, че процесът на магнитно присъединяване оказва влияние върху цялото тяло на протуберанса. Според Rompolt (1994) присъединяването се извършва между две съседни части с различна магнитна полярност от фината структура на протуберанса.

Основните разлики между двете изследвани области са в степента на нарастване на яркостта. В област 2 нарастването е по-плавно, с краткотрайно увеличение на яркостта, последвано от продължително избледняване в H_{α} . Яркостта в централния крак рязко се увеличава, след което е последвана от по-кратковременно намаляване.

На Фиг. 5.2 са сравнени еволюцията на H_{α} яркостта в централния крак и изменението на височината на изхвърлената част от протуберанса. Еруптиращата протуберансова структура се издига с постоянна скорост от 120 km s^{-1} по същото време, когато в област 1 се наблюдава намаляване на яркостта (потъмняване). По време на потъмняването централния крак на протуберанса постепенно избледнява и когато еруптиращата структура достига височина $27\,500 \text{ km}$, той е напълно невидим в H_{α} линията. Както споменава Rompolt (1994), магнитно присъединяване е най-вероятната причина средният крак на протуберанса да се трансформира в т.н. "висящ" ("hanging") крак. Подобни морфологични промени са типичен резултат от протичането на вътрешно (под протуберанса), "tether-cutting" магнитно присъединяване (Sterling and Moore, 2003; Sterling and Moore, 2004).

Нашето изследване показва съществуването на процес на магнитно присъединяване в ниската атмосфера, под протуберанса, преди неговата ерупция. Повишаването на яркостта наблюдавано в H_{α} е тясно свързано, пространствено и времево, с подобно увеличаване на излъчването в далечната ултравиолетова част на спектъра. В това отношение получените от нас резултати за поведението на H_{α} яр-



Фигура 5.2: Диаграма височина-време на ЕП от 8 юни 1980 г. (триъгълници) и времевия профил на средните стойности на пикселите за box 1 (точки). Времето е дадено в минути след 07:06 UT.

костта на протуберанса от 8 юни 1980 г. с хода на неговата активация и ерупция са в много добро съгласие с резултатите от други изследвания (Sterling and Moore, 2003; Chifor et al., 2006, 2007). Повишаването на яркостта в H_{α} се дължи на интензивното нагряване на протуберансовата плазма, което е следствие от процес на магнитно присъединяване, докато намаляването на яркостта в H_{α} се дължи на промени в плътността на плазмата.

5.2 Заключение

Въз основа на анализа на H_{α} яркостта и еруптивния процес на протуберанса от 8 юни 1980 г. бяха получени следните основни резултати.

1. Повишаването на яркостта в H_{α} линията в избраните участъци започва по същото време, когато влакното се активира и навлиза във фаза на бавно издигане.

2. Повишаването на яркостта в "главата" достига своята максимална стойност по времето, когато еруптиращата протуберансова структура се ускорява, което означава, че развитието на магнитно присъединяване под централния крак е в състояние да дестабилизира цялото протуберансово тяло.

3. Усилването на яркостта в H_{α} в централния крак на протуберанса достига максимум по времето, когато се наблюдава началото на ерупцията и протуберансът навлиза във фазата на бързо издигане. Пред-еруптивното усилване на H_{α} яркостта е последвано от потъмняване, което корелира по време с фазата на бърза протуберансова ерупция.

4. Корелацията по време между усилването на H_{α} яркостта и последвалото го потъмняване, и еволюцията на протуберанса и нейното добро съгласие с резултати от предишни изследвания на еруптивни протуберанси и влакна, подсказва че пред-еруптивното H_{α} повишаване на яркостта на тялото на протуберанс може да бъде използвано успешно като предвестник на процеси на магнитно присъединяване, които могат да инициират неговата ерупция.

5. Поведението на H_{α} яркостта в горната част на изхвърлената структура на протуберанса, както и характерът на пост-еруптивната фаза подсказват вероятността за протичане на магнитно присъединяване в горната част на структурата, което води до преструктуриране на част от магнитната система на протуберанса.

6 Основни резултати

I. Изследвани са морфологията, кинематиката и еволюцията на спиралността на примкообразен протуберанс по време на ерупция му, на базата на мултиинструментални космически наблюдения.

Еднаквата посока на усукване на нишките на протуберансовото тяло и на основната ос на протуберанса, както и степента на усукване над критичната стойност от 2π след фазата на активиране, говорят за наличието на условия за kink-неустойчивост. Няма никакви косвени индикации, нито в тялото на протуберанса, нито в неговите околности, за развитието на процес на магнитно присъединяване. Последвалото намаляване на височината на влакното/протуберанса след ерупцията и неговото частично възстановяване на първоначалната позиция два дена след ерупцията, показват че наблюдаваната ерупция е от ограничен тип.

II. По наземни наблюдения сме изследвали ограничената ерупция на протуберанс, за който са на лице условия за развитие на kink – неустойчивост. Направена е качествена оценка на степента на усукване на примката. Предложен е възможен сценарий на ограничената ерупция.

III. Изследвани са динамиката и кинематиката на пет ЕП от I и II тип. Получени са зависимостите на височините от времето и хоризонталните отмествания по време на ерупциите.

Основните кинематични характеристики на различните ЕП са сравнени от гледна точка на асоциацията им с топологично различени части на еруптиращата ЕМС. Установени са важни различия в кинематиката и еволюцията им.

Специално внимание е отделено на кинематичната картина на пост-еруптивната фаза на протуберанс от II тип (8 май 1979 г.). Получените резултати са показателни за кинематиката и еволюцията на магнитното поле в дъното на еруптиращата ЕМС.

IV. Направен е анализ на опростяването на вътрешната структура на протуберанс по дълга серия от H_α филтрограми (20 септември 1980 г.). Определени са динамичните характеристики на ерупцията.

V. Като предшественик на ерупцията е изследвано повишаването на яркостта в H_α на различни части от тялото на протуберанса от 7 май 1979 г.

VI. Разработен е метод за изследване на H_α яркостта като прекурсор на ерупцията.

Резултатите показват, че пред-еруптивното увеличаване на яркостта може да бъде използвано като индиректен признак за наличието на процес на магнитно присъединяване, който се разглежда като отключващ механизъм на ерупцията на протуберанса.

7 Публикации, включени в дисертационния труд

Основните резултати от дисертацията са публикувани в следните работи:

1. Koleva, K., Madjarska, M. S., Duchlev, P., Schrijver, C. J., Vial, J.-C., Buchlin, E., Dechev, M. : 2012, “Kinematics and helicity evolution of a loop-like eruptive prominence”, *A&A* **540**, A127.
2. Duchlev, P., Koleva, K., Dechev, M., Petrov, N., Rompolt, B., Rudawy, P.: 2010, “A Confined Prominence Eruption on 7 May 1979”, *Bulgarian Astronomical Journal* **14**, 89.
3. Duchlev, P., Koleva, K., Kokotanekova, J., Dechev, M. Ts., Petrov, N., Rompolt, B. and Rudawy, P.: 2010, “Kinematics and Evolution of Eruptive Prominences of Two Different Basic Type”, *Bulgarian Astronomical Journal* **13**, 47.
4. Duchlev, P., Dechev, M. Ts., Koleva, K. , Kokotanekova, J., Rompolt, B. and Rudawy, P.: 2010, “Kinematics of the Post-Eruptive Phase of an Eruptive Prominence on 8 May 1979”, *Bulgarian Astronomical Journal* **13**, 69.
5. Koleva, K., Duchlev, P., and Dechev, M.: 2009, “ H_{α} Brightness Evolution During the Eruption of Prominences of 7 May 1979 and 8 June 1980”, VI Serbian-Bulgarian Astr. Conf., 7-11 May 2008, Belgrade, Serbia, Publ. Astr. Soc. "Rudjer Boskovic" **9**, 189.
6. Koleva, K. : 2007, “ H_{α} Diagnostics of the Pre-Eruptive State of Prominence on 8 June 1980”, *Bulgarian Astronomical Journal* **9**, 99.
7. Duchlev, P., Koleva, K., Dechev, M., and Kokotanekova, J.: 2007, “Evolution and Dynamics of an Eruptive Prominence on 20 September 1980”, *Suppl. Bulg. J. Phys.* **34** part 2, *ASTRONOMY AND SPACE SCIENCE*, M. K. Tsvetkov, L. G. Filipov, M. S. Dimitrijević, L. Č. Popović (eds.), 310.
8. Dechev, M., Duchlev, P., Koleva, K., and Kokotanekova, J.: 2007, “An Interesting Case of Eruptive Prominence on 8 June 1980”, *Suppl. Bulg. J. Phys.* **34** part 2, *ASTRONOMY AND SPACE SCIENCE*, M. K. Tsvetkov, L. G. Filipov, M. S.

Dimitrijević, L. Č. Popović (eds.), 248.

9. Koleva, K., Dechev, M., and Duchlev, P.: 2007, “Possible II type EP by its kinematic characteristics”, Suppl. Bulg. J. Phys.**34** part 2, ASTRONOMY AND SPACE SCIENCE, M. K. Tsvetkov, L. G. Filipov, M. S. Dimitrijević, L. Č. Popović (eds.), 336.
10. Koleva, K., Duchlev, P., Dechev, M., Petrov, N., Kokotanekova, J., Rompolt B., and Rudawy, P.: 2006, “Processing of the Eruptive Prominence Images”, in **Virtual Observatory: Plate Content Digitization, Active Mining & Image Sequence Processing**, M. Tsvetkov, V. Golev, F. Murtagh and R. Molina (eds.), Heron Press, Sofia, 317.
11. Dechev, M., Duchlev, P., Koleva, K., Kokotanekova, J. and Petrov, N.: 2004, “Kinematics of two Eruptive Prominences” in Proc. of the 4th Serbian-Bulgarian Astronomical Conference, 21-24 April 2004, Belgrade, Serbia, eds. M. S. Dimitrijevic, V. Golev, L. C. Popovic and M. Tsvetkov, 145.

Забелязани цитирания (на публикация 1):

1. Su, Y., van Ballegooijen, A.: 2012, “Rotating Motions and Modeling of the Erupting Solar Polar-crown Prominence on 2010 December 6”, ApJ, **764**, 91.
2. Schmieder, B., Demoulin, P., Aulanier, G.: 2012, “Solar filament eruptions and their physical role in triggering Coronal Mass Ejections”, 2012arXiv1212.4014S.

Използвани съкращения

ЕМС - Едромащабна Магнитна Система

ЕП - Еруптивен Протуберанс

ИКМ - Изхвърляния на Коронална Маса

КР - Керингтонова Ротация

КМП - Конфигурация на Магнитното Поле

МВ - Магнитно Върже (Magnetic Flux Rope)

МИЛ - Магнитна Инверсна Линия

МП - Магнитно Поле

СП - Спокоен Протуберанс(и)

AIA - Atmospheric Imaging Assembly

EUVI - Extreme UltraViolet Imager

DB - Disparition Brusque (Внезапно изчезване)

GONG - Global Oscillation Network Group

LASCO - Large Angle and Spectrometric Coronagraph

SDO - Solar Dynamics Observatory

STEREO - Solar TERrestrial RELations Observatory

Благодарности

Изказвам дълбоката си благодарност и признателност на моя ръководител доц. д-р Петър Духлев за всестранната подкрепа и ползотворните дискусии.

Искам специално да благодаря на Мария Маджарска, Момчил Дечев, проф. Ж-К. Виал (IAS, Paris) и доц. Петя Павлова (ТУ София, филиал-Пловдив) за отделеното време, съвместната работа и коментари по темата на дисертацията. Благодаря на колегите от Института по астрономия за ценните съвети и помощ.

Благодаря най-сърдечно на семейството и приятелите ми за подкрепата и разбирането.

Литература:

- Attrill, G. D. R., Narukage, N., Shibata, K., and Harra, L. K.: 2005, in *Chromospheric and Coronal Magnetic Fields*, D.E. Innes, A. Lagg and S.K. Solanki (eds.), ESA SP-596, 11
- Chen, J., Marqué, C., Vourlidas, A., Krall, J. and Schuck, P. W.: 2006, *Astrophys. J.* **649**, 452
- Chifor, C., Mason, H. E., Tripathi, D., et al.: 2006, *A&A* **458**, 965
- Chifor, C., Tripathi, D., Mason, H. E., Dennis, B. R.: 2007, *A&A* **472**, 967
- Hood, A. W. and Priest, E. R.: 1979, *Solar Phys.* **64**, 303 Ji, H., Wang, H., Schmahl, E. J., Moon, Y.-J., Jiang, Y.: 2003, *ApJ* **595**, L135
- Martin, S. F.: 1980, *Solar Phys.* **68**, 217
- Rompolt, B.: 1984, *Adv. Space Res.* **4**, No. 4, 357
- Rompolt, B.: 1990, Hvar Observatory Bulletin, Volume **14**, Issue 1, p.37
- Rompolt, B.: 1994, in *Advance in Solar Physics*, Catania, Italy, 11-15 May, 1993, 155
- Rompolt, B.: 1998, in *New Perspectives on Solar Prominences*, D. Webb, D. Rust and B. Schmieder (eds.), IAU Colloq. 167, ASP Conference Series vol. 150, 330
- Sterling, A. C., Moore, R. L.: 2003, *ApJ* **599**, 1418
- Sterling, A. C., Moore, R. L.: 2004, *ApJ* **613**, 1221
- Švestka, Z. and Cliver, E. W.: 1992, in *Eruptive Solar Flares*, Z. Švestka, B. Jackson and M. Machado (eds.), Springer-Verlag, Berlin, 1
- Tandberg-Hanssen, E. : 1995, *The Nature of Solar Prominences*, D Reidel Publ. Co., Dordrecht
- Török, T., Kliem, B.: 2005, *ApJ* **630**, L97 Tsuneta, S.: 1996, *ApJ* **456**, L63

Abstract:

The main purpose of this thesis is to study different types of prominence eruptions and to investigate the morphology as well as kinematic and helicity evolution of prominences during their eruption.

The studies have been performed in the context of the magnetic flux rope model of solar prominences and the results for different types of eruptions have been compared.

This study is based on observations of 8 eruptive prominences, obtained with ground-based observations and the tools of space observatories.

The main results from this study are:

1. The phenomenology of an eruptive loop-shaped helically twisted prominence with fixed footpoints (registered on 30 March 2010) was investigated using state-of-the-art observations from the Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on board the Solar Dynamics Observatory (SDO) in the He II 304 Å EUV passband, EUVI/STEREO B and LASCO/SoHO. We have the unique opportunity to combine limb with on-disk observations, thanks to the different observational position of the instruments.

The same sign of the prominence body twist and writhe, as well as the amount of twisting above the critical value of 2π after the activation phase indicate that possibly conditions for kink instability were present. No signature of magnetic reconnection was observed anywhere in the prominence body and its surroundings. The filament/prominence descent following the eruption and its partial reformation at the same place two days later suggest a confined type of eruption. The asymmetric background magnetic field possibly played an important role in the failed eruption.

Other eruptive prominences studied in the thesis were observed in between 1979 and 2001 with the Small Coronagraph in the Astronomical Institute of Wrocław University. The filtergrams were obtained generated with 3 Å H_α filter and cover different phases in the evolution of the EPs.

2. Using a ground-based observations we studied the confined prominence eruption, which are present conditions for the development of kink-instability. The degree of twisting loop was qualitatively evaluated. We proposed a scenario of confined eruption.

3. The kinematics and the evolution of five eruptive prominences observed in Wrocław, Poland were studied. Two of them are classical examples for the two basic different types of eruption (type I and type II, according to Rompolt, 1984).

Their basic kinematic characteristics were compared and discussed from the point of view of their associations with topologically different parts of the erupting huge magnetic system. Some essential differences in their kinematics and evolution were established.

A special attention was paid to the kinematic characteristics of the post-eruptive phase of EP of type II when the prominence plasma fell back to the chromosphere. The obtained results are indicative of the evolution of the magnetic field at the bottom of

HMS.

4. An analysis of the evolution and the untwisting of the internal structure during the prominence eruption (II type) was performed on the base of a long series of H_α filtergrams of the eruptive prominence of 20 September 1980 was analysed. The dynamic characteristics of the prominence eruption were determined.

5. The evolution of an eruptive prominence with a reconnection of magnetic field is investigated. The main goal is to study the precursor eruption signatures, observed in H_α , as well as their relation to the prominence destabilization. A method using the mean values of relative H_α brightness of the EP body was developed. The observed H_α brightening was discussed with respect to low atmosphere magnetic reconnection that might be responsible for the prominence destabilization and acceleration. Our results suggest that the pre-eruption H_α brightening can be used as an indirect signature of a magnetic reconnection process, considered as a trigger mechanism for a prominence eruption.

Съдържание

1	Структура на дисертацията	3
2	Наблюдателен материал. Обработка на данните	5
3	Ерупция на протуберанси от I и II тип	5
4	Ерупция на протуберанс индуцирана от кинк неустойчивост	12
4.1	Примкообразен протуберанс от 30 март 2010 г.	12
4.2	Еруптивен протуберанс от 7 май 1979	17
5	Ерупция на протуберанс, причинена от магнитно присъединяване. $N\alpha$ диагностика на пред-еруптивната фаза	19
5.1	Анализ на данните и метод за диагностика	20
5.2	Заключения	23
6	Основни резултати	25
7	Публикации, включени в дисертационния труд	27
	Благодарности	30
	Литература	30
	Abstract (на английски)	31