

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta

Studium magnetických struktur ve sluneční koróně

Diplomová práce

Bc. Václav Šebelík

Vedoucí práce: RNDr. Petr Jelínek, Ph.D.

Konzultant: Doc. RNDr. Marian Karlický, DrSc.

České Budějovice 2015

Šebelík, V., 2015: Studium magnetických struktur ve sluneční koróně. [Study of magnetic structures in the solar corona. Mgr. Thesis, in Czech.] - 52 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace:

Tato práce se zabývá porovnáním dat získaných ze slunečního rádiového spektrografu RT5 v Ondřejově a dat ze sondy SDO. V teoretické části práce je stručně popsána sluneční koróna a současný stav jejího poznání. Praktická část se věnuje samotnému zpracování dat pomocí vytvořených programů. Ze všech struktur nalezených ve spektrogramech byly vybrány struktury typu zebra, které byly zkoumány podrobněji.

Annotation:

The thesis presents a comparison of data obtained from the solar radio spectrograph RT5 in Ondřejov and data from the space probe SDO. In the theoretical part of the thesis the solar corona and the current state of knowledge are briefly described. The practical part is devoted to the processing of obtained data using developed programs. From all of structures found in the spectrograms, zebra structures have been selected for more detailed study.

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne

.....

Václav Šebelík

Poděkování:

Na tomto místě chci věnovat poděkování vedoucímu diplomové práce Petru Jelínkovi. Dále chci poděkovat konzultantovi Marianu Karlickému a také Miroslavu Bártovi, Pavlu Kotrčovi a Haně Meszárošové z AsÚ ČR, v. v. i., kteří mi podali řadu užitečných informací a vždy byli ochotni pomoci. Poslední a největší poděkování patří mým rodičům, mojí manželce a celé mojí rodině za všechno, co pro mě udělali.

Obsah

1 Úvod	1
2 Literární přehled	3
2.1 Sluneční koróna	3
2.2 Sluneční rádiový spektrograf RT5	8
2.3 Klasifikace pozorovaných struktur	9
2.4 Struktury typu zebra.....	11
2.5 <i>Solar Dynamics Observatory</i> (SDO)	12
2.6 <i>Atmospheric Imaging Assembly</i> (AIA)	12
2.7 Struktury pozorované přístrojem AIA	13
3 Metodika – Analýza dat z RT5 a porovnání s daty z jiných přístrojů	16
3.1 Data ze slunečního rádiového spektrografu RT5 a jejich zpracování.....	16
3.2 Data z přístroje AIA/SDO a jejich zpracování	19
4 Výsledky.....	26
4.1 Zebra z 1. srpna 2010.....	27
4.2 Zebra z 15. února 2011	29
4.3 Zebra z 24. února 2011	30
4.4 Zebra z 9. srpna 2011	32
4.5 Zebra z 24. září 2011	33
4.6 Zebra z 13. června 2012.....	34
4.7 Zebra z 11. dubna 2013.....	36
5 Diskuze	38
6 Závěr.....	41
7 Literatura	42
8 Internetové zdroje	45
Seznam obrázků.....	46
Seznam tabulek.....	48
Příloha 1.....	49
Příloha 2.....	50

1 Úvod

Slunce je naší nejbližší hvězdou, která darovala život celé naší planetě. Lidstvo se odjakživa snaží pochopit celou podstatu Slunce, od jeho extrémně hustého a teplého jádra, přes vrstvu v zářivé rovnováze, nedávno objevenou tachoklinu, proudy v konvektivní zóně, fotosféru a její sluneční skvrny, chromosféru, přechodovou oblast, ve které dochází k obrovskému nárůstu teploty, až po korónu, viditelnou např. při zatmění Slunce. Jeho pozorováním máme možnost zkoumat fyzikální jevy, které by na Zemi nebylo možné experimentálně provést. A přestože tato pozorování probíhají již odpradáva, stále je mnoho nezodpovězených otázek, namátkou ohřev sluneční koróny.

Jednou z možností zkoumání sluneční koróny je její pozorování v dlouhých vlnových délkách. Jejich výhodou je to, že velmi lehce a bez velkých ztrát procházejí zemskou atmosférou a nabízí nám tak „otevřené okno do vesmíru“. První takováto pozorování byla provedena víceméně náhodou vědcem českého původu Karlem Janským (Aschwanden 2005). Po mnoha letech zdokonalování techniky můžeme dnes pozorovat i velmi jemné struktury vznikající na Slunci.

Pozorování v dlouhých vlnových délkách má velkou nevýhodu v úhlovém rozlišení (kvalitnější pozorování by měla být prováděna zařízením *Atacama Large Milimeter Array*, které je ve fázi testování), má však velmi rychlou kadenci snímků. Naproti tomu snímání sluneční koróny v EUV (extrémně ultrafialové) oblasti spektra nám umožňuje pozorovat Slunce s dosud nejlepším prostorovým rozlišením. Přístroje umožňující studium sluneční koróny v krátkovlnném oboru musejí být umístěny nad zemskou atmosférou, protože záření v EUV oblasti není atmosférou propouštěno. Výsledkem toho je ale bohužel menší časové rozlišení takovýchto přístrojů (Aschwanden 2005). Proto by bylo vhodné nakombinovat pozorování v rádiové a krátkovlnné oblasti spektra, a tak alespoň částečně omezit jednotlivé nevýhody těchto dvou možností snímání sluneční koróny.

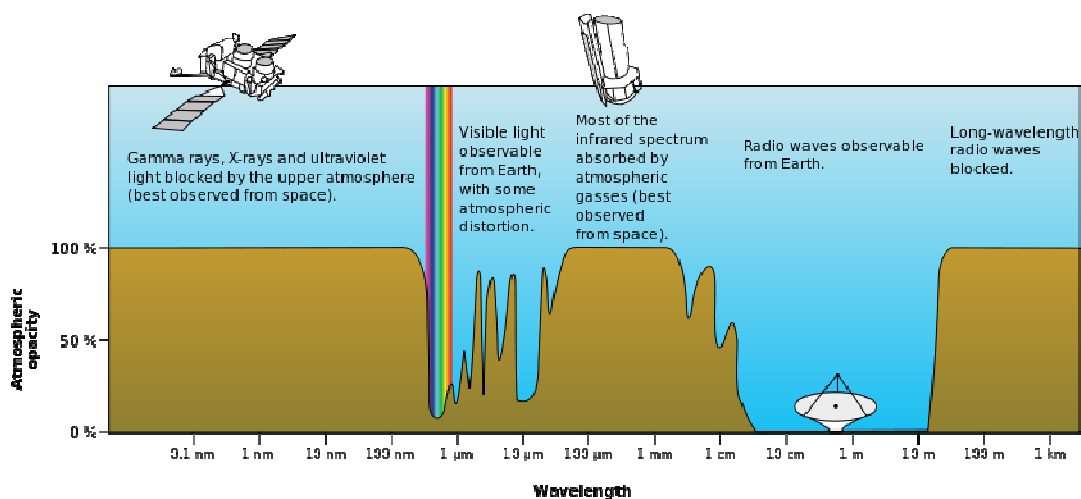
Cílem této práce je provést statistické vyhodnocení dat ze slunečního rádiového spektrografu RT5 na Astronomickém ústavu AV ČR v Ondřejově a najít pro struktury typu zebra, vyskytující se na jeho spektrogramech, odpovídající fyzikální jevy i v jiných vlnových délkách pomocí dat z přístroje *Atmospheric Imaging Assembly* na palubě sondy *Solar Dynamics Observatory*. Pokud budou na snímcích v EUV oblasti nalezeny jevy, které budou časově odpovídat strukturám typu zebra, pak budou měřeny jejich další vlastnosti, např. rychlost šíření, perioda nebo poloha na slunečním disku. Bude-li se jednat o erupci,

bude zjištěna její třída a dále bude určeno, v jaké fázi erupce se na rádiovém spektru struktura typu zebra objevila. Pomocí těchto údajů bude poté možné lépe interpretovat tyto struktury a dospět k závěru, zda můžeme přiřadit napozorované jevy k modelům, které byly vytvořeny.

2 Literární přehled

2.1 Sluneční koróna

Sluneční koróna je nejvyšší vrstvou sluneční atmosféry. Její nejnižší vrstva začíná přibližně 2,5 Mm nad viditelným povrchem Slunce (fotosférou) a horní část sahá až k meziplanetárnímu prostoru bez přesného ohraničení. Za normálních podmínek při pohledu na Slunce ve viditelné části spektra je možné vidět pouze fotosféru, neboť světlo rozptylované ve sluneční atmosféře je o několik řádů magnitudy méně intenzivní (Antia et al. 2003). Proto úplně první pozorování koróny proběhlo při zatmění Slunce, kdy měsíční kotouč překrýval fotosféru. Historie pozorování sluneční koróny sahá až do starověku, kdy byla Indy, Babyloňany a Číňany tato zatmění zaznamenána. Pravidelné pozorování slunečních zatmění se datuje od roku 1842. Už v roce 1868 byl ve sluneční koróně objeven nový prvek, nazvaný objevitelem Julesem Jensenem helium (Aschwanden 2005). Dalším milníkem ve studiu koróny je rok 1930, kdy Bernard Lyot instaloval na observatoři Pic-du-Midi (Francie) první koronograf. Jedná se o teleskop s clonkou, která zakrývá sluneční fotosféru (Antia et al. 2003). Od tohoto momentu bylo tedy možné sluneční korónu pozorovat i mimo zatmění Slunce. O dvanáct let později Edlén v koronálním spektru objevil tzv. zakázané čáry vysoce ionizovaných atomů železa a vápníku. To znamenalo, že sluneční koróna má teplotu několik milionů Kelvinů (Golub & Pasachoff 2010). Další rozvoj poznání nastal s kosmickým věkem, kdy bylo vysláno mnoho sond na zkoumání Slunce, např. SDO, SoHO, Hinode, atd. Ty umožnily pozorovat Slunce i ve vlnových délkách, které neprocházejí zemskou atmosférou (Obr. 1) (Aschwanden 2005).



Obr. 1: Propustnost zemské atmosféry v závislosti na vlnové délce (Wikipedia 2015).

Pozorování sluneční koróny je možné několika způsoby. Prvními dvěma z nich je již zmiňované pozorování při slunečním zatmění a pomocí koronografu. Dalšími možnostmi jsou pozorování v tvrdém ($\lambda \approx 0,1 - 1 \text{ \AA}$) a měkkém rentgenovém záření ($\lambda \approx 1 - 100 \text{ \AA}$), v EUV (extrémně ultrafialové) oblasti spektra ($\lambda \approx 100 - 1000 \text{ \AA}$) a rádiových vlnách ($\lambda \approx 1 \text{ mm} - 10 \text{ m}$) (Aschwanden 2005). Ve své práci se zabývám především pozorováním v rádiové a EUV oblasti spektra.

Výhodou pozorování v rádiové oblasti spektra je to, že rádiové vlny pronikají zemskou atmosférou, a tudíž detektory mohou být umístěny na Zemi (Burke & Graham-Smith 2010). To umožňuje i vyšší kadenci sběru dat. U rádiových měření se často neudává vlnová délka, která se měří, ale její frekvence, a to pomocí jednoduchého vztahu

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (2.1)$$

kde c je rychlost světla v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ a λ je příslušná vlnová délka v m. Frekvence rádiových měření je tedy $f \approx 300 \text{ GHz} - 30 \text{ MHz}$. V oblasti rádiových vln pracuje ondřejovský sluneční rádiový spektrograf RT5, který je popsán v dalším textu (Jiříčka et al. 1993).

EUV záření neproniká zemskou atmosférou. Přístroje detekující toto záření je tedy nutné vynést do kosmu. V tomto případě jsme omezeni množstvím dat, které je možné posílat ze sondy na Zem (Aschwanden 2005). Ve své práci se zaměřím na data, která poskytuje přístroj AIA (*Atmospheric Imaging Assembly*) na palubě sondy SDO (*Solar Dynamics Observatory*) (Lemen et al. 2011), a to hlavně na vlnovou délku 171 \AA .

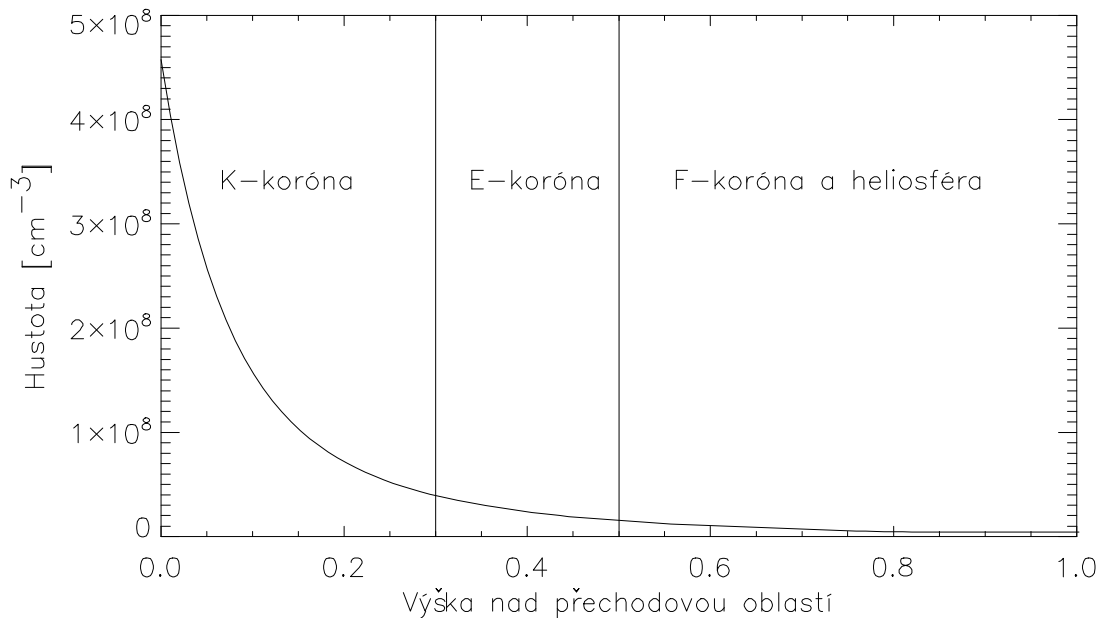
Sluneční korónu je možné rozdělit do tří částí, podle toho jakým způsobem v nich vzniká emise (Antia et al. 2003). Ve výšce do 0,3 slunečních poloměrů dominuje částečně polarizovaná spojitá emise, způsobená rozptylem fotosférického světla na volných elektronech (Thomsonův rozptyl). Tato část koróny se nazývá K-koróna (kde K znamená kontinuum). Ve výškách od 0,3 do 0,5 slunečních poloměrů převažuje spektrální emise vysoce ionizovaných prvků a tuto část nazýváme E-koróna. Nad 0,5 slunečními poloměry se nachází F-koróna, která se vyznačuje absorpčními čarami fotosférického Fraunhoferova spektra, způsobenými rozptylem světla na meziplanetárních prachových částicích (Aschwanden 2005, Golub & Pasachoff 2010).

Objemová hustota částic sluneční koróny je mnohem nižší než nejlepší vakuum, které můžeme vytvořit v laboratoři. Ve vyšších vrstvách (výška jednoho slunečního poloměru)

nabývá hodnoty přibližně 10^6 cm^{-3} a v nejnižších vrstvách v klidných oblastech je její přibližná hodnota 10^9 cm^{-3} . V erupčních smyčkách může hustota vystoupat až na 10^{11} cm^{-3} . První měření objemové hustoty sluneční koróny bylo založeno na faktu, že intenzita světla způsobená Thomsonovým rozptylem je přímo úměrná objemové hustotě částic, které tento rozptyl způsobují (Aschwanden 2005, Mullan 2010). Výsledky vycházející z těchto studií lze vyjádřit Baumbach–Allenovým vzorcem pro průměrný hustotní profil

$$n_e(R) = 10^8 \left[2,99 \left(\frac{R}{R_\odot} \right)^{-16} + 1,55 \left(\frac{R}{R_\odot} \right)^{-6} + 0,036 \left(\frac{R}{R_\odot} \right)^{-1,5} \right] \text{ cm}^{-3}, \quad (2.2)$$

kde $R = R_\odot + h$. Tento vzorec je graficky vyjádřen na Obr. 2.

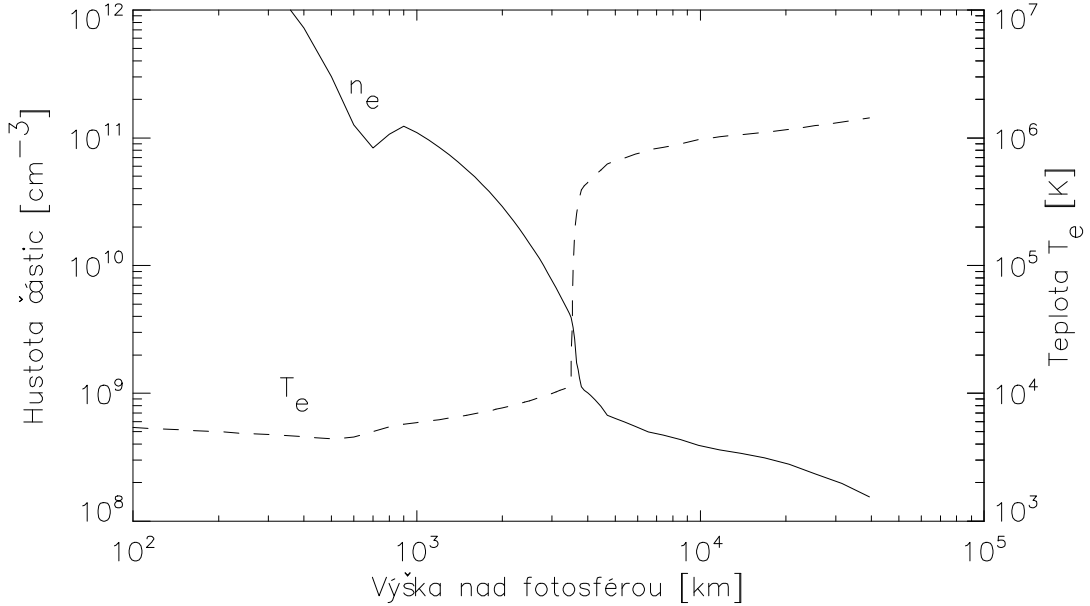


Obr. 2: Objemová hustota částic ve sluneční koróně určená Baumbach-Allenovým vzorcem.

Sluneční koróna je samozřejmě velmi nehomogenní prostředí, a proto se hodnota objemové hustoty částic mění nejen se svislou, ale i s vodorovnou polohou. Dále je třeba vzít na vědomí změny dějící se během slunečního cyklu (např. rozdíl mezi slunečním minimem a maximem) (Mullan 2010).

Ohřev sluneční koróny je dodnes jedním ze základních problémů sluneční fyziky. Jak již bylo zmíněno výše, v roce 1940 Bengt Edlén analyzoval spektra sluneční koróny a zjistil, že koronální emise vzniká díky vysoce ionizovaným prvkům. Výsledkem bylo, že u naměřených dat byla teplota sluneční koróny $T \geq 1 \text{ MK}$ (Golub & Pasachoff 2010, Mullan 2010). To ovšem znamená, že teplota koróny je mnohem vyšší, než teplota fotosféry, která

má teplotu přibližně 5700 K (ve slunečních skvrnách klesá až k 4700 K). Teplotní a hustotní profil je zobrazen na Obr. 3.



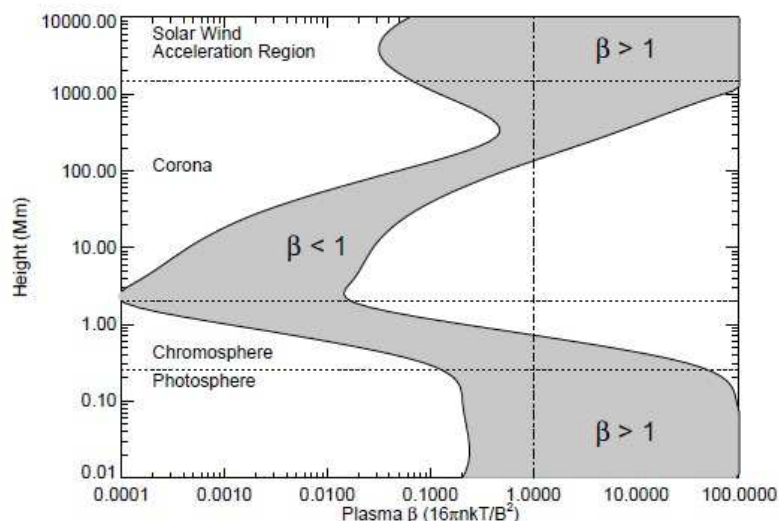
Obr. 3: Graf průběhu teploty (čárkovaná čára) a hustoty (plná čára) sluneční atmosféry v závislosti na výšce nad fotosférou (Selhorst et al. 2005).

Znovu je třeba podotknout, že koróna je teplotně, stejně tak jako hustotně, velmi nehomogenní prostředí, a proto se teploty na různých místech ve stejné výšce mohou velmi lišit od modelu (např. VAL-C model, Vernazza et al. 1981). Pro klidné regiony byla naměřena teplota $T = 1 - 2$ MK, zatímco v aktivních regionech se teplota zvýší až na $T = 2,0 - 6,3$ MK. Naproti tomu oblasti s otevřenými magnetickými indukčními čarami mají $T \leq 1$ MK, v důsledku účinného přenosu plazmatu podél magnetických siločar (Aschwanden 2005).

Jednou z důležitých veličin ve fyzice sluneční koróny je tzv. plazma- β parametr. Ten je definován jako poměr kinetického tlaku plazmatu p_{th} a magnetického tlaku p_m ,

$$\beta = \frac{p_{th}}{p_m} = \frac{2\varepsilon n_e k_B T_e}{B^2 / 8\pi} \approx 0,07 \varepsilon n_9 T_6 / B_1^2, \quad (2.3)$$

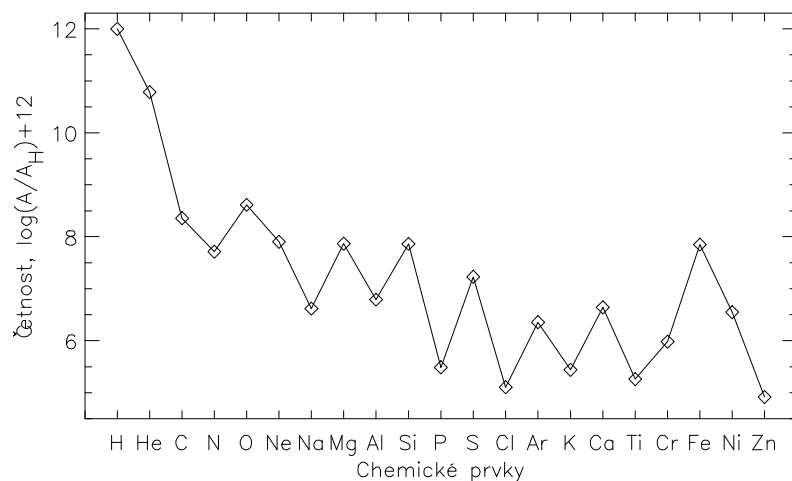
kde $\varepsilon = 1$ je ionizační stupeň koróny, $n_9 = n_e / 10^9 \text{ cm}^{-3}$ je elektronová hustota, $T_6 = T / 10^6 \text{ K}$ je elektronová teplota a $B_1 = B / 10 \text{ G}$ je magnetická indukce. Jak je vidět na Obr. 4, většina koróny má plazma- β parametr menší než jedna. I v koróně však existují místa s $\beta > 1$, např. v tzv. magnetických kaspích nad strukturami nazývanými se *streamers*, což jsou horké oblasti se slabým magnetickým polem (Aschwanden 2005).



Obr. 4: Graf závislosti plazma- β parametru na výšce pro dvě hodnoty indukce magnetického pole 100 G (křivka vlevo) a 2500 G (křivka vpravo) (Aschwanden 2005).

Vzhledem k tomu, že pro většinu sluneční koróny je hodnota plazma- β parametru menší než 1, hraje magnetické pole ve fyzice sluneční koróny významnou roli (řídí veškerou dynamiku a topologii). Existují dvě základní magnetické zóny, a to oblasti s otevřeným magnetickým polem a oblasti s uzavřeným magnetickým polem. Oblasti s otevřeným magnetickým polem se vždy nacházejí na pólech a někdy se rozšiřují i směrem k rovníku. Spojují sluneční povrch s okolním vesmírem a způsobují tzv. rychlý sluneční vítr ($v \approx 800 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$). Jejich důsledkem je účinný přenos plazmatu do heliosféry. Naproti tomu oblasti s uzavřeným magnetickým polem obsahují uzavřené magnetické indukční čáry v koróně až do výšky okolo jednoho slunečního poloměru. Jsou zdrojem tzv. pomalého slunečního větru ($v \approx 400 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) a jsou trasou pro zahřáté chromosférické plazma, které zůstává zachyceno v koronálních smyčkách. Hodnota magnetického pole sluneční koróny je získávána především měřením Zeemanova jevu v nižších částech koróny a následnou extrapolací (Aschwanden 2005).

Chemické složení sluneční koróny je zjišťováno pomocí spektrografie. Bohužel na rozdíl od fotosféry, kde bylo chemické složení měřeno s velkou přesností, má koróna mnohem menší jasnost. Proto je měření jejího chemického složení náročnější a také méně přesné. Fotosféra a koróna mají velmi podobné chemické složení. U několika prvků se ale liší. Např. spektrální čára helia (a také neonu, argonu a vzácných plynů) se ve fotosféře nevyskytuje kvůli nízké teplotě. Proto u těchto prvků ve fotosféře nemůže být měřeno jejich zastoupení (Aschwanden 2005, Grevesse & Sauval 2005, Schmelz et al. 2012). V koróně se ale tyto spektrální čáry vyskytují. Chemické složení koróny je znázorněno na Obr. 5.



Obr. 5: Zastoupení jednotlivých prvků ve sluneční koróně.

2.2 Sluneční rádiový spektrograf RT5

V roce 1992 byl na Astronomickém ústavu AV ČR, v. v. i. v Ondřejově uveden do provozu digitální sluneční rádiový spektrograf RT5 (Obr. 6) pro frekvenční pásmo 0,8 – 2 GHz, které je rozděleno do 256 kanálů. Frekvenční rozlišení je tudíž přibližně 4 MHz. Tento rádiový spektrograf měl původně časové rozlišení 100 ms (Jiříčka et al. 1993). Po modernizaci v roce 2005 a zkušební testování v roce 2006 bylo časové rozlišení zvýšeno na 10 ms (Jiříčka & Karlický 2008). Průměr antény ondřejovského rádiového spektrografu RT5 je 10 m. Prostorové rozlišení spektrografu je možné určit pomocí vzorce

$$\Delta\theta = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d} , \quad (2.4)$$

kde d je průměr antény a λ je vlnová délka. Pro ondřejovský spektrograf vychází prostorové rozlišení 0,046 – 0,018 rad (158' – 61'). Při úhlovém průměru Slunce přibližně 0,01 rad (33') to znamená, že získáváme pouze rádiový tok ze Slunce (dynamické spektrum) bez možnosti alespoň přibližně určit oblast, kde na Slunci došlo k jevu, který způsobil rádiové vzplanutí. Tento nedostatek rádiového spektrografu RT5 se v této práci pokusím eliminovat porovnáním s daty z přístroje AIA/SDO, o kterém píše v dalším textu.

Pozorování slunečním rádiovým spektrografem RT5 probíhají každý den, když se Slunce nachází více než pět stupňů nad obzorem (Hanslmeier & Messerotti 1999). Do ondřejovského archivu jsou umístěna pouze rádiová spektra, na kterých se nachází nějaké rádiové vzplanutí (Jiříčka et al. 1993).



Obr. 6: Sluneční rádiový spektrograf RT5 v Ondřejově.

2.3 Klasifikace pozorovaných struktur

Struktury pozorované na spektrogramech byly Jiříčkou et al. (2001) rozděleny do několika skupin.

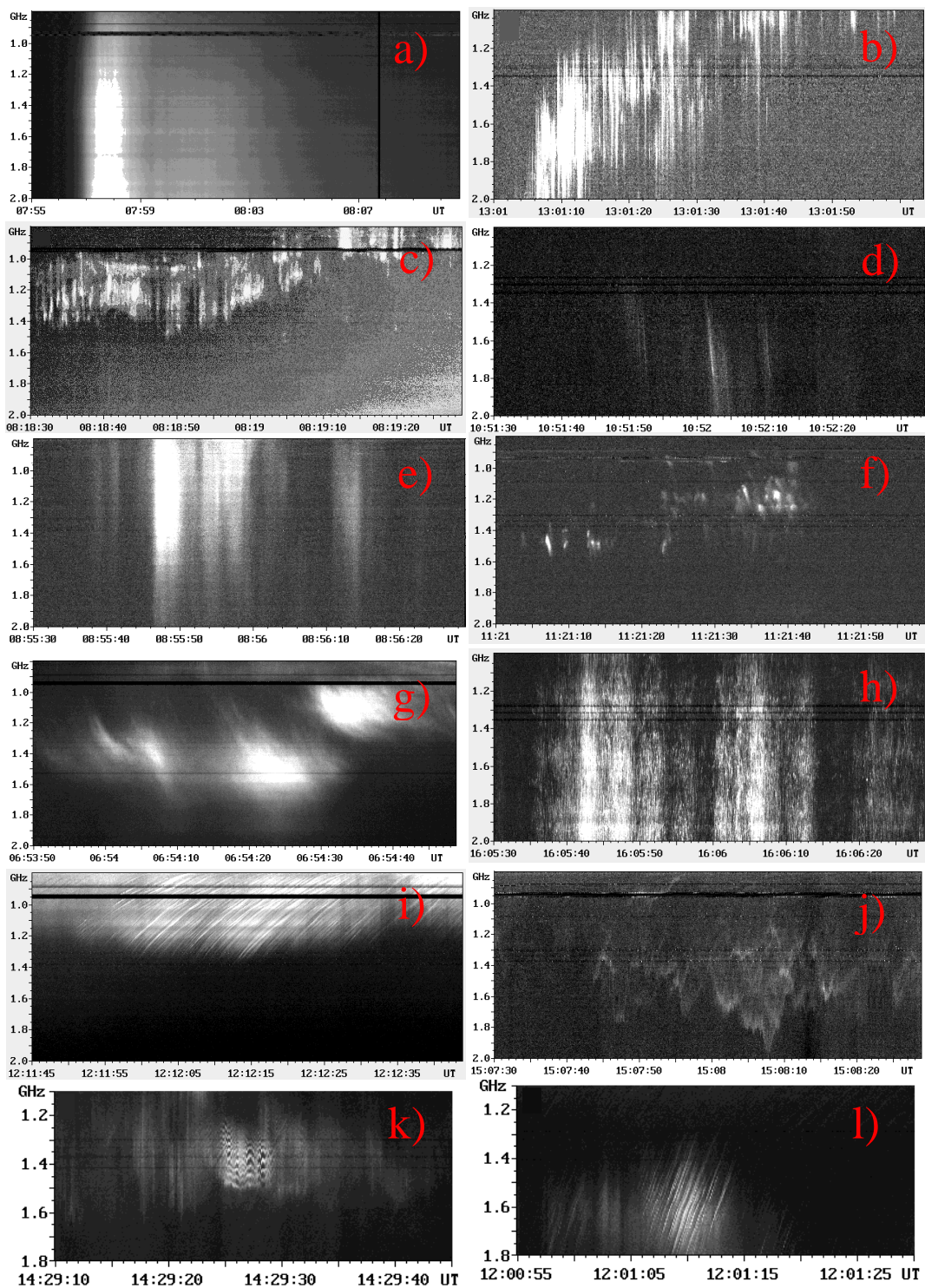
Jako **continua** (Obr. 7a) jsou označovány širokopásmové, nevýrazné rádiové emise, které trvají nejméně po dobu 10 vteřin.

Struktura **pulsation** (Obr. 7b, c) je definována jako série pulsů s frekvenčním rozsahem větším nebo rovným 200 MHz, který jako celek trvá déle než 10 vteřin. Většinou bývá kvaziperiodická, výjimečně periodická, s charakteristickou periodou v řádu 0,1 – 2 vteřin. Frekvenční drift je neměřitelný vzhledem k tomu, že je buďto velmi velký, nebo nekonečný. Kromě běžně pozorovaných *pulsation* existují ještě *pulsation* s pomalým frekvenčním posunem, nazývané **drifting pulsation structures** (DPS).

Fast drift bursts (Obr. 7d) je struktura, která trvá krátce a má velký měřitelný posun, který je větší nebo roven $\pm 100 \text{ MHz} \cdot \text{s}^{-1}$. Většinou se vyskytují ve skupině, kde je počet jednotlivých pulsů, jejichž parametry se liší, menší než deset. Kvůli časovému rozlišení radiospektrogramů je nejvyšší posun, který lze měřit, $\pm 1000 \text{ MHz} \cdot \text{s}^{-1}$.

Isolated broadband pulses (Obr. 7e) jsou charakterizovány jako malá skupina přerušovaných pulsů, které trvají nejvíce 10 vteřin včetně a mají frekvenční rozsah větší než 200 MHz. Frekvenční posun je u těchto struktur taktéž neměřitelný z důvodu jeho velikosti

(nekonečný nebo velmi velký). Parametry jednotlivých izolovaných širokopásmových pulsů se uvnitř skupiny liší.



Obr. 7: Příklady struktur pozorovaných slunečním rádiovým spektrografem RT5 (Jiříčka et al. 2001).

Skupina 5 – 20 krátkých (~ 1 s), úzkopásmových (šířka frekvenčního pásma je menší než 200 MHz) pulsů, které mají výrazný posun s hodnotami vyššími než $\pm 100 \text{ MHz}\cdot\text{s}^{-1}$, se nazývá **narrowband types III bursts** (Obr. 7f). Parametry jednotlivých pulsů v této skupině se mohou výrazně lišit.

Slowly drifting bursts (Obr. 7g) jsou popsány jako struktury s posunem menším než $100 \text{ MHz}\cdot\text{s}^{-1}$, které se vyskytují převážně ve skupinách do deseti jednotlivých pulsů.

Narrowband spikes (Obr. 7h) jsou určeny jako skupina velmi krátkých úzkopásmových pulsů s šíří frekvenčního pásma menší nebo rovnou 50 MHz. Doba trvání jednotlivých vzplanutí je menší nebo rovna 0,1 vteřiny.

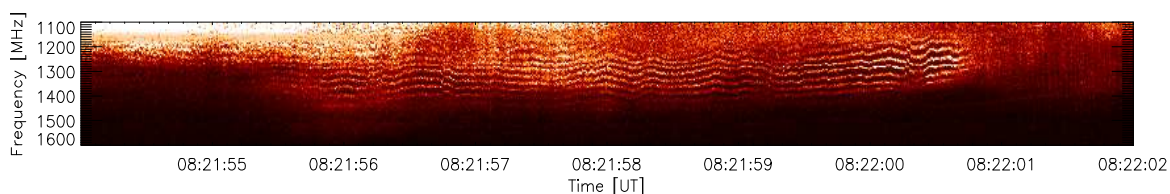
Pro vzplanutí s téměř pravidelným opakováním a s posunem okolo $100 \text{ MHz}\cdot\text{s}^{-1}$ se zavádí název **fibers** (Obr. 7i).

Laces (Obr. 7j) je struktura typická prudkými změnami frekvencí. Tento jev je poměrně nový a objevuje se jen zřídka. Mezi lety 1992 – 2000 byla ondřejovským slunečním rádiovým spektrografem RT5 zaznamenána pouze devětkrát (Jiříčka et al. 2001).

Posledním typem struktur vyskytujících se na dynamických spektrech rádiového spektrografu RT5 jsou rádiová vzplanutí označující se jako zebra.

2.4 Struktury typu zebra

Zebry jsou rádiová vzplanutí charakteristická několika emisními čarami, které zachovávají přibližně pravidelné vzdálenosti od sousedních čar. Příklad typické zebry ze dne 10. srpna 2010 je na Obr. 8. Tyto struktury lze rozdělit do dvou skupin. Prvním typem jsou klasické zebry s menším počtem čar, většími frekvenčními rozestupy čar a vlnitým vzhledem (Obr. 7k). Druhý typ jsou zebry překrývající struktury fibers (Obr. 7l). Ty mají vyšší počet čar a malé frekvenční rozestupy (Jiříčka et al. 2001).



Obr. 8: Struktura typu zebra ze dne 10. srpna 2010.

Původ tohoto typu rádiového vzplanutí stále ještě není zcela jasný. Pro fyzikální porozumění a interpretaci vzplanutí typu zebra je nutné vytváření modelů, které vypracovali např. Zheleznyakov & Zlotnik (1975), LaBelle et al. (2003) nebo Kuznetsov (2005). Karlický (2013) vytvořil nejnovější z modelů. Historický přehled pozorování a modelů je např. v Zlotnik (2009). Další důležitou částí při snaze o pochopení zeber je vytváření statistických souhrnů, ve kterých je možné pozorovat např. délku trvání jednotlivých zeber, frekvenční rozsah, počet čar, souvislost s erupcemi (podle stupnice GOES), nebo rozestupy jednotlivých čar (Huang & Tan 2012 nebo Tan et al. 2013). Z fyzikálního hlediska je zajímavé poté vybrat zebry, které měly dlouhou dobu trvání (nebo byly zajímavé z jiného hlediska) a ty poté podrobně zkoumat (Tan et al. 2013).

2.5 Solar Dynamics Observatory (SDO)

Sonda *Solar Dynamics Observatory* (SDO), která je součástí programu *Living with the Star* (LWS), byla vypuštěna 11. února 2010 v 15:23 UT z Kennedyho vesmírného centra (USA). První vědecká data z SDO byla přijata 1. května téhož roku. Hlavním cílem projektu je lépe porozumět procesům probíhajícím na Slunci, vylepšit předpověď slunečního počasí a zjistit, jakou roli při globálních změnách klimatu hraje sluneční aktivita (Pesnell et al. 2011).

Na palubě SDO se nacházejí tři přístroje. *Atmospheric Imaging Assembly* (AIA), který poskytuje snímky celého slunečního disku v deseti vlnových délkách s dosud nejvyšším dosaženým prostorovým rozlišením a s velmi vysokou kadencí pořizování dat. *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI) měří Dopplerův posun spektrální čáry Fe I (617,3 nm) k určení rychlostí na celém slunečním disku (vytváření tzv. Dopplergramů) s kadencí jednoho snímku za 45 vteřin. Dále mapuje magnetické pole pomocí Zeemanova jevu se stejnou kadencí, s jakou tvoří Dopplergramy. Poslední přístroj, který je na palubě sondy SDO, je *Extreme Ultraviolet Variability Experiment* (EVE), měřící v rozpětí vlnových délek 0,1 až 105 nm (Pesnell et al. 2011). O prvním ze tří přístrojů se zmiňuji podrobněji v následujícím textu. O dalších dvou se nezmiňuji z důvodu menšího využití jimi poskytovaných dat v této práci. Podrobnější informace o nich lze nalézt v Šebelík (2013).

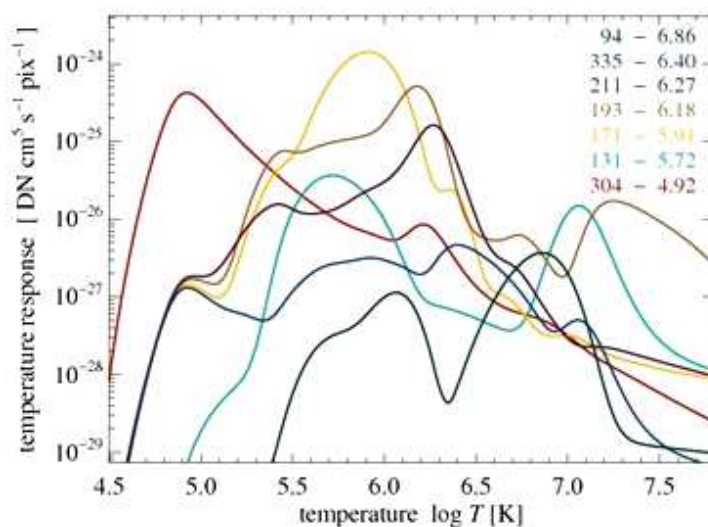
2.6 Atmospheric Imaging Assembly (AIA)

Atmospheric Imaging Assembly (AIA) snímá čtyřmi teleskopy celý sluneční disk v deseti vlnových délkách (Tab. 1) s časovým rozlišením snímků v jednotlivých vlnových délkách

přibližně 12 vteřin a s prostorovým rozlišením cca 1,5 úhlové vteřiny (každá vlnová délka má jiné rozlišení, viz Tab. 1), což znamená asi 2000 km na slunečním povrchu. Každý den jsou z tohoto přístroje poslána data o velikosti přibližně 2 TB (data nejsou komprimovaná) (Boerner et al. 2011).

Tab. 1: Některé charakteristiky jednotlivých vlnových délek snímaných AIA/SDO (Boerner et al. 2011, Lemen et al. 2011).

Vlnová délka [\AA]	Spektrální čára	Pozorovaná oblast	Rozlišení (úhlová vteřina)
94	Fe XVIII	oblasti erupcí	1,74
131	Fe VIII, XX, XXIII	oblasti erupcí	1,67
171	Fe IX	koróna, vrchní přechodová oblast	1,73
193	Fe XII, XXIV	koróna a vysokoteplotní plazma	1,38
211	Fe XIV	aktivní oblasti koróny	1,55
304	He II	chromosféra, přechodová oblast	1,52
335	Fe XVI	aktivní oblasti koróny	1,73
1600	C IV+kont.	přechodová oblast, vrchní fotosféra	1,65
1700	kontinuum	oblasti nízké teploty, fotosféra	1,65
4500	kontinuum	fotosféra	2,43



Obr. 9: Funkce teplotní odezvy pro přístroj AIA/SDO v závislosti na teplotě (Boerner et al. 2011).

Další důležitou charakteristikou sluneční koróny, kterou nám AIA poskytuje, je teplota. Funkce teplotní odezvy vytvořená pro šest EUV vlnových délek je zobrazena na Obr. 9.

2.7 Struktury pozorované přístrojem AIA

Sluneční korónu je možné při velkoplošném pohledu rozdělit do tří hlavních oblastí, a to na aktivní oblasti, klidné Slunce a koronální díry (Aschwanden 2005).

Aktivní oblasti (*active regions*) jsou místa s největší sluneční aktivitou. Svoji rozlohou ale tvoří zanedbatelnou část sluneční koróny. Nacházejí se v oblastech se silnými magnetickými poli, které jsou ve viditelné oblasti nejlépe poznatelné podle slunečních skvrn, které se zde nacházejí (Aschwanden 2005).

Klidné Slunce (*quiet sun*) jsou oblasti mimo aktivní region. Toto označení je spíše historického charakteru, neboť vzhledem k pokroku v rozlišovacích schopnostech přístrojů bylo zjištěno, že mnoho fyzikálních jevů se odehrává i zde. Klidné Slunce je z dnešního pohledu nejlepší definovat jako oblasti zahrnující uzavřené magnetické pole, kromě aktivních oblastí (Aschwanden 2005, Mullan 2010).

Koronální díry (*coronal holes*) se nacházejí na jižním a severním pólu Slunce a v jejich okolí. Prvně byly pozorovány jako tmavší části sluneční koróny při zatměních. Na rozdíl od klidného Slunce jsou to oblasti s otevřenými magnetickými poli. Ta zajišťují účinný přenos plazmatu a tvorbu rychlého slunečního větru. Kvůli efektivnímu transportu se v těchto místech plazma skoro nevyskytuje, a proto se koronální díry jeví tmavší než zbytek koróny (Aschwanden 2005, Mullan 2010).

Při detailnějším pohledu je ve sluneční koróně možné pozorovat i jevy ovlivňující menší část povrchu Slunce. Erupce (*flares*) jsou události, kdy za velmi krátkou dobu dojde k uvolnění obrovské energie (až $6 \cdot 10^{26}$ J). Dnes nejvíce přijímanou teorií příčiny erupcí jsou nestability magnetického pole. Přepojením, tzv. rekonekcí magnetických siločar dochází ke změně magnetické topologie, a tím se stává pole více stabilním. Tato změna poskytuje velké množství volné magnetické energie, která způsobuje urychlení částic a zahřívání plazmatu. Urychlené částice se pohybují směrem k chromosféře, kde zahřívají chromosférické plazma. Toto zahřáté plazma se pohybuje do vyšších vrstev sluneční atmosféry (proces zvaný chromosférická evaporace) a vyplňuje magnetické siločary v koróně. Tím dochází ke vzniku poerupčních smyček, které je možné vidět v jemném rentgenovém záření. Po vychladnutí plazmatu v erupčních smyčkách na 1 – 3 MK je možné je vidět i v EUV části spektra (Aschwanden 2005, Golub & Pasachoff 2010).

Výrony koronální hmoty (*coronal mass ejections – CME*) se objevují u všech hvězd. Tento proces vede ke snižování hmotnosti hvězdy dynamickým procesem urychlující částice na rychlost umožňující jim uniknout gravitačnímu poli Slunce. CME se objevují pravidelně několikrát za den s průměrnou hmotností $m_{\text{CME}} \approx 10^{11} - 10^{13}$ kg a typickými rychlostmi pohybujícími se mezi $10^2 - 2 \cdot 10^3$ km·s⁻¹. CME se stávají ze tří částí: světlé přední

hrany, tmavého jádra a světlého jádra. Dnes je přijímáno pět hlavních spouštěcích mechanismů, mezi které patří i vznik CME za pomoci erupce (Aschwanden 2005, Golub & Pasachoff 2010).

Snímky celého slunečního disku v EUV oblasti (1 – 2 MK) umožnily odhalit další fenomén, kterým jsou koronální vlny. U těchto vln se dříve předpokládala spojitost s Moretonovými vlnami vznikajícími v chromosféře a popisovanými jako sluneční tsunami. Jsou to rázové vlny, které se vytvářejí při silných erupcích a pohybují se rychlostmi okolo $1000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Podrobnějším studiem ale bylo zjištěno, že koronální vlny mají své specifické parametry a jejich výskyt není nutně spjatý s vlnami Moretonovými. Další vlastností koronálních vln je, že jsou vždy spjaty s výrony koronální hmoty (ale ne každý výron koronální hmoty je spjatý s koronální vlnou). Velikost sluneční erupce nemá žádnou přímou spojitost s tvorbou koronálních vln. Při šíření koronální vlny se její přední světlý okraj rozměšňuje a stává se méně výrazným, přičemž koronální vlny se nikdy nešíří v aktivních regionech a koronálních dírách. Příčiny vzniku těchto vln ještě nebyly plně objasněny, pouze bylo vytvořeno několik teorií a modelů, které musejí být dále zkoumány. Hlavními metodami pro zjišťování těchto vln jsou metody zvané *running difference* a *space time diagram*, popsané dále v textu (Golub & Pasachoff 2010).

Dalšími strukturami, které je možné pozorovat ve sluneční koróně, jsou např. filamenty, protuberance, sigmoidy, mikroerupce, nanoerupce, smyčkové arkády, nebo nedávno objevená sluneční tornáda (Aschwanden 2005). Tyto struktury nejsou ale pro zkoumaná vzplanutí v rádiové oblasti a popisy dat z AIA tak důležité, proto jsem je jen zmínil.

3 Metodika – Analýza dat z RT5 a porovnání s daty z jiných přístrojů

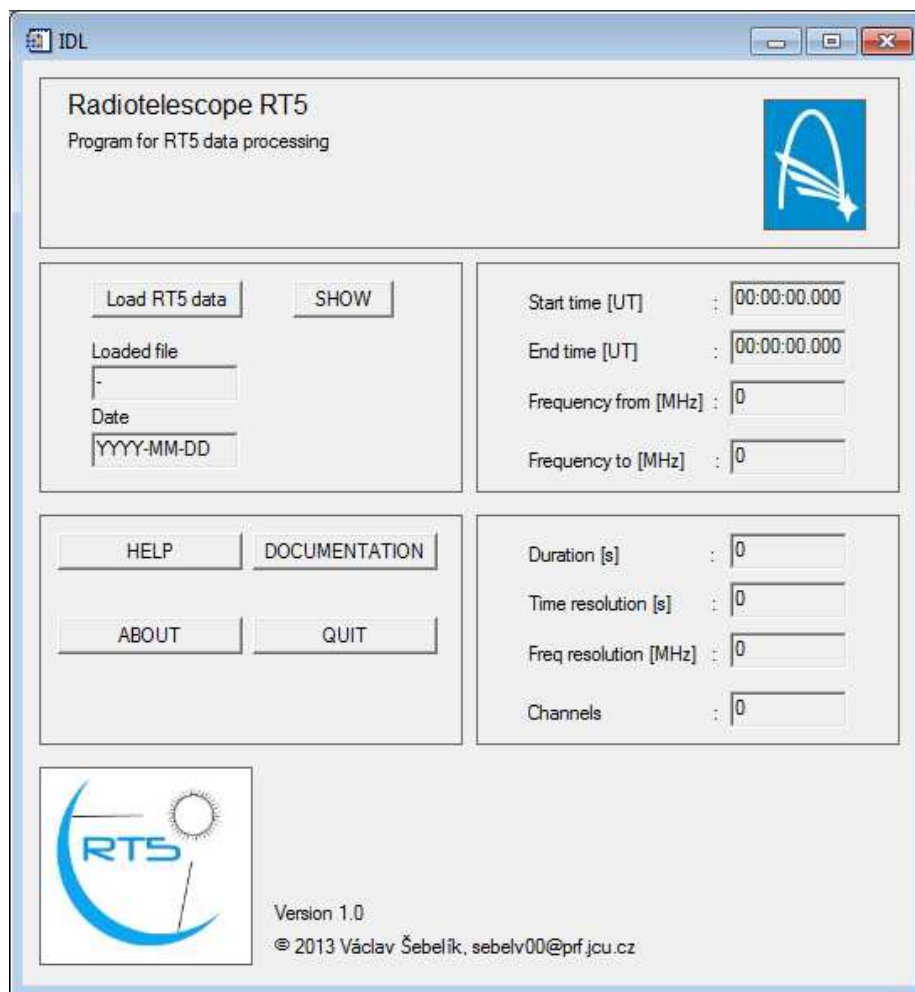
3.1 Data ze slunečního rádiového spektrografu RT5 a jejich zpracování

Vstupním souborem dat byla dynamická spektra z rádiového spektrografu RT5 získaná mezi lety 2007 a 2013. Ta byla poskytnuta Slunečním oddělením Astronomického ústavu AV ČR, v. v. i. Jednalo se o surová data ve formátu `.rt5`. Pro jednodušší zpracování těchto dat byl v prostředí IDL (*Interactive Data Language* – pozn.: prostředí, ve kterém byly vyvinuty všechny programy pro zpracování dat v této práci) vytvořen program `rt5_to_fits.pro`, který převádí data z formátu `.rt5` do formátu `.fits`. Velikost osy x každého souboru je 256 pixelů (kvůli 256 frekvenčním kanálům spektrografu, viz. kap. 2.2) a velikost osy y závisí na délce konkrétní události. Dále je v hlavičce každého souboru uvedena informace o frekvenčním a časovém rozlišení, označení os x a y a jejich jednotky, datum a čas pořízení a rozsah frekvencí rádiového spektrografu RT5.

Pro data převedená do formátu `.fits` byl napsán program `RT5_setup.pro` (Obr. 10 a Příloha 2, Obr. 38 – Obr. 42) pro jejich následné zpracování. Tento program byl vytvořen v rámci grantu SGA¹ a po otestování bude spolu s převedenými daty umístěn na stránkách Slunečního oddělení AsÚ AV ČR, v. v. i. Po načtení události program zobrazí datum, kdy byla pozorována, čas jejího začátku a konce, její frekvenční rozsah, délku trvání, časové rozlišení a frekvenční rozlišení. Poté si uživatel kurzorem, nebo zadáním souřadnic určí její úsek, který chce studovat podrobně. U tohoto úseku poté mohou být zjišťovány různé parametry, např. zobrazovat časové, frekvenční a šikmé profily vybraných událostí, jak zadáním přesného času, respektive frekvence, tak i pomocí kurzoru. Také je možné pomocí něj měřit trvání, amplitudu a posun určitého jevu. Další možností je zobrazení frekvenčního a časového profilu při přejíždění snímku kurzorem, kdy aktuální profil (časový nebo frekvenční, dle výběru) odpovídá profilu na x -ové, respektive y -ové souřadnici kurzoru. Jednou z dalších možností je zvětšení snímku v okolí místa, kde se nachází kurzor. V tomto programu nechybí ani možnost zvyšování, či snižování kontrastu, zobrazení kontur, zjištění pozice pomocí kurzoru, či vyhlazení snímku. Dále je možné pomocí kurzoru vybrat předem uživatelem určený počet pozic a ty následně zobrazit v grafu závislosti frekvence těchto bodů na čase. Posledními možnostmi, které program nabízí, je určení Fourierovy transformace časových, frekvenčních a šikmých profilů. Všechny grafy lze uložit do souborů

¹ SGA (Studentská grantová agentura) – grant poskytovaný každoročně Přírodovědeckou fakultou JU v Českých Budějovicích studentům bakalářského a magisterského stupně studia.

ve formátu `.txt`, `.fits` a `.ps`. Snímky dynamických spekter s čarou, která naznačuje, kde byl profil měřen, je možné uložit do souboru `.ps`.



Obr. 10: Úvodní panel programu `RT5_setup.pro`.

Pro další analýzy v této práci byl vybrán typ struktur zvaný zebra, protože se v současné době jedná o jedny z nejzajímavějších a nejzkoumanějších jemných struktur studovaných v radioastronomii. Dále také proto, že v nedávné době Karlický (2013) navrhl nový model jejich vzniku a tento model by mohl být dokázán právě díky zpracování dat ze sondy SDO. Tyto struktury byly pozorovány nejen na Slunci ale i na pulsarech (Karlický 2013). Přesněji se tato práce bude zabývat jen zebraми zachycenými od roku 2010. U zeber z dřívějšího období by nebylo možné provést srovnání s daty poskytovanými sondou SDO (data poskytována sondou SDO od 12. května 2010). Pro rozšíření počtu analyzovaných spekter byla získána data z čínského rádiového spektrometru SBRS/Huairou (*The Chinese Solar Broadband Radio Spectrometers at Huairou*), proto je v Tab. 2 uveden i název rádiového spektrometru, který zebra zaznamenal.

Čínský rádiový spektrograf SBRS/Huairou byl vybrán z důvodu, že snímá v přibližně stejných frekvencích jako RT5 (2,6 – 3,8 GHz), s podobným časovým (8 s) i frekvenčním (10 MHz) rozlišením. Průměr antény tohoto rádiového spektrografu je 7 m a pozorovací časy jsou v zimě přibližně od 0:00 do 8:00 UT a v létě od 23:00 do 9:00 UT. Na rozdíl od ondřejovského rádiového spektrografu RT5 je SBRS/Huairou schopný zaznamenat celkový tok rádiové emise dvou polarizací (pravotočivé a levotočivé) (Tan et al. 2013). To ovšem pro potřeby této práce není nijak důležité. V článku od Tan et al. (2013) je uvedena souhrnná statistika týkající se zeber, které byly pozorovány tímto zařízením mezi lety 2000 a 2013, a proto mohla být vyžádána konkrétní data. Bohužel byly zaslány jen výřezy jednotlivých událostí a nebylo tedy možné určit, jak vypadal rádiový tok před a po zebře.

K šesti zebrám, které vyhovovaly podmínce, že se odehrály po roce 2010, a které jsou zmíněny v článku od Tan et al. (2013), se podařilo objevit ještě jednu ze dne 24. září 2011. V Tab. 2 jsou zaznamenány x -ové a y -ové souřadnice oblasti, kde se příslušná erupce odpovídající zebře odehrála (zjištěno pomocí zjasnění ve vlnové délce 171 Å). Soustava souřadnic je volena tak, že pozice [0:0] odpovídá středu slunečního disku a poloměr Slunce je volen jako 1000 jednotek. Při grafickém znázornění (viz Příloha 1, Obr. 37) je patrné, že místo erupce nemá vliv na vznik zebry. Sluneční erupce vyvolávající zebry se totiž vyskytovaly na okraji i u středu slunečního disku.

Tab. 2: Označení rádiového spektrografu, který zaznamenal zebrou a pozice erupcí na slunečním disku jednotlivých zeber.

Datum	Rádiový spektrograf	Pozice x	Pozice y
2010-08-01	RT5	-526	288
2011-02-15	CSBRS	162	-211
2011-02-24	CSBRS	-964	277
2011-08-09	CSBRS	835	274
2011-09-24	RT5	-816	177
2012-06-13	RT5	-386	-278
2013-04-11	CSBRS/RT5	-247	268

U každé erupce byl zjištěn její začátek, vrchol a konec podle dat z družice GOES (NOAA 2015). Tyto hodnoty byly dále použity pro zjištění, v jaké fázi erupce se odehrál počátek zebry. K tomuto účelu byl použit modifikovaný vzorec od Tan et al. (2013)

$$P_{\text{ph}} = (t_{\text{zp}} - t_{\text{fp}})/(t_{\text{fp}} - t_{\text{st}}), \quad (3.1)$$

kde t_{zp} je čas začátku struktury zebra, t_{fp} je čas vrcholu erupce podle jemného rentgenového záření (údaj ze sondy GOES) a t_{st} je počátek erupce podle jemného rentgenového záření (údaj ze sondy GOES). Na rozdíl od Tan et al. (2013), byl použit jako t_{zp} počátek zebry a ne její centrální čas a dále údaje o začátku a vrcholu erupce byly převzaty z webových stránek NOAA (2015). Rozdělení zeber podle hodnoty P_{ph} je uvedeno v Tab. 3.

Tab. 3: Rozdělení zeber podle fáze erupce, ve které se nacházely.

Hodnota P_{ph}	Fáze erupce
$P_{ph} \leq -0,25$	Před vrcholem
$-0,25 < P_{ph} \leq 0,25$	Při vrcholu
$P_{ph} > 0,25$	Po vrcholu

U každé struktury typu zebra ze slunečního radiospektrografu RT5 byly pomocí programu `RT5_setup.pro`, popsaného výše, určeny následující parametry: začátek zebry a její trvání, počet čar, průměrná frekvence každé z těchto čar a průměrná frekvenční vzdálenost mezi čarami. Stejně parametry byly měřeny i u dat ze slunečního spektrografu SBRS/Huairou pouze s tím rozdílem, že k měření nebyl použit program `RT5_setup.pro`, ale jen některé jeho části speciálně upravené pro tato data.

Počet událostí, zaznamenaných slunečním rádiovým spektrografem RT5 za měsíc byl porovnán se sluneční aktivitou, která je pro tyto účely určena pomocí čísla zahrnujícího počet slunečních skvrn a jejich skupin. Toto číslo se označuje jako relativní číslo slunečních skvrn, neboli jako Wolfovo číslo a určuje se zvlášť pro každý den. Vztah pro výpočet Wolfova čísla za ideálních podmínek je následující:

$$R = 10G + g, \quad (3.2)$$

kde G je počet skupin slunečních skvrn na viditelném disku Slunce a g je počet jednotlivých slunečních skvrn na viditelném slunečním disku.

3.2 Data z přístroje AIA/SDO a jejich zpracování

Data ze zařízení AIA na palubě sondy SDO byla získána přes internetové rozhraní <http://sdac.virtualsolar.org/cgi/search>. Každý stažený soubor, zastupující jeden snímek v jedné vlnové délce, má velikost 32 MB. Časové rozlišení snímků v jednotlivých vlnových délkách je v rozmezí 10 až 12 vteřin. Každý soubor ve formátu

.fits je složen z hlavičky, obsahující informace o souboru a samotného snímku o velikosti 4096×4096 pixelů.

Data pořizovaná přístroji na palubě sondy SDO nejsou ukládána na této sondě, ale jsou okamžitě odeslána na Zem. Data z SDO jsou přijímána dvěma pozemními stanicemi poblíž White Sands v Novém Mexiku. Snímky z přístrojů HMI a AIA jsou dále posílány na Stanfordskou univerzitu, kde jsou uloženy jako tzv. Level 0 (Lemen et al. 2011).

Pro potřeby této diplomové práce byly stahovány snímky s označením Level 1. Ty se liší od dat ve fázi Level 0 tím, že už byly podrobeny určitým procedurám, zvyšujícím jejich kvalitu. Tyto procedury lze rozdělit do několika kroků (Lemen et al. 2011).

I když jsou primární data (Level 0) uložena jako 16-bitová s velikostí 4096×4096 pixelů, skutečný snímek je zachycen pouze v jednom ze čtyř kvadrantů o velikosti 2048×2048 pixelů. Prvním krokem je tedy odstranění přebytečných pixelů ve zbývajících třech kvadrantech snímku. Na těch jsou zachyceny pouze náboje zbylé po odvedení volných nábojů z předchozí expozice. Tyto tři kvadranty tedy poskytují informace o účinnosti přenosu náboje (Lemen et al. 2011).

Druhým krokem je odstranění tzv. *dark image*, který v sobě zahrnuje šum vzniklý digitálním nastavením kamery, čtecí šum CCD kamery, který vzniká vyčítáním CCD kamery, a temný šum, který je způsoben hlavně kmity krystalové mřížky polovodiče. Teplota CCD kamery na palubě SDO je většinou nižší než -65 °C, a proto je temný šum zanedbatelný pro snímky s expoziční dobou kratší než několik vteřin (Lemen et al. 2011).

Krokem číslo tři je tzv. *flat-field* korekce. Jedná se o potlačení nedokonalostí optiky. Tato je uzpůsobena každému teleskopu a každému filtru zvlášť, protože každý vykazuje jinou nerovnoměrnost, dále každý kvadrant CCD kamery má jiný zisk a jiné stínování. Snímky pro *flat-field* korekci se získávají průměrem z několika jiných snímků s různými slunečními souřadnicemi, takže výsledný *flat-field* snímek je závislý pouze na vlivu aparatury (Lemen et al. 2011).

Dalším krokem je oprava jednotlivých pixelů. Ta sestává ze dvou jednotlivých úkonů. Prvním je náhrada pixelů, které jsou trvale poškozené. Každá CCD kamera má méně než 0,1 % takovýchto pixelů. Jejich hodnoty jsou nahrazeny interpolací hodnot okolních pixelů. Předpokládá se, že s pokračující misí bude těchto pixelů přibývat (Lemen et al. 2011).

Pátý krok zajišťuje umístění slunečního severu na vrcholu snímku. Dále jsou aktualizována metadata, která budou použita v hlavičce souboru (Lemen et al. 2011).

Takto upravený snímek je opatřen hlavičkou (proměnné využité při zpracování dat z přístroje AIA/SDO jsou uvedeny v Tab. 4) a je uložen ve formátu `.fits`. Existuje i Level 1.5, který dále upravuje orientaci snímků a jejich velikost. Jaký je „Level“ snímku, který byl stažen je možné poznat v hlavičce souboru podle hodnoty proměnné `LVL_NUM`.

Při zpracování jednotlivých struktur byl vždy nejprve určen čas prvního výskytu zebry. Po tomto určení byly pomocí internetové stránky <http://sdac.virtualsolar.org/cgi/search> staženy snímky z přístroje AIA/SDO ve vlnové délce 171 Å. Tato vlnová délka byla zvolena z toho důvodu, že pokud se vlna alespoň částečně opticky dala zjistit i v jiných vlnových délkách, vyskytovala se vždy i v této, popřípadě pouze v této vlnové délce. Z technických důvodů (hlavně velikost dat a občasná nedostupnost serveru) nebylo možné pro každou událost stahovat data ve všech vlnových délkách. Kontrola náznaků vln byla prováděna v programu JHelioviewer, který nemá mnoho dalších možností pro zpracování snímků, ale je nejvhodnější pro prohlížení dat z družice SDO. Data dokáže velmi rychle stáhnout (nestahuje je zdaleka v plné kvalitě) a zobrazit je. Stahování dat v plné kvalitě jen pro jejich následné prohlédnutí ve všech vlnových délkách by zabralo neúměrně víc času.

Tab. 4: Parametry v hlavičce souborů `.fit`, které byly využity při zpracování dat.

DATE-OBS	datum a čas pozorování (UTC)
T_OBS	čas pořízení snímku (začátek + doba expozice/2) (UTC)
EXPTIME	doba expozice (s)
DATAMIN	nejmenší hodnota ze všech pixelů (DN – digital number)
DATAMAX	nejvyšší hodnota ze všech pixelů (DN – digital number)
DATAMEDN	medián hodnot všech pixelů
DATAMEAN	průměr hodnot všech pixelů
NSATPIX	počet saturovaných pixelů (hodnoty nad 15 000 DN)
CRPIX1	střed slunečního disku (pix)
R_SUN	poloměr Slunce ve viditelné části spektra (pix)
DSUN_REF	referenční vzdálenost od Slunce: 149 597 870 691,0 m
DSUN_OBS	vzdálenost SDO od středu Slunce (m)
RSUN_REF	referenční poloměr Slunce: 696 000 000,0 m
RSUN_OBS	zdánlivý poloměr Slunce pozorovaný SDO (úhlové vteřiny)

Ke každé události byla stažena referenční data, která odpovídala prvním deseti minutám před začátkem zebry (50 snímků) a dále snímky vytvořené v prvních deseti

minutách po začátku zebry (50 snímků). Celkem tedy bylo staženo 700 snímků ve formátu `.fits` (7 událostí po 100 snímcích) o celkové velikosti 22,4 GB.

Po stažení všech dat byla data zpracována pomocí programů uvedených dále. Jedním z největších problémů bylo, že při snímání erupce je mnoho pixelů saturovaných, neboli přeexponovaných. Přístroj AIA/SDO je nastaven tak, že pokud se toto stane, pak při snímku, který následuje přeexponovanému snímku, velmi zkrátí dobu expozice. Tak je vytvořen snímek, který má méně saturovaných pixelů, popřípadě nemá žádné přeexponované pixely. V dalším snímku už se ale opět nastaví standardní čas expozice a snímek je znovu přesvětlen. Při analýze byl tudíž jeden snímek velmi tmavý a hned následující byl velmi světlý, což stěžovalo orientaci při hledání struktur vyskytujících se na snímcích. Tento problém byl částečně vyřešen vydělením každého pixelu snímku průměrným tokem celého snímku a přeškálováním, což u některých dat pomohlo. Bohužel se tento jev vyskytoval u pěti ze sedmi studovaných událostí, viz. Tab. 5, kde je možné vidět maximální a minimální hodnotu expoziční doby. Pokud je rozdíl mezi těmito dobami malý, pak k přeexponování nedochází (případ dne 1. srpna 2010 a dne 13. června 2012).

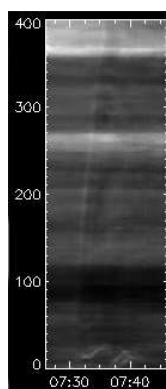
Tab. 5: Minimální a maximální doby expozic snímků při jednotlivých událostech.

Datum	Doba expozice minimum [s]	Doba expozice maximum [s]
2010-08-01	1,99964	1,99965
2011-02-15	0,10711	2,00019
2011-02-24	0,25529	2,00021
2011-08-09	0,03409	2,00019
2011-09-24	0,32024	1,99964
2012-06-13	2,00006	2,00008
2013-04-11	0,11512	1,99960

Při zpracování snímků z AIA/SDO byly použity tři hlavní postupy, a to *space-time diagram*, *running difference* a aplikace Fourierova filtru na data vytvořená pomocí metody *running difference*. Fourierův filtr je tvořen třemi základními kroky. Nejprve je snímek převeden z prostorové oblasti do oblasti frekvenční (pomocí rychlé Fourierovy transformace). Dále je takto převedený snímek vynásoben samotným filtrem, což je oblast o stejné velikosti jako snímek. Parametry použitého filtru jsou rozhodující pro vlastnosti výsledného snímku. Nakonec je obrázek převeden zpátky do prostorové oblasti. Fourierův filtr je užitečný např. při zaostřování, rozostřování či obnovování některých druhů snímků (Coyote's Guide to IDL Programming 2013). V této práci byl Fourierův filtr využitý

při odhalování pohybujících se struktur. Tyto metody zpracování dat byly použity např. v Liu et al. (2011), Li et al. (2012), Liu et al. (2012) nebo v Su et al. (2012).

První použitou metodou při analýze snímků z SDO/AIA byla metoda nazývaná *space-time* diagram. Pro tuto metodu byl vytvořen program `Space_Time.pro` v prostředí IDL. Po otevření programu je nutné načíst všechny snímky, které budeme chtít analyzovat (v našem případě 100 snímků z AIA 171 Å, ze kterých prvních padesát je před začátkem zebry a druhých padesát je po začátku zebry). Program poté zobrazí první snímek, u kterého je třeba označit počáteční a koncový bod úsečky, u které se dá očekávat, že bude ovlivněna vlnou (počáteční bod je obvykle místo erupce a úsečka má směr šíření vlny). Snímek se otočí o úhel, který svírá úsečka s vodorovným směrem, aby byl ulehčen další postup. Algoritmus dále prochází jednotlivé body úsečky a u každého bodu zprůměruje hodnoty deseti pixelů nad a pod tímto bodem. Tomuto úseku diagramu je přiřazen čas, odpovídající prvnímu snímku. Tím je získána první část závěrečného diagramu. Program dále načítá $(i+1)$ -ní snímek (kde $i = 1 - 99$) a opakuje algoritmus popsany výše, kdy každé vytvořené části je přiřazen čas $(i+1)$ -ního snímku. Takto je získán zbytek dat potřebných pro vytvoření diagramu. Příklad výsledného diagramu je na Obr. 11, kde x -ová osa zobrazuje čas a y -ová osa zobrazuje pozici na úsečce, podél které byl diagram vytvořen.

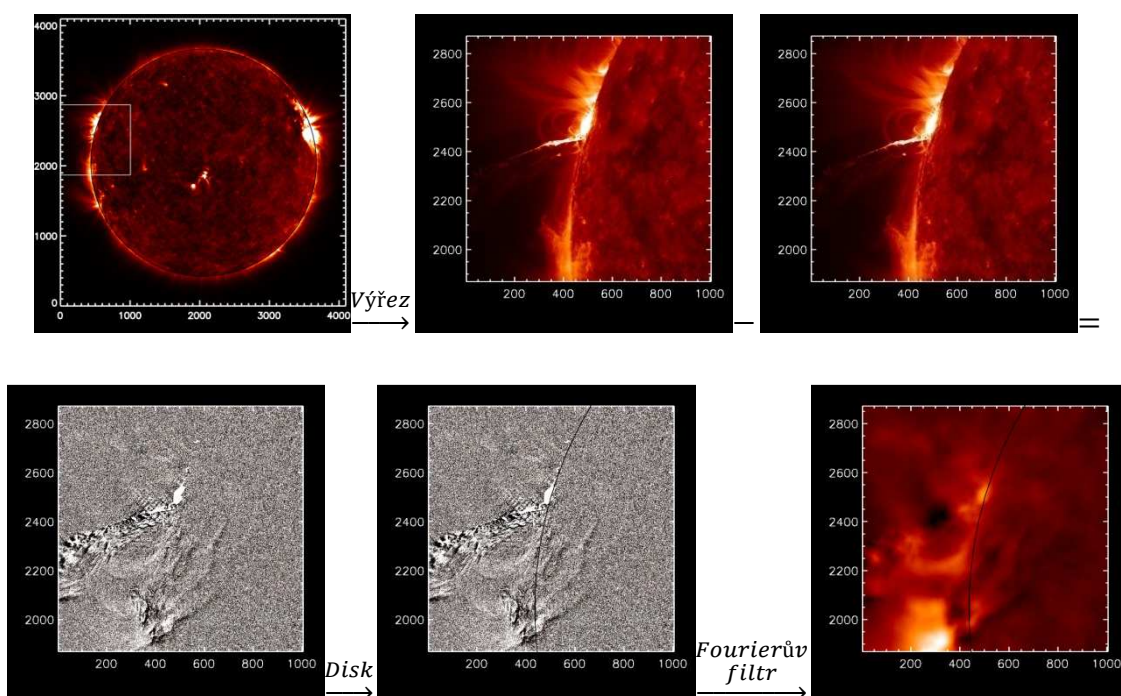


Obr. 11: Příklad *space-time* diagramu.

Druhá metoda zpracování snímků z AIA/SDO se nazývá *running difference*. Pro tuto metodu byl vytvořen program `RunDif.pro` v prostředí IDL. Po otevření programu je nutné načíst všechny snímky, které budeme chtít analyzovat (v našem případě 100 snímků z AIA 171 Å, ze kterých prvních padesát je před začátkem zebry a druhých padesát je po začátku zebry). Program si poté načte i -tý a $(i+1)$ -ní snímek ($i = 1 - 99$) a u každého snímku provede korekci jasů pomocí vydělení snímku číslem ($\text{EXP_TIME} \cdot \text{konst.}$) (EXP_TIME je doba expozice a konst. je číslo volené u každé události podle přesvětlení snímku). Pro každou

zebru byla vybrána čtvercová oblast na snímku, kde byla nejvyšší pravděpodobnost výskytu nějakého fyzikálního jevu. Před dalším zpracováním byl z každého snímku vyříznut právě vybraný čtverec. Takto upravené snímky poté program od sebe odečte. Tak je možné zjistit změny, které se odehrály mezi těmito dvěma snímky. V závěrečné fázi je z hlavičky i -tého snímku načtena poloha středu slunečního disku a jeho poloměr a tyto údaje jsou upraveny o posun vzniklý ořezáním snímků. Okraj slunečního disku je poté zobrazen na vzniklém snímku *running difference*. Výstupem tohoto programu je 99 obrázků buď ve formátu .eps nebo .jpg (častěji byl volen formát .jpg z důvodu jednodušší manipulace s nimi a možností vytvořit z nich video) částí slunečního disku. Schematicky je tento proces zobrazen na prvních pěti obrázcích na Obr. 12.

Třetí použitou metodou pro snímky z AIA/SDO po jejich předchozím zpracování pomocí procesu *running difference* je použití Fourierova filtru. K tomuto účelu byl napsán program `RunDifFFT.pro` v prostředí IDL. Algoritmus tohoto programu je stejný jako u programu `RunDif.pro`, je ale rozšířen právě o aplikování Fourierova filtru na každý vytvořený snímek. Tento filtr umožňuje jednodušší rozlišování struktur vzniklých po odečtení dvou snímků. Proces vytvoření tohoto snímku je schematicky zobrazen na Obr. 12.



Obr. 12: Schematické znázornění tvorby *running difference* a jeho úpravy pomocí Fourierova filtru.

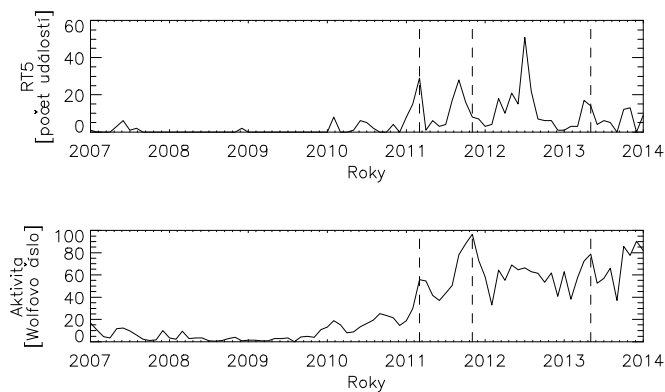
U nalezených pohybujících se struktur byla měřena jejich rychlost za pomoci *space-time* diagramů i za pomoci snímků *running difference* upravených pomocí Fourierova filtru. Při měření rychlosti pomocí *space-time* diagramů byly určeny počáteční a koncové souřadnice světlé křivky (možné vidět na Obr. 11), která určuje pohybující se strukturu. Ze zjištěné vzdálenosti a času pak byla vypočítána rychlost. Při měření rychlosti pomocí snímků *running difference* upravených pomocí Fourierova filtru byla kurzorem u *i*-tého snímku označena pozice pohybující se struktury a po načtení následujícího snímku byla kurzorem označena pozice, do které se struktura posunula. Vzhledem k tomu, že rozdíl časů mezi jednotlivými snímky je známý, stačilo dále určit vzdálenost mezi pozicemi kurzoru. Tato vzdálenost byla nejprve určena jako vzdálenost na snímku a poté byla vynásobena počtem kilometrů odpovídajícím jednomu pixelu na slunečním disku.

4 Výsledky

Mezi lety 2007 a 2013 bylo ondřejovským slunečním rádiovým spektrografem zaznamenáno celkem 425 událostí, které byly zanesené do archivu. Tyto události byly pomocí programu RT5_setup.pro analyzovány ve smyslu určení struktur, které se mohou na spektrogramech vyskytovat. Výsledky analýzy jednotlivých událostí jsou zaznamenány v Tab. 6, kde komplexnost události je podíl součtu všech typů a počtu událostí v daném roce. Na Obr. 13 je znázorněno porovnání počtu událostí zaznamenaných slunečním rádiovým spektrografem RT5 v jednotlivých měsících a sluneční aktivity zjištěné podle počtu slunečních skvrn.

Tab. 6: Výskyty různých typů rádiových vzplanutí mezi lety 2007 a 2013.

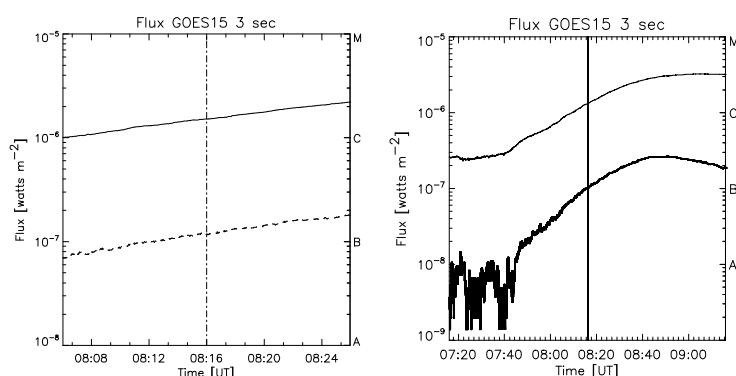
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	celkem
continua	9	1	-	10	65	65	42	192
pulsations	2	-	-	4	20	12	9	47
isolated broadband pulses	3	-	-	7	36	54	30	130
fast drift bursts	1	-	-	1	6	12	4	24
narrowband type III bursts	2	-	-	4	23	37	8	74
slowly drifting bursts	1	-	-	1	9	16	11	38
narrowband spikes	-	-	-	2	1	8	7	18
fibers	-	-	-	-	-	-	-	-
zebras	-	-	-	1	1	1	1	4
laces	-	-	-	-	2	5	3	10
součet všech typů	18	1	-	30	163	210	115	537
počet událostí	13	2	-	26	142	164	78	425
komplexnost události	1,4	0,5	-	1,2	1,1	1,3	1,5	1,3



Obr. 13: Porovnání počtu událostí zaznamenaných pomocí RT5 (nahore) a sluneční aktivity podle Wolfova čísla (dole).

4.1 Zebra z 1. srpna 2010

Sluneční erupce související s touto zebrou se vyskytovala v aktivní oblasti 11092, byla třídy C3.2 (Obr. 14 vlevo ukazuje data ze sondy GOES od deseti minut před zebrou do deseti minut po zebře, Obr. 14 vpravo ukazuje data ze sondy GOES od jedné hodiny před zebrou do jedné hodiny po zebře, kdy u obou obrázků je přerušovanou čerchovanou čarou naznačen čas začátku zebry) a patřila tedy ke středně silným. Počátek erupce nastal v 7:55 UT a vrchol erupce byl zaznamenán v 8:26 UT. Celková délka trvání erupce byla 31 minut.



Obr. 14: Detail průběhu rentgenového záření při erupci (vlevo) a rentgenový tok v delším období (vpravo) u zebry z 1. srpna 2010.

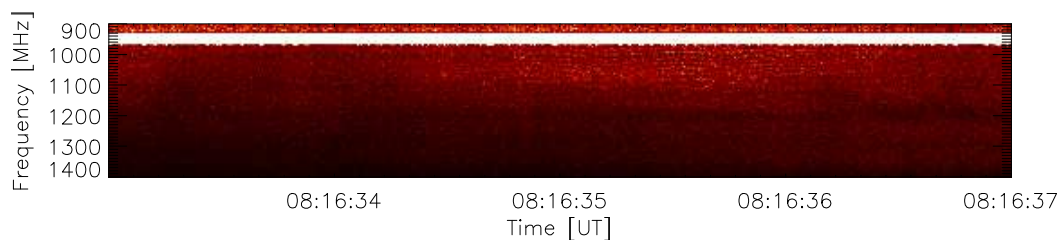
Zebra samotná byla zaznamenána ondřejovským rádiovým spektrografem a její počátek byl stanoven na 8:16:34 UT (Obr. 15). Celkově zebra trvala 2,7 vteřiny (jedná se pouze o první zebrou, pozorovanou při tomto rádiovém vzplanutí). Podle vzorce 3.1 a rozdělení na základě tohoto výpočtu zebra začala v počáteční fázi erupce. Zebra sestávala ze šesti čar, jejichž střední frekvence jsou v Tab. 7 a jejichž průměrná frekvenční vzdálenost byla 16 MHz.

Tab. 7: Průměrné frekvence čar a jejich frekvenční vzdálenosti zebry z 1. srpna 2010.

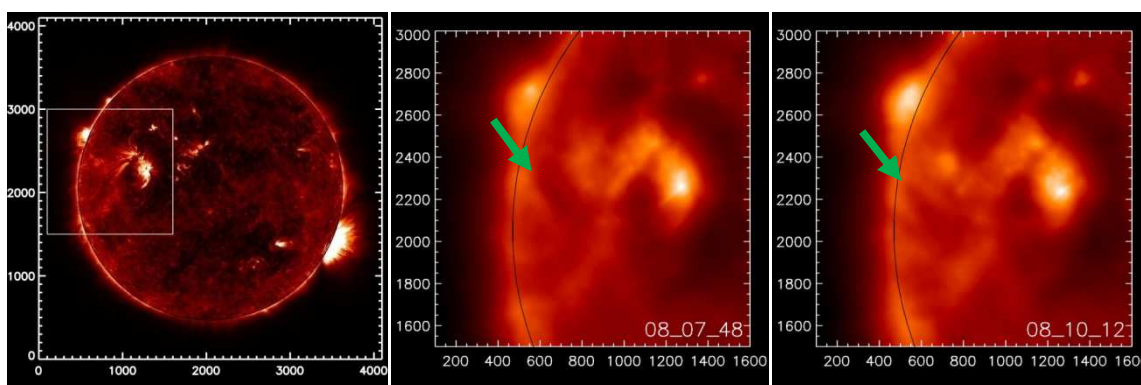
Označení čáry	f [MHz]	$f_{i+1}-f_i$ [MHz]
f_1	981	17
f_2	998	14
f_3	1012	10
f_4	1022	16
f_5	1038	23
f_6	1061	-

Na snímcích z přístroje AIA/SDO ve vlnové délce 171 Å, upravených podle postupů v kapitole 3.2, je možné pozorovat koronální vlnu (Obr. 16), pohybující se rychlostí přibližně 2000 km·s⁻¹. Tato vlna se pravděpodobně šíří už před prvním staženým snímkem (tedy před 8:06:00 UT) a je možné ji pozorovat až do 8:21:12 UT. Na Obr. 16 je zobrazen

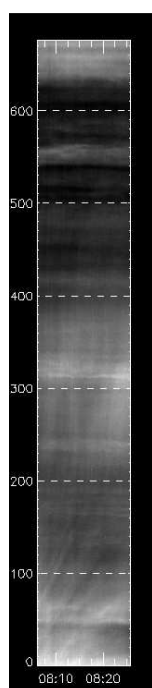
výřez, ve kterém se koronální vlna pohybuje, a dále snímky *running difference* zpracované pomocí Fourierova filtru v časech 8:07:48 UT a 8:10:12 UT. Na Obr. 17 (*space-time* diagram) jsou patrné světlé pruhy směřující z levého dolního rohu svisle nahoru. Tyto pruhy odpovídají pohybům jednotlivých koronálních vln.



Obr. 15: Spektrogram struktury typu zebra pozorované 1. srpna 2010 přístrojem RT5.



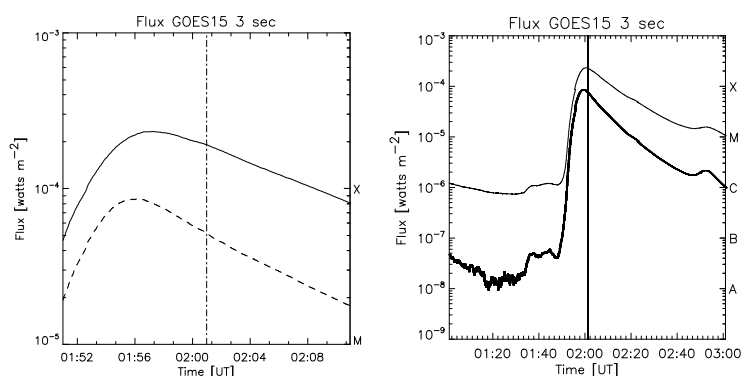
Obr. 16: Naznačení výřezu okolí erupce (vlevo) a upravené snímky ve dvou různých časech (uprostřed a vpravo) u zebry z 1. srpna 2010. Zelená šipka označuje polohu koronální vlny.



Obr. 17: *Space-time* diagram pro zebry ze dne 1. srpna 2010.

4.2 Zebra z 15. února 2011

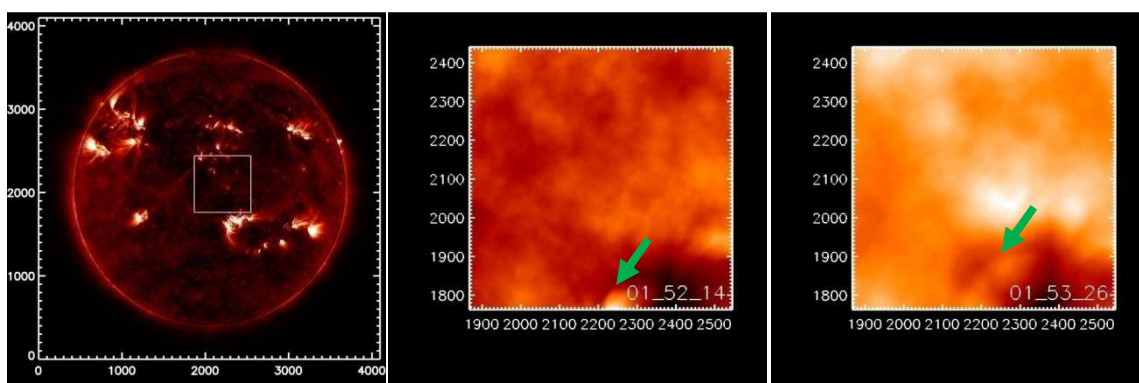
Sluneční erupce vyvolávající tuto zebra se nacházela v aktivním regionu 11158, byla třídy X2.2 a byla druhou nejsilnější erupcí, které byly v této práci zpracovávány. Začátek erupce byl stanoven na 1:44 UT a délka trvání byla 12 minut. Vrchol erupce se odehrál v 1:56 UT. Průběh erupce v měkkém rentgenovém záření je zobrazen na Obr. 18, kde je čerchovanou svislou čarou naznačen čas, kdy se odehrála zebra.



Obr. 18: Detail průběhu rentgenového záření při erupci (vlevo) a rentgenový tok v delším období (vpravo) u zebry z 15. února 2011.

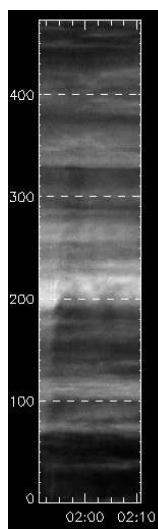
Tato zebra byla zjištěna pomocí čínského rádiového spektrografu SBRS/Huairou. Začátek zebry byl stanoven na 2:01:19 UT a délka trvání této zebry byly 0,9 vteřiny. Zebra byla tvořena celkem dvěma čarami, z nichž jedna měla průměrnou frekvenci 2650 MHz a druhá 2720 MHz. Frekvenční vzdálenost jednotlivých čar tedy byla 70 MHz. Tato zebra se vyskytla jako jediná v pozdní fázi erupce, tedy až za jejím vrcholem.

Na Obr. 19 je zobrazen výřez, ve kterém se tato struktura pohybuje, a snímky *running difference* zpracované pomocí Fourierova filtru v časech 1:52:14 UT a 1:53:26 UT.



Obr. 19: Naznačení výřezu okolí erupce (vlevo) a upravené snímky ve dvou různých časech (uprostřed a vpravo) u zebry z 15. února 2011. Zelená šipka označuje polohu pohybující se struktury.

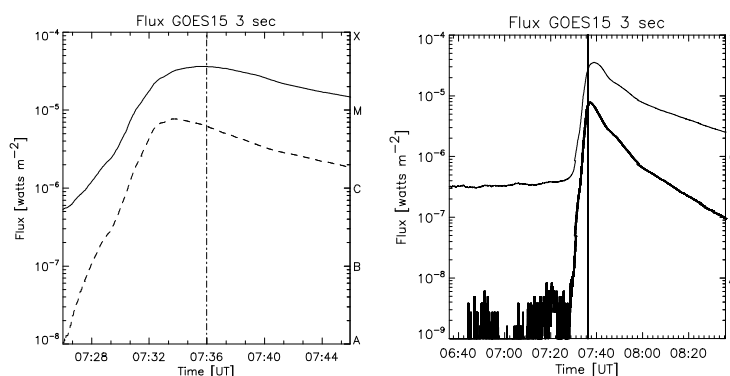
Na upravených snímcích z AIA/SDO je od 1:51:26 UT do 1:55:12 UT možné pozorovat strukturu pohybující se rychlostí přibližně $450 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Na Obr. 20 (*space-time diagram*) je patrný světlý pruh směřující z levého dolního rohu svisle nahoru. Tento pruh je důsledkem pohybu zaznamenané struktury.



Obr. 20: *Space-time diagram* pro zebra ze dne 15. února 2011.

4.3 Zebra z 24. února 2011

Tato erupce třídy M3.5 (Obr. 21) začala v 7:23 UT a trvala 12 minut. Její vrchol nastal v 7:35 UT. Erupce nastala v aktivním regionu 11163.



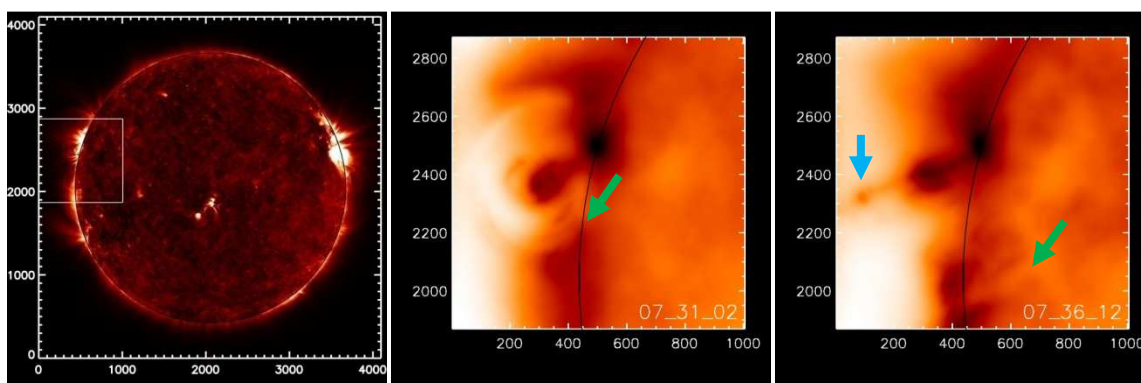
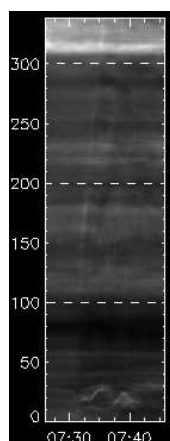
Obr. 21: Detail průběhu rentgenového záření při erupci (vlevo) a rentgenový tok v delším období (vpravo) u zebry z 24. února 2011.

Zebra provázející tuto erupci měla počátek v 7:36:35 UT a odehrála se tak při vrcholu erupce, jako většina zkoumaných zebry. Doba trvání této zebry byla 1,5 vteřiny. Jako předchozí zebra i tato byla zaznamenána pomocí čínského rádiového spektrografu SBRS/Huairou. Průměrné frekvence jednotlivých čar jsou zaznamenány v Tab. 8. Průměrná frekvenční vzdálenost mezi čarami je 52,5 MHz.

Tab. 8: Průměrné frekvence čar a jejich frekvenční vzdálenosti zebry z 24. února 2011.

Označení čáry	f [MHz]	$f_{i+1}-f_i$ [MHz]
f_1	3340	50
f_2	3390	50
f_3	3440	50
f_4	3490	60
f_5	3550	-

Mezi 7:31:36 UT a 7:37:49 UT je na zpracovaných snímcích z přístroje AIA/SDO patrná struktura pohybující se jižním směrem rychlostí přibližně $900 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Na Obr. 22 je zobrazen výřez, ve kterém se tato struktura pohybuje, a snímky *running difference* zpracované pomocí Fourierova filtru v časech 7:31:02 UT a 7:36:12 UT. Navíc díky poloze této erupce na okraji slunečního disku je možné pozorovat i plasmoidy (útvary vzniklé při rekonexi magnetického pole), které byly vyvrženy ve směru kolmém na pozorování. Na Obr. 23 (*space-time diagram*) je patrný světlý pruh způsobený pohybem struktury, který směřuje z levého dolního rohu svisle nahoru, a několik vlnovek na spodním okraji, které byly způsobeny kmitáním poerupčních smyček.

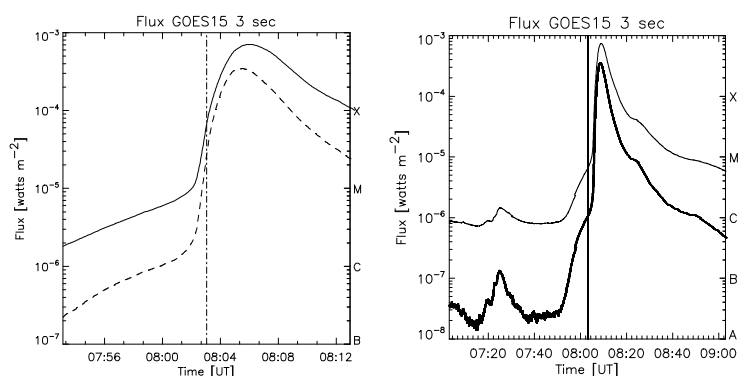
**Obr. 22:** Naznačení výřezu okolí erupce (vlevo) a upravené snímky ve dvou různých časech (uprostřed a vpravo) u zebry z 24. února 2011. Zelená šipka označuje polohu pohybující se struktury a modrá šipka označuje polohu plasmoidu.**Obr. 23:** *Space-time diagram* pro zebry ze dne 24. února 2011.

4.4 Zebra z 9. srpna 2011

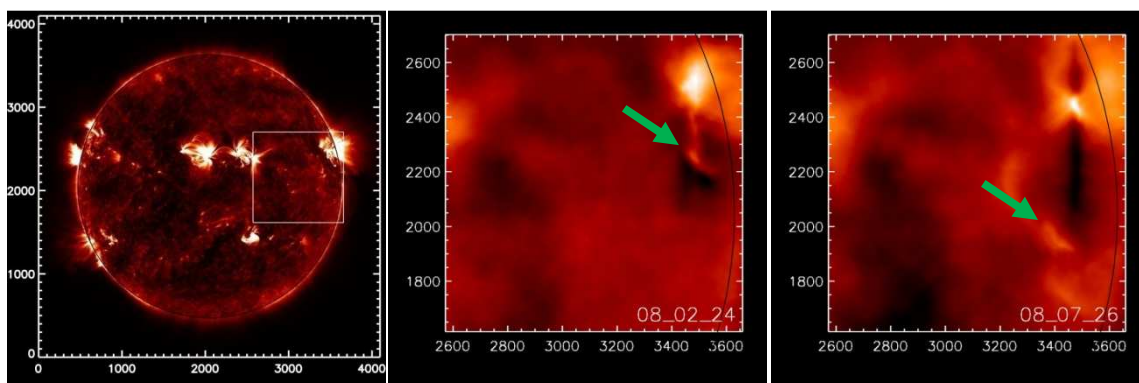
Erupce, která ji provázela, byla třídy X6.9 (Obr. 24) a proběhla v aktivní oblasti 11263. Jednalo se o nejsilnější erupci, která se vyskytovala ve studovaných případech. Erupce samotná začala v 7:48 UT a trvala 17 minut. Její vrchol nastal v 8:05 UT.

Začátek této zebry byl určen na 8:03:25 UT a proběhla tedy při vrcholu erupce. Délka jejího trvání byla 0,75 vteřiny. Tato zebra sestávala ze dvou čar, jejichž průměrné frekvence byly 2650 MHz a 2700 MHz. Jejich frekvenční vzdálenost tedy byla 50 MHz.

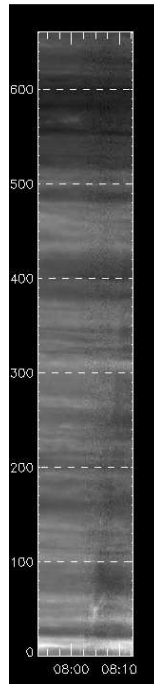
Na Obr. 25 je znázorněn výřez okolí erupce a snímky *running difference* zpracované pomocí Fourierova filtru v časech 8:02:24 UT a 8:07:26 UT. Na těchto snímcích je viditelná struktura, kterou bylo možné pozorovat od 8:02:14 UT do 8:07:50 UT a která se pohybovala rychlostí přibližně $600 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Na Obr. 26 (*space-time diagram*) je patrný světlý pruh směřující z prostřední části dolního okraje svisle nahoru. Tento pruh je možné interpretovat jako pohyb nalezené struktury.



Obr. 24: Detail průběhu rentgenového záření při erupci (vlevo) a rentgenový tok v delším období (vpravo) u zebry z 9. srpna 2011.



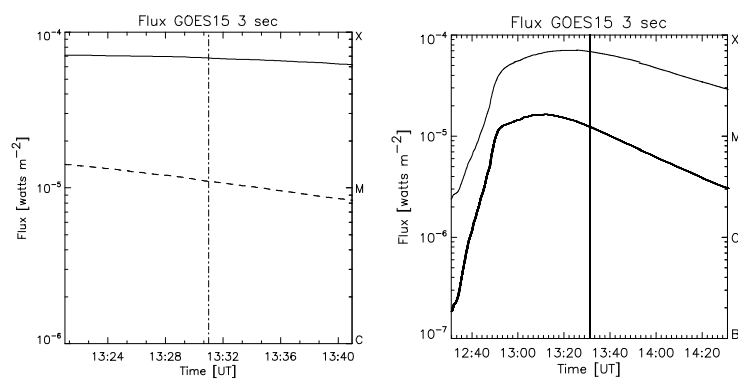
Obr. 25: Naznačení výřezu okolí erupce (vlevo) a upravené snímky ve dvou různých časech (uprostřed a vpravo) u zebry z 9. srpna 2011. Zelená šipka označuje polohu pohybující se struktury.



Obr. 26: Space-time diagram pro zebra ze dne 9. srpna 2011.

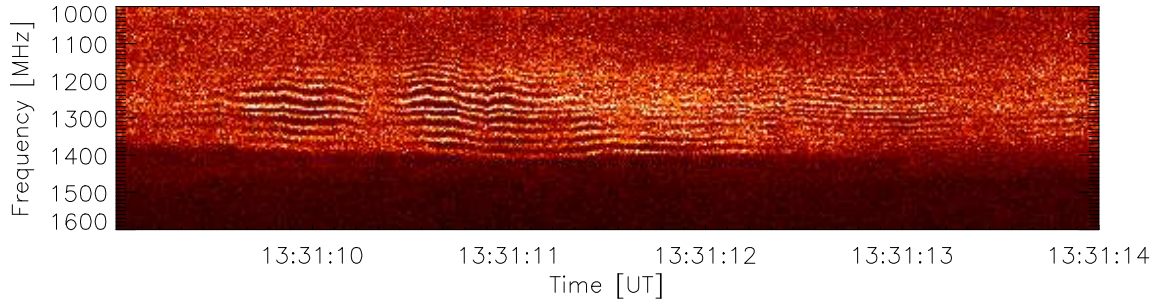
4.5 Zebra z 24. září 2011

Sluneční erupce provázející tuto zebra byla třídy GOES M7.1 (Obr. 27) a začala ve 12:33 UT. Vrchol erupce nastal ve 13:20 UT, celkově tato erupce trvala 47 minut a nacházela se v aktivní oblasti 11302.



Obr. 27: Detail průběhu rentgenového záření při erupci (vlevo) a rentgenový tok v delším období (vpravo) u zebry z 24. září 2011.

Začátek zebry byl určen na 13:31:09 UT (Obr. 28). Celkem zebra trvala 9,8 vteřiny a byla tvořena osmi čarami, jejichž střední frekvence jsou vypsány v Tab. 9. Průměrná frekvenční vzdálenost mezi čarami této zebry je 21,9 MHz. Zebra se odehrála při vrcholu erupce.

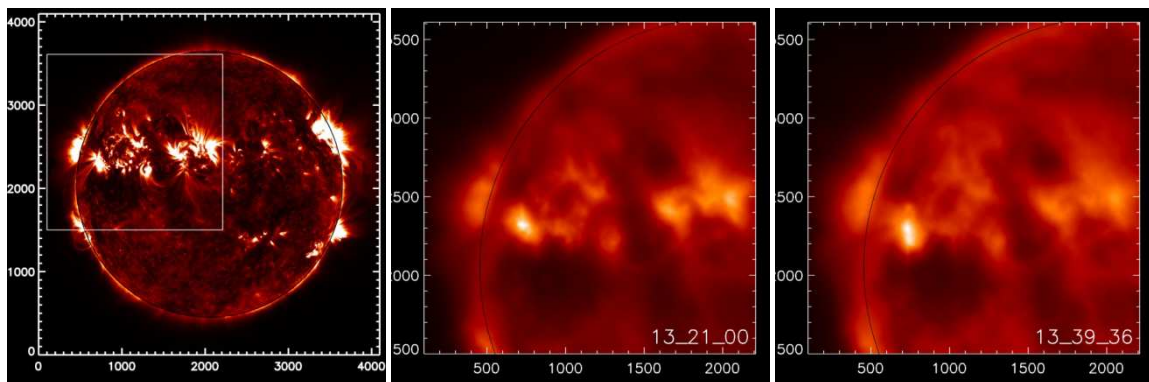


Obr. 28: Část spektrogramu struktury typu zebra pozorované 24. září 2011 přístrojem RT5.

Tab. 9: Průměrné frekvence čar a jejich frekvenční vzdálenosti zebry z 24. září 2011.

Označení čáry	f [MHz]	$f_{i+1}-f_i$ [MHz]
f_1	1201	22
f_2	1223	18
f_3	1241	14
f_4	1255	25
f_5	1280	25
f_6	1305	27
f_7	1332	22
f_8	1354	-

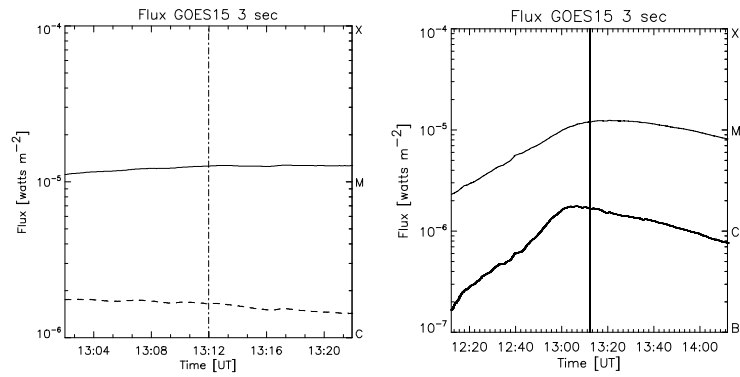
Na snímcích z přístroje AIA/SDO ve vlnové délce 171 Å nebyly pozorovány žádné změny struktur, jak je patrné z Obr. 29, který se skládá z označení výřezu okolí erupce a snímků *running difference* zpracovaných pomocí Fourierova filtru v časech 13:21:00 UT a 13:39:36 UT.



Obr. 29: Naznačení výřezu okolí erupce (vlevo) a upravené snímky ve dvou různých časech (uprostřed a vpravo) u zebry z 24. září 2011.

4.6 Zebra z 13. června 2012

Erupce související s touto zebrou byla GOES třídy M1.2 (Obr. 30), proběhla v aktivní oblasti 11504 a začala v 11:29 UT. Celková doba trvání této erupce byla 108 minut. Vrchol erupce nastal ve 13:17 UT.

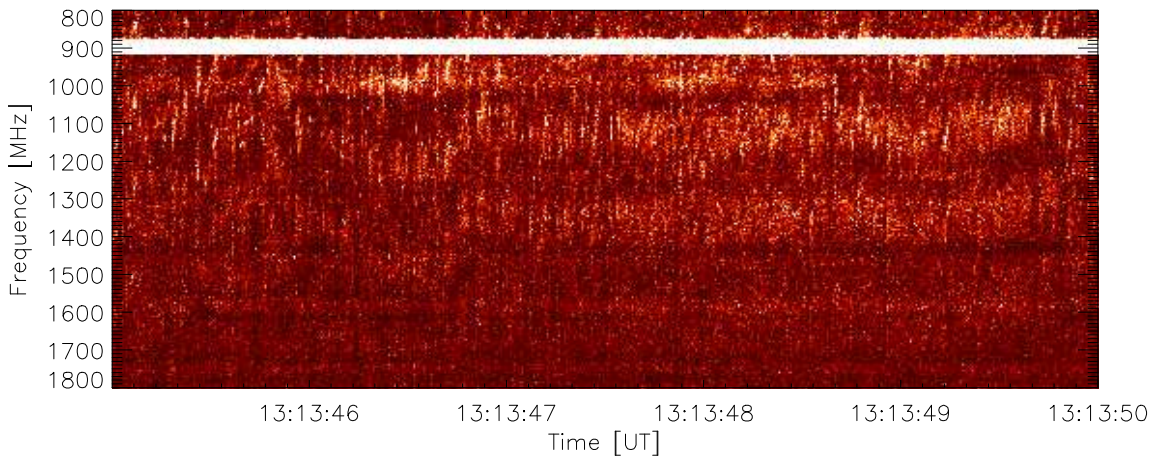


Obr. 30: Detail průběhu rentgenového záření při erupci (vlevo) a rentgenový tok v delším období (vpravo) u zebry z 13. června 2012.

Začátek této zebry byl určen na 13:13:24 UT, tedy při vrcholu erupce, a doba jejího trvání byla 38,85 vteřiny (Obr. 31). Celkem byla tvořena třemi čarami, jejichž průměrné frekvence jsou zobrazeny v Tab. 10. Průměrná frekvenční vzdálenost těchto čar byla 219 MHz. U jednotlivých čar této zebry docházelo k poměrně velkým frekvenčním driftům.

Tab. 10: Průměrné frekvence čar a jejich frekvenční vzdálenosti zebry z 13. června 2012.

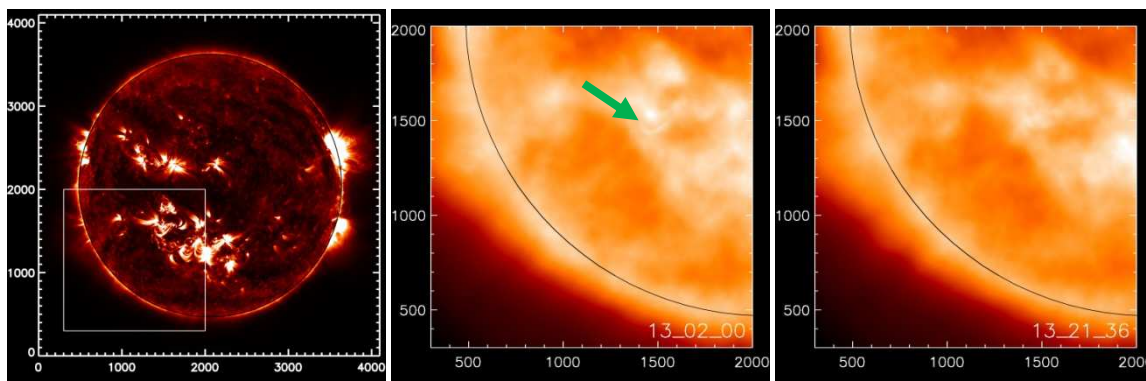
Označení čáry	f [MHz]	$f_{i+1}-f_i$ [MHz]
f_1	1150	204
f_2	1354	234
f_3	1588	-



Obr. 31: Část spektrogramu se strukturou typu zebra pozorované 13. června 2012 přístrojem RT5.

Snímky z přístroje AIA/SDO byly pro tuto událost zajímavé z důvodu, že všechny měly velmi podobnou dobu expozice. Nedošlo tedy k přesvětlení některých snímků. Bohužel v okolí erupce (výřez znázorněn na Obr. 32) nebyly zjištěny žádné struktury, kromě

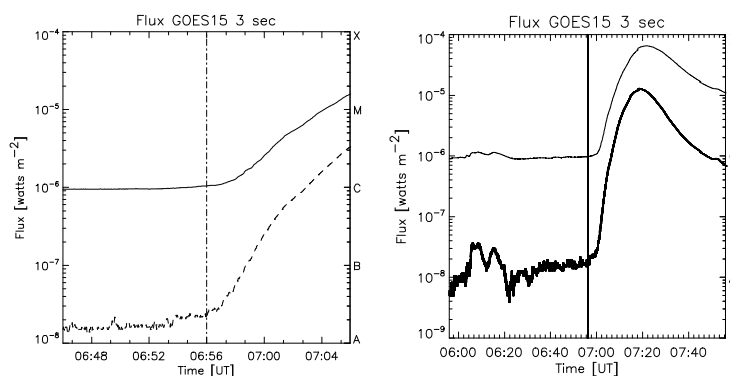
oscilujících erupčních smyček, které je možné vidět na Obr. 32 na snímku z 13:02:00 UT a které už se nenacházejí na snímku ve stejném obrázku ve 13:21:36 UT.



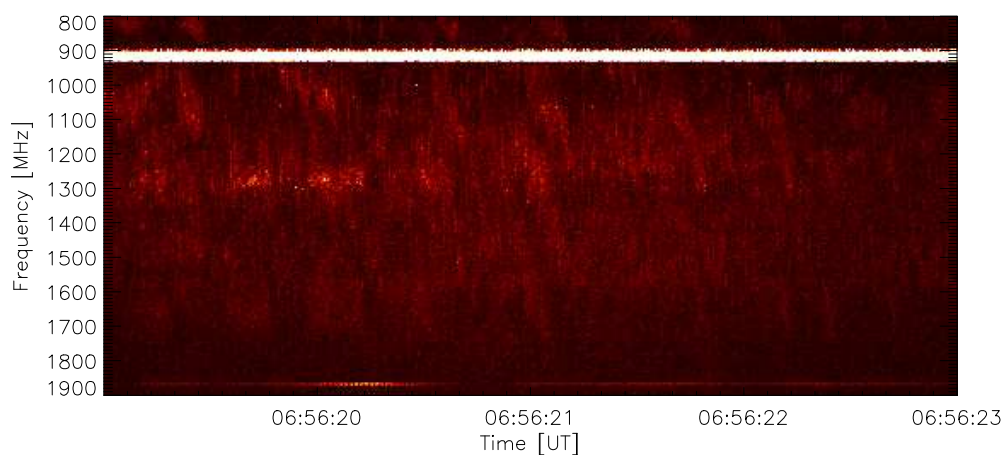
Obr. 32: Naznačení výřezu okolí erupce (vlevo) a upravené snímky ve dvou různých časech (uprostřed a vpravo) u zebry z 13. června 2012. Zelená šipka označuje polohu oscilujících erupčních smyček.

4.7 Zebra z 11. dubna 2013

Erupce vztahující se k této zebře byla třídy GOES M6.5 (Obr. 33), začala v 6:55 UT a trvala 21 minut. Tato erupce se nacházela v aktivní oblasti 11719 a její vrchol nastal v 7:16 UT.



Obr. 33: Detail průběhu rentgenového záření při erupci (vlevo) a rentgenový tok v delším období (vpravo) u zebry z 11. dubna 2013.



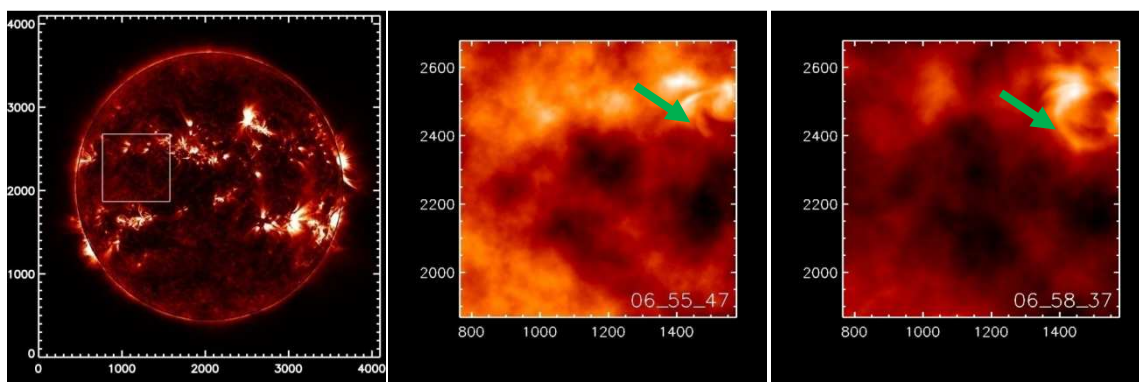
Obr. 34: Část spektrogramu se strukturou typu zebra pozorované 11. dubna 2013 přístrojem RT5.

Samotná zebra (Obr. 34) začala v 6:56:13 a trvala 16 vteřin. Celkem sestávala ze tří čar, jejichž průměrné frekvence jsou v Tab. 11. Průměrná frekvenční vzdálenost těchto čar byla 266,5 MHz. Stejně jako erupce z 1. srpna 2010 se odehrála před vrcholem erupce.

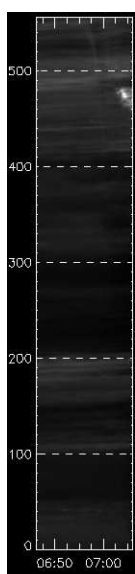
Tab. 11: Průměrné frekvence čar a jejich frekvenční vzdálenosti zebry z 11. dubna 2013.

Označení čáry	f [MHz]	$f_{i+1}-f_i$ [MHz]
f_1	1052	268
f_2	1320	265
f_3	1585	-

Na upravených snímcích z AIA/SDO je v intervalu mezi 6:54:59 UT a 6:58:47 UT možné vidět ve výřezu okolo místa erupce pohybující se strukturu (Obr. 35). Tato struktura se pohybovala rychlostí přibližně $150 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Na Obr. 36 (*space-time* diagram) je patrný světlý pruh směřující z prostřední části horního okraje svisle dolů. Tento pruh je možné interpretovat jako pohyb nalezené struktury.



Obr. 35: Naznačení výřezu okolí erupce (vlevo) a upravené snímky ve dvou různých časech (uprostřed a vpravo) u zebry z 11. dubna 2013. Zelená šipka označuje polohu pohybující se struktury.



Obr. 36: *Space-time* diagram pro zebrou ze dne 11. dubna 2013.

5 Diskuze

V práci byla analyzována data ze slunečního rádiového spektrografu RT5 v Ondřejově a čínského radioteleskopu SBRS/Huairou. Pro tento účel byl vytvořen úplně nový program v prostředí IDL `RT5_setup.pro`, popsáný v kapitole 3.1. Po rozdělení struktur podle kritérií v kapitolách 2.3 a 2.4 byly pro další studium vybrány typy vzplanutí nazývané zebra. Ty byly dále zpracovány pomocí programu `RT5_setup.pro`, kdy byla zjišťována doba jejich trvání, průměrná frekvence jednotlivých čar a průměrné frekvenční vzdálenosti. Posledním krokem bylo porovnání těchto zeber s daty získanými z přístroje AIA na palubě sondy SDO ve vlnové délce 171 Å pomocí metod popsáných v kapitole 3.2.

Při porovnání výskytu různých typů rádiových vzplanutí mezi lety 2007 a 2013 provedené v této práci (Tab. 6) se stejnou analýzou, kterou provedli Jiříčka et al. (2001) pro období mezi lety 1992 a 2000 je patrný stejný vzor pro minima a maxima sluneční aktivity. Tedy že při minimech sluneční aktivity byl počet rádiových vzplanutí velmi malý (v roce 1995 pět vzplanutí, v roce 2009 dokonce žádné vzplanutí). Naproti tomu při maximu sluneční aktivity bylo ročně pozorováno více než sto vzplanutí. Komplexnost událostí zjištěná v této diplomové práci také odpovídá komplexnosti událostí zjištěných Jiříčkou et al. 2001. Celková komplexnost v článku od Jiříčky et al. (2001) byla 1,4, celková komplexnost zjištěná v této práci byla 1,3. Jedinou výjimkou je rok 2008, kdy byla archivována dvě vzplanutí, na nichž se mi podařilo objevit pouze jednu strukturu typu *continuum*. Toto je jediný rok, u kterého byla komplexnost událostí menší než jedna. Potěšujícím zjištěním bylo objevení deseti typů vzplanutí typu *lace*, které byly poprvé pozorované právě ondřejovským slunečním rádiovým spektrografem RT5.

Mezi 425 událostmi, na kterých bylo objeveno 537 struktur rozdělených podle kritérií popsáných v kapitolách 2.3 a 2.4 byly nalezeny čtyři výrazné struktury typu zebra. Tyto struktury jsou ve sluneční radioastronomii pozorovány zřídka (Jiříčka et al. 2001). Na spektrogramech byly nalezeny i velmi slabé a krátké zebry, které ale do této studie zahrnuty nebyly z důvodů nejednoznačnosti určení těchto struktur a složitosti určování jejich parametrů. Počet těchto zeber byl rozšířen o tři struktury typu zebra z SBRS/Huairou.

Jedním z kritérií, podle kterých můžeme struktury typu zebra dělit, je určení, ve které fázi erupce se odehrály (Tan et al. 2013). Ze sedmi studovaných zeber se dvě odehrály před vrcholem erupce, čtyři při vrcholu erupce a jedna po vrcholu erupce. To odpovídá

rozdělení publikovanému v článku od Tan et al. (2013), kde bylo nejvíce zeber také pozorováno při vrcholu erupce.

Dalšími kritérii vzniku zeber mohou být pozice erupce na disku a třída erupce (Jiříčka et al. 2001, Tan et al. 2013). I na menším vzorku zeber zpracovaných v této práci je patrné, že pozice erupce na slunečním disku na vznik zebry nemá vliv. Erupce spouštějící zebry se totiž odehrály jak na okraji slunečního disku, tak i blízko jeho středu. Zároveň třída erupce při vzniku zebry nehraje určující roli (studované erupce byly tříd C, M i X). Avšak erupce třídy C byla mezi studovanými pouze jedna a proto lze říci, že vznik struktur typu zebra je častější při středně silných a silných erupcích, jak bylo navrženo v článku od Tan et al. (2013).

Struktury typu zebra lze dále dělit podle délky jejich trvání (Tan et al. 2013). U studovaných zeber bylo rozmezí délky trvání od 0,75 vteřiny do 38,85 vteřiny. Při tomto rozdělení je velice zajímavé, že zebry s delší dobou trvání (nad 16 vteřin) mají mnohem větší průměrnou frekvenční vzdálenost (>200 MHz). Zároveň zebry s delší dobou trvání jsou tvořeny méně čarami. Jedinými dvěma výjimkami jsou zebry ze dnů 15. února 2011 a 9. srpna 2011. Ty jsou velmi krátké a zároveň jsou tvořeny malým počtem čar. To je ale nejspíš dáno jejich umístěním na spektrogramu, kdy další čáry se na snímek nevešly. Zároveň to může být i vysvětlení malého počtu čar u zeber s velkou průměrnou frekvenční vzdáleností, kdy další čára může být mimo spektrogram.

Při porovnávání struktur typu zebra pozorovanými slunečním rádiovým spektrografem RT5 a čínským radioteleskopem SBRS/Huairou s daty z AIA/SDO ve vlnové délce 171 \AA nebyla k jedné struktuře typu zebra (ze dne 24. září 2011) pozorována žádná změna na snímcích z AIA/SDO. To může být dáno tím, že některé struktury jsou velmi jemně teplotně závislé (Liu et al. 2011), a proto by pravděpodobně bylo možné je pozorovat v jiných vlnových délkách. Stahování dat ve všech vlnových délkách, které AIA/SDO poskytuje, by bylo ale velmi náročné a bylo by potřeba mít k dispozici placený software.

Ke struktuře typu zebra z 1. srpna 2010 je možné v EUV oblasti časově přiřadit koronální vlnu (Liu et al. 2011). To je velmi důležité k porovnávání slunečních dat s vytvářenými modely (např. k modelu od Karlického 2013). Tato vlna byla zpracována v článku od Liu et al. (2011), ale nebyla dána do souvislosti s tvorbou zebry. Rychlost koronální vlny změřená v tomto článku byla určena přibližně na $2200 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ (v názvu článku

zaokrouhlená na $2000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$), přičemž v této práci byla změřená rychlost $2000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. To ukazuje na velmi pěknou přesnost programů vytvořených pro tuto práci. Odchylka těchto dvou rychlostí může být dána měřením v různých fázích šíření vlny. Tato vlna měla periodu přibližně 180 vteřin, což odpovídá i periodě zebry a dává tyto dvě události do ještě užších souvislostí.

U zebry ze dne 13. června 2012 byl na snímcích s přístroje AIA/SDO ve vlnové délce 171 \AA zaznamenán pouze pohyb poerupční smyčky. Poměrně velký frekvenční drift jednotlivých čar zebry jak v kladném, tak i v záporném směru, může být důsledkem časových změn ve vlastnostech elektronů, které byly vstříkované do poerupční smyčky, jak navrhuje Chen et al. (2011). V tomto článku byla změřena přesná pozice vzniku zebry, a to právě v místě poerupční smyčky. Na rozdíl od zebry studované v článku od Chen et al. (2011) měla ale zebra ze 13. června 2012 mnohem delší dobu trvání a mnohem větší průměrnou frekvenční vzdálenost. Proto by se podle členění v článku od Tan et al. (2013) obě zebry výše zmíněné v tomto odstavci řadily do jiných skupin. Není tedy jisté, zda by bylo správné označit u obou za spouštěč stejný mechanismus.

U ostatních zeber popsaných v této práci (zebry z 15. února 2011, 24. února 2011, 9. srpna 2011 a 11. dubna 2013) byly ve vlnové délce 171 \AA pozorovány struktury, které lze časově přiřadit k pozorovaným zebrám. Vzhledem k jejich pozorovaným vlastnostem (krátká doba pozorování, nemožnost zjistit jejich 3D vzhled, ...) nelze ale o těchto strukturách s jistotou prohlásit, že se jedná o koronální vlny. Tento nedostatek tedy znovu umožňuje vysvětlit původ struktur typu zebra i jinými spouštěči, než jsou výše zmiňované koronální vlny (model od Karlického 2013) nebo poerupční smyčky (Chen et al. 2011).

6 Závěr

Cílem této práce bylo převést data ze slunečního rádiového spektrografu RT5 do souborů `.fits` a vytvořit program na jejich zpracování, který by data nejen zobrazoval, ale zároveň by nabízel rozšířené možnosti, jako např. měření doby trvání událostí, měření frekvenčního posunu, zobrazování časových a frekvenčních profilů atd. a zároveň by tento program umožňoval ukládat takto vytvořená data do různých formátů (`.ps`, `.fit`, ...). Dále bylo cílem pomocí tohoto programu zpracovat data podle výskytu různých typů struktur. Po zpracování měl být vybrán jeden typ struktury, který by byl studován podrobněji a který by měl být porovnán se snímky z přístroje AIA/SDO.

Pro účely této diplomové práce byl v prostředí IDL vytvořen program `rt5_to_fits.pro`, který je schopen převádět data ze slunečního rádiového spektrografu RT5 z původního formátu `.rt5` do formátu `.fits`. Pro zpracování těchto dat byl napsán program `RT5_setup.pro`, který splňuje všechny nároky z předchozího odstavce a je popsán v kapitole 3.1.

Data zpracovaná pomocí programu `RT5_setup.pro` byla rozdělena podle struktur, které se v nich nacházely a dále z těchto struktur byly pro podrobnější analýzu vybrány struktury typu `zebra`. U těch byly zkoumány doby jejich trvání, průměrné frekvence jednotlivých čar a průměrné frekvenční vzdálenosti.

Ke každé struktuře typu `zebra` zkoumané v této práci byla stažena data pořízená přístrojem AIA/SDO, která byla upravena, aby na nich mohly být lépe rozpoznány pohybující se struktury.

Bohužel nebyl nalezen přímý důkaz toho, že by strukturám typu `zebra` odpovídal jeden typ struktur pozorovaných přístrojem AIA/SDO. To naznačuje, že pro `zebra`, které mají různé parametry, existují různé spouštěče. Proto je nutné věnovat této problematice další pozornost.

7 Literatura

- Antia, H. M., Bhatnagar, A., Ulmschneider, P., 2003: Lectures on Solar Physics, Springer, Heidelberg, Germany, 335p.
- Aschwanden, M., 2005: Physics of the Solar Corona, Springer, Chichester, UK, 908p.
- Boerner, P., Edwards, Ch., Lemen, J., Rausch, A., Schrijver, C., Shine, R., Shing, L., Stern, R., Tarbell, T., Title, A., Wolfson, C. J., Soufli, R., Spiller, E., Gullikson, E., McKenzie, D., Windt, D., Golub, L., Podgorski, W., Testa, P., Weber, M., 2011: Initial Calibration of the *Atmospheric Imaging Assembly* (AIA) on the *Solar Dynamics Observatory* (SDO), *Solar Physics*, 275: 41-66.
- Burke, B. F., Graham-Smith, F., 2010: An Introduction to Radio Astronomy, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 444p.
- Golub, L., Pasachoff, J. M., 2010: The Solar Corona Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 390p.
- Grevesse, N., Sauval, A. J., 2005: Solar abundances. In: Murdin, P., *Encyclopedia of Astronomy & Astrophysics*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, pp. 1-4.
- Hanslmeier, A., Messerotti, M., 1999: Motions in the Solar Atmosphere, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 278 p.
- Huang, J., Tan, B., 2012: Microwave burst with fine structures in the decay phase of a solar flare, *The Astrophysical Journal*, 745: 186-195.
- Chen, B., Bastian, T. S., Gary, D. E., Jing, J., 2011: Spatially and spectrally resolved observations of a zebra pattern in a solar decimetric radio burst, *The Astrophysical Journal*, 736: 64-78.
- Jiříčka, K., Karlický, M., 2008: Narrowband pulsating decimeter structure observed by the new Ondřejov solar radio spectrograph, *Solar Physics*, 253: 95-101.
- Jiříčka, K., Karlický, M., Kepka, O., Tlamicha, A., 1993: Fast drift burst observations with the new Ondřejov radiospectrograph, *Solar Physics*, 147: 203-206.

- Jiříčka, K., Karlický, M., Mészáros, H., Snížek, V., 2001: Global statistics of 0.8-2.0 GHz radio bursts and fine structures observed during 1992-2000 by the Ondřejov radiospectrograph, *Astronomy & Astrophysics*, 375: 243-250.
- Karlický, M. 2013: Radio continua modulated by waves: Zebra patterns in solar and pulsar radio spectra?, *Astronomy & Astrophysics*, 552: id. A90, 6 pp.
- Kuznetsov, A. A., 2005: Generation of microwave bursts with zebra pattern by nonlinear interaction of Bernstein modes, *Astronomy & Astrophysics*, 438: 341-348.
- LaBelle, J., Treumann, R. A., Yoon, P. H., Karlický, M., 2003: A Model of Zebra Emission in Solar Type IV Radio Bursts, *The Astrophysical Journal*, 593: 1195-1207.
- Lemen, J. R., Title, A. M., Atkin, D. J., Boerner, P. F., Chou, C., Drake, J. F., Duncan, D. W., Edwards, Ch. G., Friedlaender, F. M., Heyman, G. F., Hurlburt, N. E., Katz, N. L., Kushner, G. D., Levay, M., Lindgren, R. W., Mathur, D. P., McFeaters, E. L., Mitchell, S., Rehse, R. A., Schrijver, C. J., Springer, L. A., Stern, R. A., Tarbell, T. D., Wuelser, J.-P., Wolfson, C. J., Yanari, C., Bookbinder, J. A., Cheimets, P. N., Caldwell, D., Deluca, E. E., Gates, R., Golub, L., Park, S., Podgorski, W. A., Bush, R. I., Scerrer, P. H., Gumm, M. A., Smith, P., Auken, G., Jerram, P., Pool, P., Soufli, R., Windt, D. L., Beardsley, S., Clapp, M., Lang, J., Waltman, N., 2011: The *Atmospheric Imaging Assembly (AIA)* on the *Solar Dynamics Observatory (SDO)*, *Solar Physics*, 275: 17-40.
- Li, T., Zhang, J., Yang, S., Liu, W., 2012: SDO/AIA observations of secondary waves generated by interaction of the 2011 June 7 global EUV wave with solar coronal structures, *The Astrophysical Journal*, 746: id. 13, 9 pp.
- Liu, W., Ofman, L., Nitta, N. v., Aschwanden, M. J., Schrijver, C. J., Title, A. M., Tarbell, T. D., 2012: Quasi-periodic fast-mode wave trains within a global EUV wave and sequential transverse oscillations detected by SDO/AIA, *The Astrophysical Journal*, 753: id. 52, 17 pp.
- Liu, W., Title, A. M., Zhao, J., Ofman, L., Schrijver, C. J., Aschwanden, M. J., de Pontieu, B., Tarbell, T. D., 2011: Direct imaging of quasi-periodic fast propagating waves of 2000 km s^{-1} in the low solar corona by the Solar Dynamics Observatory

- Atmospheric Imaging Assembly, *The Astrophysical Journal Letters*, 736: id. L13, 6 pp.
- Mullan, D. J., 2010: *Physics of the Sun: A First Course*, Taylor and Francis Group, LLC, Boca Raton, USA, 390 p.
- Pesnell, W. D, Thomson, B. J., Chamberlin, P. C., 2011: *The Solar Dynamics Observatory (SDO)*, *Solar Physics*, 275: 3-15.
- Schmelz, J. T., Reames, D. V., von Steiger, R., Basu, S., 2012: *Composition of the solar corona, solar wind, and solar energetic particles*, *The Astrophysical Journal*, 755: id. 33, 7pp.
- Šebelík, V., 2013: *Zpracování družicových dat z SDO*. Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic, 46 p.
- Selhorst, C. L., Silva, A. V. R., Costa, J. E. R., 2005: *Solar atmospheric model with spicules applied to radio observation*, *Astronomy & Astrophysics*, 433: 365-374.
- Su, J. T., Shen, Y. D., Liu, Y., Liu, Y., Mao, X. J., 2012: *Imaging observations of quasi-periodic pulsations in solar flare loops with SDO/AIA*, *The Astrophysical Journal*, 755: id. 113, 11 pp.
- Tan, B., Tan, Ch., Zhang, Y., Mészáros, H., Karlický, M., 2013: *Statistics and classification of the microwave zebra patterns associated with solar flares*, *The Astrophysical Journal*, 780: id. 129, 9pp.
- Vernazza, J. E., Avrett, E. H., Loeser, R., 1981: *Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet Sun*, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 45: 635-725.
- Zheleznyakov, V. V., Zlotnik, E. Ya., 1975: *Cyclotron Wave Instability in the Corona and Origin of Solar Radio Emission with Fine Structure III. Origin of Zebra-Pattern*, *Solar Physics*, 44: 461-470.
- Zlotnik, E. Ya., 2009: *Origin of Zebra Pattern in Type IV Solar Radio Emission*, *Central European Astrophysical Bulletin*, 33: 281-298.

8 Internetové zdroje

NOAA 2015: Solar flares – GOES. Dostupné z: <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/space-weather/solar-data/solar-features/solar-flares/x-rays/goes/> (citováno březem 2015).

Wikipedia 2015: Atmospheric electromagnetic opacity. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_electromagnetic_opacity.svg (citováno březem 2015).

Coyote's Guide to IDL Programming 2013: Filtering Images in the Frequency Domain. Dostupné z http://www.idlcoyote.com/ip_tips/freqfiltering.html (citováno duben 2015).

Seznam obrázků

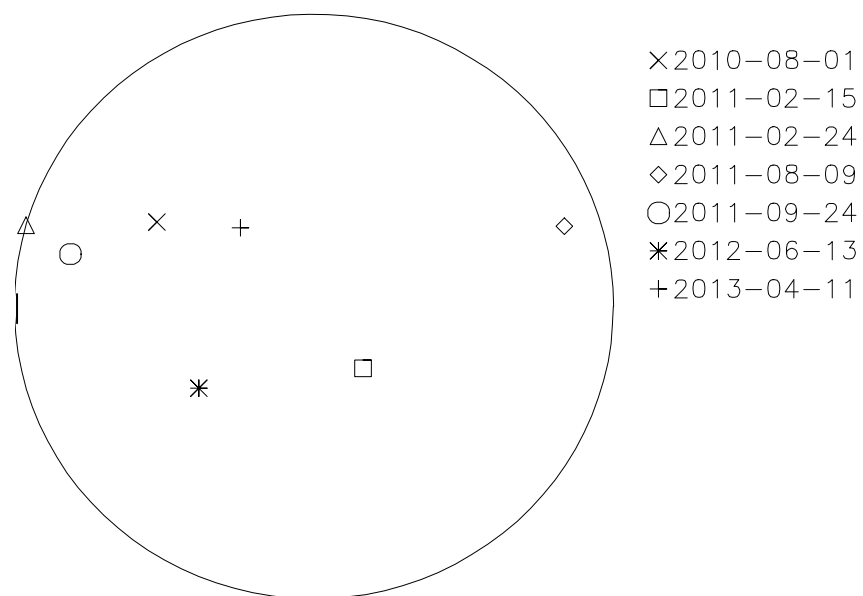
Obr. 1: Propustnost zemské atmosféry v závislosti na vlnové délce.....	3
Obr. 2: Objemová hustota částic v koróně určená Baumbach-Allenovým vzorcem.....	5
Obr. 3: Graf průběhu teploty a hustoty sluneční atmosféry	6
Obr. 4: Graf závislosti plazma- β parametru na výšce pro dvě hodnoty indukce magnetického pole 100 G a 2500 G	7
Obr. 5: Zastoupení jednotlivých prvků ve sluneční koróně.	8
Obr. 6: Sluneční rádiový spektrograf RT5 v Ondřejově.	9
Obr. 7: Příklady struktur pozorovaných slunečním rádiovým spektrografem RT5	10
Obr. 8: Struktura typu zebra ze dne 10. srpna 2010.	11
Obr. 9: Funkce teplotní odezvy pro přístroj AIA/SDO v závislosti na teplotě	13
Obr. 10: Úvodní panel programu RT5_setup.pro.	17
Obr. 11: Příklad <i>space-time</i> diagramu.....	23
Obr. 12: Schematické znázornění tvorby <i>running difference</i> a jeho úpravy pomocí Fourierova filtru.....	24
Obr. 13: Porovnání počtu událostí zaznamenaných pomocí RT5 a sluneční aktivity podle Wolfova čísla.....	26
Obr. 14: Detail průběhu rentgenového záření při erupci a rentgenový tok v delším období u zebry z 1. srpna 2010.....	27
Obr. 15: Spektrogram struktury typu zebra pozorované 1. srpna 2010 přístrojem RT5	28
Obr. 16: Naznačení výřezu okolí erupce a upravené snímky ve dvou různých časech u zebry z 1. srpna 2010.....	28
Obr. 17: <i>Space-time</i> diagram pro zebry ze dne 1. srpna 2010.....	28
Obr. 18: Detail průběhu rentgenového záření při erupci a rentgenový tok v delším období u zebry z 15. února 2011	29
Obr. 19: Naznačení výřezu okolí erupce a upravené snímky ve dvou různých časech u zebry z 15. února 2011	29
Obr. 20: <i>Space-time</i> diagram pro zebry ze dne 15. února 2011	30
Obr. 21: Detail průběhu rentgenového záření při erupci a rentgenový tok v delším období u zebry z 24. února 2011	30
Obr. 22: Naznačení výřezu okolí erupce a upravené snímky ve dvou různých časech u zebry z 24. února 2011	31
Obr. 23: <i>Space-time</i> diagram pro zebry ze dne 24. února 2011	31
Obr. 24: Detail průběhu rentgenového záření při erupci a rentgenový tok v delším období u zebry z 9. srpna 2011	32
Obr. 25: Naznačení výřezu okolí erupce a upravené snímky ve dvou různých časech u zebry z 9. srpna 2011.....	32
Obr. 26: <i>Space-time</i> diagram pro zebry ze dne 9. srpna 2011.....	33
Obr. 27: Detail průběhu rentgenového záření při erupci a rentgenový tok v delším období u zebry z 24. září 2011.....	33
Obr. 28: Část spektrogramu struktury typu zebra pozorované 24. září 2011 přístrojem RT5.	34

Obr. 29: Naznačení výřezu okolí erupce a upravené snímky ve dvou různých časech u zebry z 24. září 2011	34
Obr. 30: Detail průběhu rentgenového záření při erupci a rentgenový tok v delším období u zebry z 13. června 2012.....	35
Obr. 31: Část spektrogramu se strukturou typu zebra pozorované 13. června 2012 přístrojem RT5	35
Obr. 32: Naznačení výřezu okolí erupce a upravené snímky ve dvou různých časech u zebry z 13. června 2012.....	36
Obr. 33: Detail průběhu rentgenového záření při erupci a rentgenový tok v delším období u zebry z 11. dubna 2013.....	36
Obr. 34: Část spektrogramu se strukturou typu zebra pozorované 11. dubna 2013 přístrojem RT5	36
Obr. 35: Naznačení výřezu okolí erupce a upravené snímky ve dvou různých časech u zebry z 11. dubna 2013.....	37
Obr. 36: <i>Space-time</i> diagram pro zebra ze dne 11. dubna 2013.....	37
Obr. 37: Schematické zobrazení poloh slunečních erupcí vztahujících se ke studovaným zebraám	49
Obr. 38: Úvodní panel programu RT5_setup.pro s načtenými daty.....	50
Obr. 39: Zobrazení zmenšeného spektrogramu s možností výběru určité oblasti pomocí kurzoru, nebo zadáním krajních časů a frekvencí a s možností zvýšení kontrastu snímku ...	50
Obr. 40: Výběr dané oblasti ze spektrogramu	51
Obr. 41: Zvětšení dané oblasti spektrogramu s různými možnostmi dalšího zpracování	51
Obr. 42: Zobrazení frekvenčního profilu s možností uložení dat.....	52

Seznam tabulek

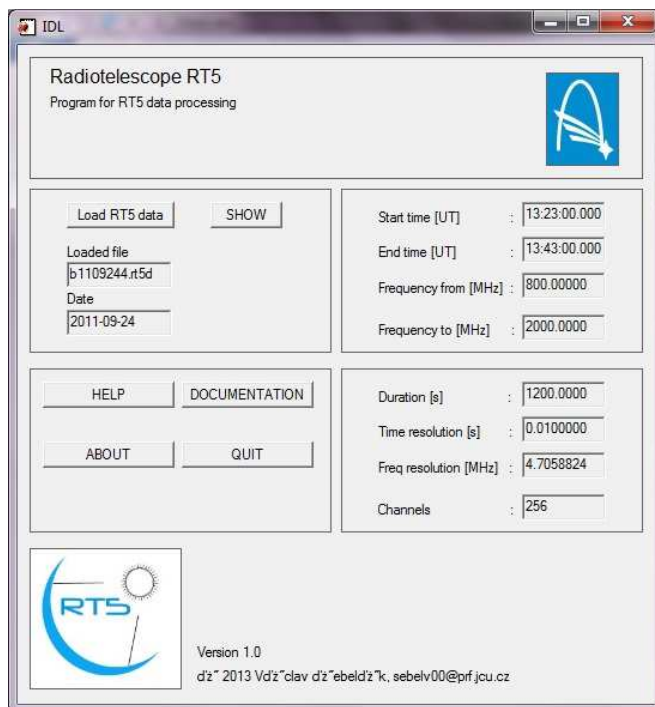
Tab. 1: Některé charakteristiky jednotlivých vlnových délek snímaných AIA/SDO	13
Tab. 2: Označení rádiového spektrografu.....	18
Tab. 3: Rozdělení zeber podle fáze erupce, ve které se nacházely.....	19
Tab. 4: Parametry v hlavičce souborů .fit, které byly využity při zpracování dat.....	21
Tab. 5: Minimální a maximální doby expozic snímků při jednotlivých událostech.	22
Tab. 6: Výskyty různých typů rádiových vzplanutí mezi lety 2007 a 2013.....	26
Tab. 7: Průměrné frekvence čar a jejich frekvenční vzdálenosti zebry z 1. srpna 2010.	27
Tab. 8: Průměrné frekvence čar a jejich frekvenční vzdálenosti zebry z 24. února 2011.....	31
Tab. 9: Průměrné frekvence čar a jejich frekvenční vzdálenosti zebry z 24. září 2011.....	34
Tab. 10: Průměrné frekvence čar a jejich frekvenční vzdálenosti zebry z 13. června 2012. .	35
Tab. 11: Průměrné frekvence čar a jejich frekvenční vzdálenosti zebry z 11. dubna 2013. ..	37

Příloha 1

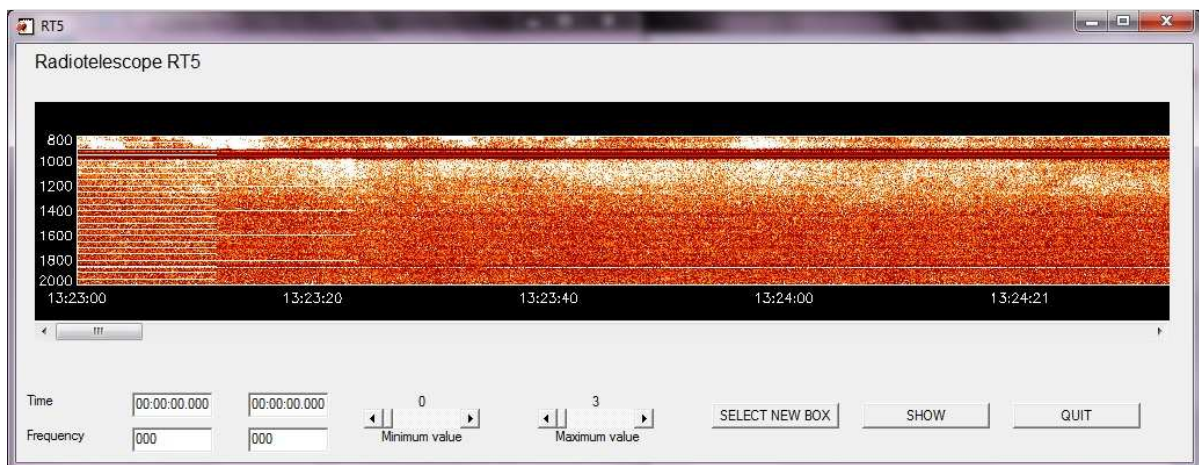


Obr. 37: Schematické zobrazení poloh slunečních erupcí vztahujících se ke studovaným zembrám.

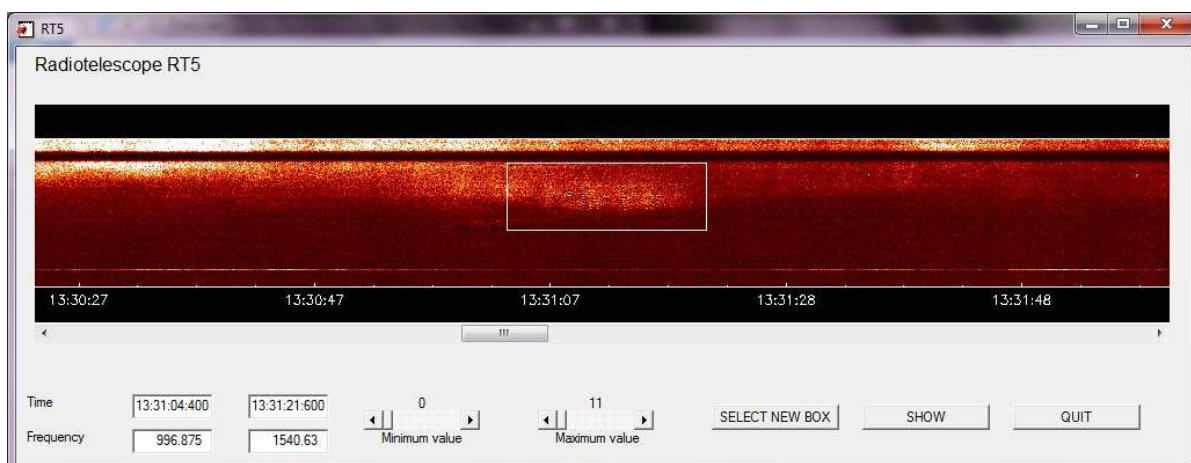
Příloha 2



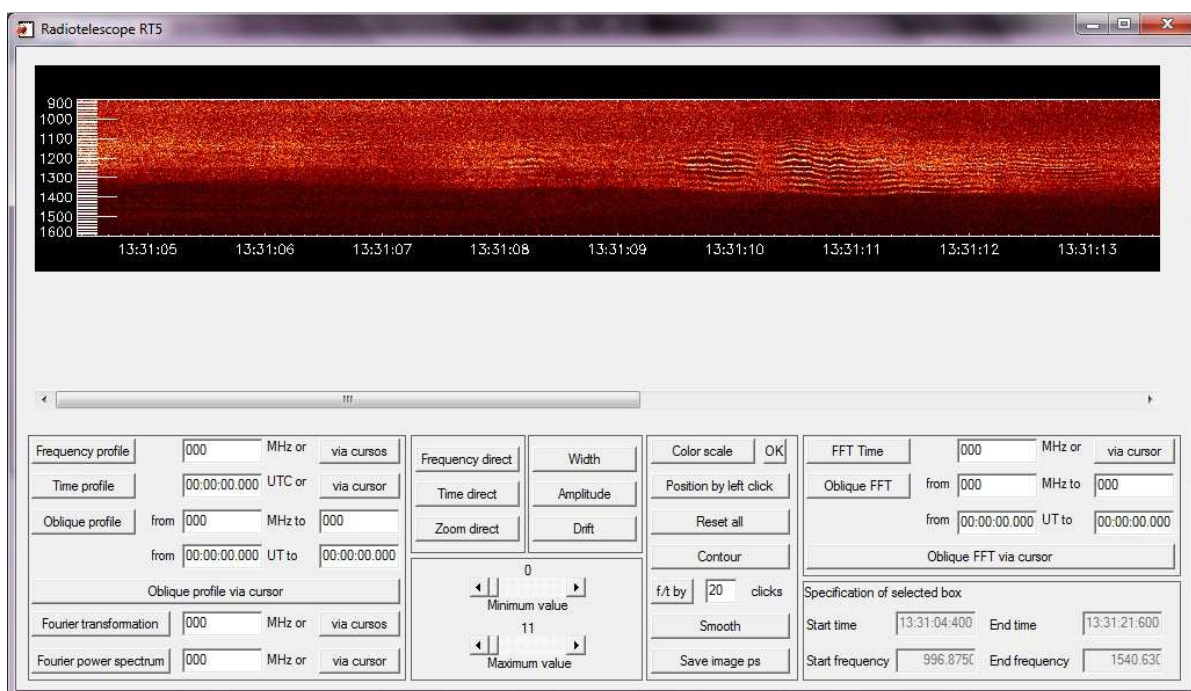
Obr. 38: Úvodní panel programu RT5_setup.pro s načtenými daty.



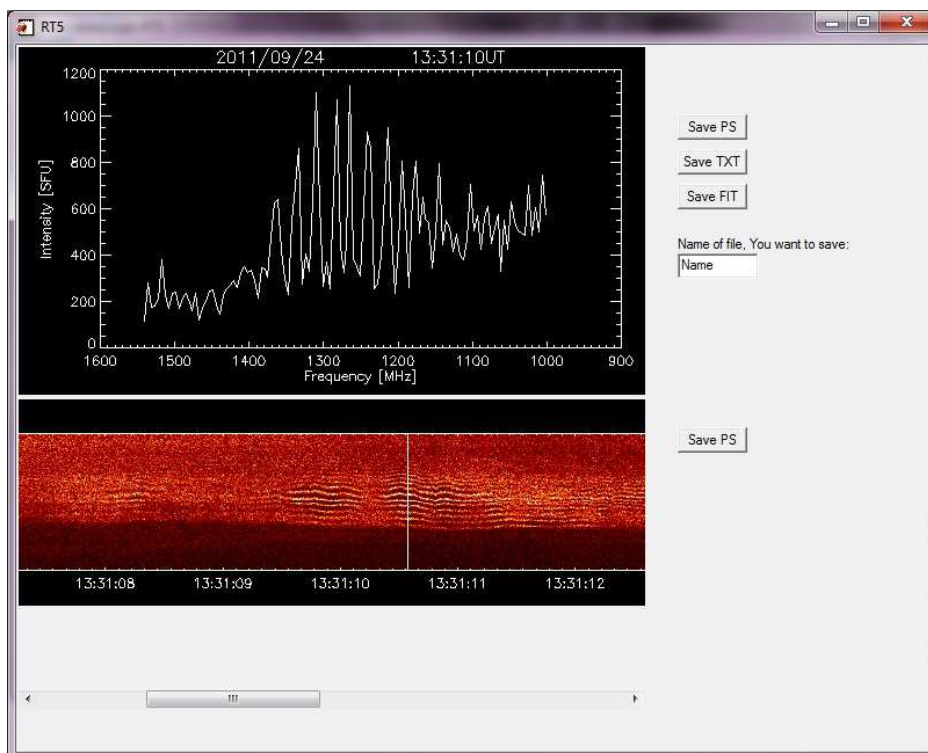
Obr. 39: Zobrazení zmenšeného spektrogramu s možností výběru určité oblasti pomocí kurzoru, nebo zadáním krajních časů a frekvencí a s možností zvýšení kontrastu snímku.



Obr. 40: Výběr dané oblasti ze spektrogramu.



Obr. 41: Zvětšení dané oblasti spektrogramu s různými možnostmi dalšího zpracování.



Obr. 42: Zobrazení frekvenčního profilu s možností uložení dat.