

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Vratislav Krupař

Analýza emisí typu "Iví řev" měřených na umělých družicích

Katedra elektroniky a vakuové fyziky

Vedoucí bakalářské práce: *Doc. RNDr. Ondřej Santolík, Dr.*

Studijní program: *Obecná fyzika*

Poděkování

Chtěl bych zejména poděkovat Doc. RNDr. Ondřejovi Santolíkovi, Dr. za jeho trpělivost a obětavost při vedení mé práce. Dále nemohu opomenout výborný seminář vedený Prof. RNDr. Janou Šafránkovou, DrSc. a RNDr. Janem Wildem, CSc., který byl pro mne velmi inspirativní. V neposlední řadě bych poděkoval všem zaměstnancům a studentům Katedry elektroniky a vakuové fyziky, kteří tvoří výborný kolektiv.

Jsem velmi vděčný svým rodičům za celkovou podporu a skvělé zázemí, jež mi poskytli nejen během celého mého studia.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce.

V Praze dne

Vratislav Krupař

Obsah

1.	Úvod	5
1.1	Motivace	5
1.2	Heliosféra	5
1.3	Rázová vlna	6
1.4	Magnetosféra	7
1.5	Magnetopauza	7
1.6	Magnetoobálka	8
1.7	Vlny ve studeném plazmatu	8
2.	Současný stav problematiky	11
2.1.	Lví řev	11
2.2.	Frekvence	11
2.3.	Polarizace	13
2.4.	Intenzita lvích řevů	15
2.5.	Mechanismy generace lvích řevů	18
3.	Cíle práce	19
4.	Družice Cluster	20
4.1.1.	Základní vlastnosti družic Cluster	20
4.1.2.	Vypuštění družic Cluster	21
4.1.3.	Palubní přístroje	21
4.2.1.	STAFF	22
4.2.2.	STAFF-SC	23
4.2.3.	STAFF-SA	23
4.2.4.	WBD	24
5.	Programové vybavení použité v práci	25
5.1.	IDL	25
5.2.	Prasadco	25
5.3.	wbd2psd	25
6.	Vlastní výsledky	26
6.1.	Analýza dat z WBD	26
6.2.	Analýza dat z STAFF-SA	27

7. Závěr	32
Poznámky	33
Literatura	34

Název práce: *Analýza emisí typu "lví řev" měřených na umělých družicích*

Autor: *Vratislav Krupař*

Katedra: *Katedra elektroniky a vakuové fyziky*

Vedoucí bakalářské práce: *Doc. RNDr. Ondřej Santolík, Dr.*

e-mail vedoucího: *ondrej.santolik@mff.cuni.cz*

Abstrakt: *Práce obsahuje stručný úvod do problematiky vztahů Slunce- Země a přehled současných poznatků o typických frekvencích, polarizaci, intenzitě a mechanismu generace emisí typu „lví řev“. Práce dále popisuje základní parametry družic projektu Cluster II. Podrobněji rozebrané jsou vlnové přístroje STAFF-SA a WBD. Dále charakterizuje používané programové vybavení určené k interpretaci dat z družic projektu Cluster II (vývojové prostředí IDL, analyzátor spektrálních matic Prasadco a konvertor datových formátů wbd2psd). Původní výsledky založené na analýze jednotlivých případů vlnových emisí typu lví řev získaných z dat přístrojů STAFF-SA a WBD ukazují, že vlnové emise typu lví řev jsou téměř pravotočivě kruhově polarizované a šíří se ve studovaném případě antiparalelně vzhledem k magnetické siločáře.*

Klíčová slova: *Kosmická fyzika, vlny v plazmatu, magnetoobálka*

Title: *Analysis of lion roar emissions measured on spacecraft*

Author: *Vratislav Krupař*

Department: *Department of Electronics and Vacuum Physics*

Supervisor: *Doc. RNDr. Ondřej Santolík, Dr.*

Supervisor's e-mail address: *ondrej.santolik@mff.cuni.cz*

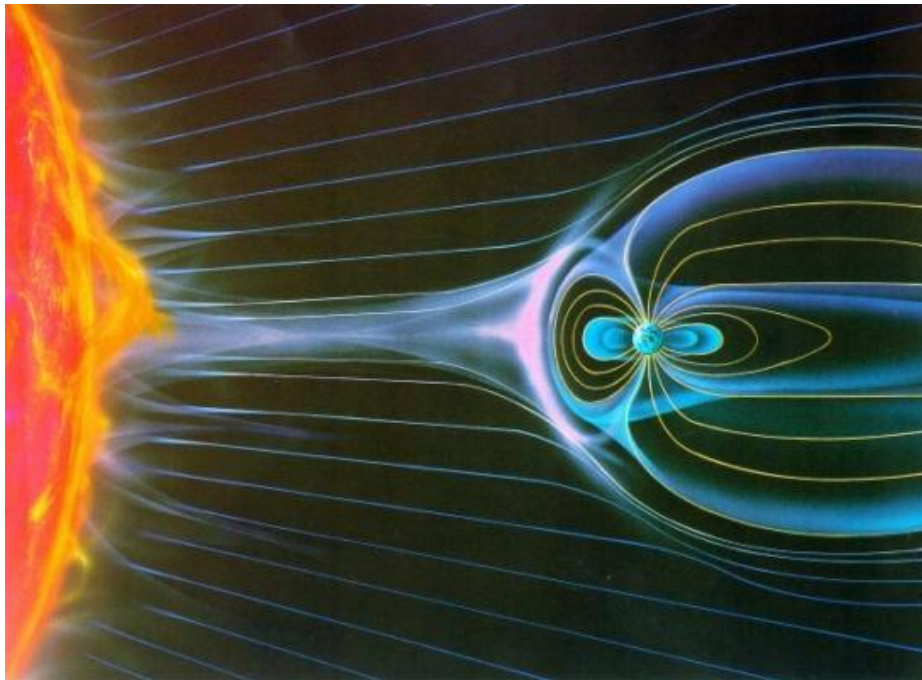
Abstract: *The thesis includes a brief introduction to the Sun-Earth relations and an overview of current knowledge on the „lion roar“ wave emissions. The parameters of the Cluster spacecraft are given, with a special attention to the onboard wave instruments. The software used for the interpretation of data of the Cluster project is described. Original results are based on analysis of separate cases of the „lion roar“ wave emissions as obtained from the wave data of the STAFF-SA and WBD instruments. We show that the „lion roar“ wave emissions are, as we expect, almost circularly polarized in the right-hand sense, and that, in the analyzed case, they propagate in the anti-parallel direction with respect to the ambient magnetic field.*

Keywords: *Space physics, waves in plasmas, magnetosheath*

1. Úvod

1.1 Motivace

Vztah Slunce–Země lidi od pradávna fascinoval. Nejbližší hvězda vytvořila základní podmínky pro vznik a udržení života na Zemi. Ze začátku lidem nebyly jasné principy, co okolo čeho obíhá, avšak ani dnes ve 21. století, při využití současných technologií, nejsme s to tvrdit, že plně chápeme mechanismy, jakými nás Slunce ovlivňuje. Mechanickými vlastnostmi soužití Země a Slunce si jsme téměř ve všem jisti, nicméně když začneme studovat třeba vlivy elektromagnetické, narážíme na různé „podivnosti“. Jednou z mnoha zvláštností v magnetosféře Země jsou vlnové emise typu lví řev, jimž je věnována tato práce.

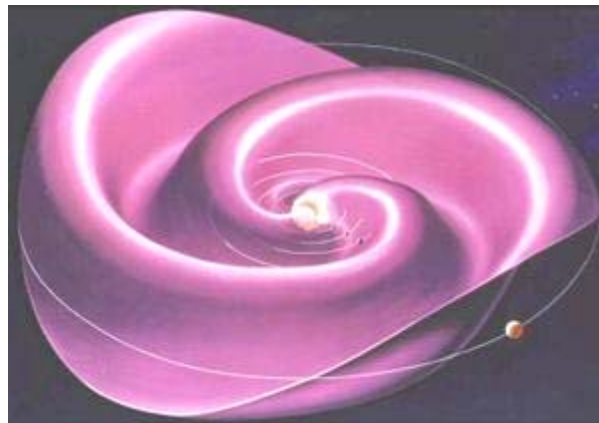


Obrázek 1.1: Přibližně dipólové magnetické pole Země zdeformované slunečním větrem. [převzato z <http://sci.esa.int/cluster/>]

1.2 Heliosféra

Rozhodnutím valného shromáždění IAU (The International Astronomical Union) z roku 1997 byl výkon nominálního Slunce definován hodnotou $3,846 \cdot 10^{26}$ W. Jde hlavně o světelný výkon, avšak Slunce emituje kromě fotonů částice (tzv. sluneční vítr), které ovlivňují vše ve sluneční soustavě (obr.1.1). Hranice jejich vlivu vymezuje heliosféru. První teorie slunečního větru vznikly z potřeby vysvětlit směry chvostů pozorovaných komet. Johannes Kepler již v sedmnáctém století předpověděl,

že tyto chvosty jsou ovlivňovány tlakem slunečního záření. Biermann [1960] dospěl k názoru, že musí existovat úzký vztah mezi astrofyzikou a plazmovou fyzikou. Sluneční vítr (původně solárně korpuskulární plyn) silně ovlivňuje jak chvosty komet, tak magnetosféru Země. V koróně (horní vrstva atmosféry Slunce) má vše velmi vysokou teplotu. Tak jako se pára vypařuje z přehřátého hrnce, plazma se zde rozpíná a proudí směrem od Slunce. Pozdější satelitní měření tento model potvrdila. Identifikovala elektrony a protony (v malém množství i ionty helia a kyslíku) pohybující se prostorem rychlostí okolo $400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Jejich šíření skrze sluneční soustavu je zachyceno na obrázku 1.2. Parker [1958] popsal rotací zdeformovaný tvar magnetických siločar vybíhajících ze Slunce. Fialovou barvou jsou znázorněny tzv. Parkerovy spirály. Přestože sluneční vítr prokazatelně působí na magnetosféru Země (viz dále), nelze si jej představovat jako příliš hustý proud plynu. V blízkosti Země je hustota slunečního větru okolo 10 částic na cm^3 . Uvážíme-li lokální teplotu $T=10^5 \text{ K}$, tak po dosazení do rovnice ideálního plynu ($p=nkT$) dostaneme tlak v řádu 10^{-11} Pa . Na Zemi máme stále problém vyrobit a měřit takové ultra vysoké vakuum.



Obrázek 1.2: Parkerovy spirály okolo Slunce. [převzato z <http://en.wikipedia.com/>]

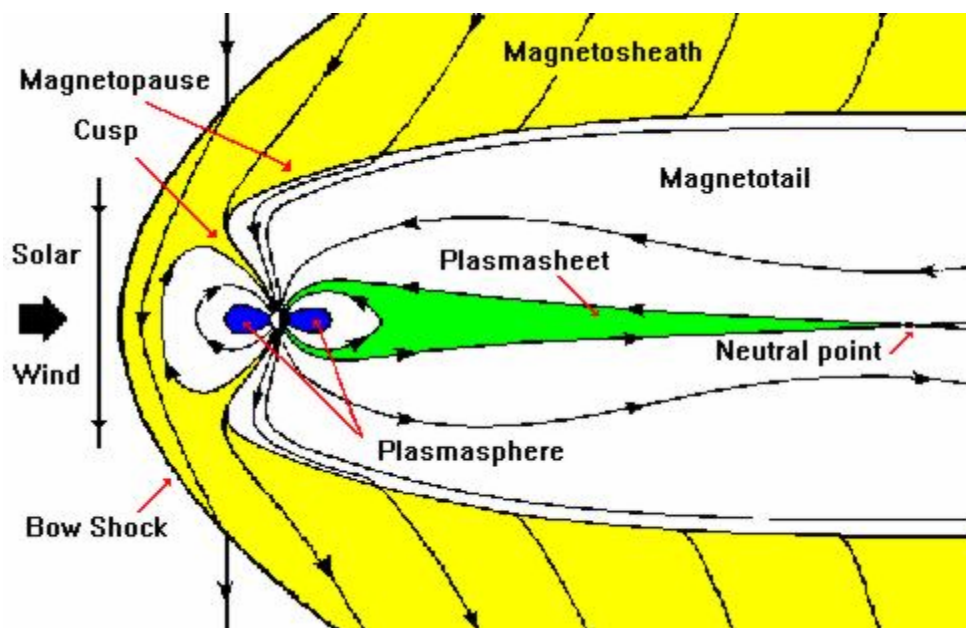
1.3 Rázová vlna

Rázová (nebo také příďová) vlna (angl.: bow shock) je obecně rozhraní, oddělující proudící tekutiny různých parametrů, vzniklé při nadzvukovém obtékání překážky. V našem případě se jedná o hranici mezi slunečním větrem a magnetoobálkou²⁾ (viz. 1.5 Magnetoobálka). Sluneční vítr se pohybuje před Zemí přibližně o řád rychleji než je lokální rychlost rychlých magnetozvukových vln. Na rázové vlně (viz 1.4 Magnetosféra), analogicky k rázové vlně objevující se před nadzvukovými letadly, se mění skokově parametry kosmické tekutiny. Na rozhraní

vzrůstá magnetický tlak, teplota, hustota a entropie na úkor poklesu rychlosti slunečního větru.

1.4 Magnetosféra

Země má v nízkých výškách relativně složitě magnetické pole. Geofyzici běžně používají pro jeho popis multipólový rozvoj do desátého řádu. Nicméně dále od Země se jeho magnetické pole chová přibližně jako dipólové. Magnetosférou nazýváme tu část kosmického prostoru, kde ještě převažuje vliv magnetického pole Země. Jak známo, magnetické pole působí jen na nabitě částice, proto se jeho vliv výrazněji projevuje od 100 km nad povrchem a výše. Zde krajní vrstvy atmosféry pohlcují RTG a ultrafialové záření z kosmického prostoru, které ionizuje vzduch. Ionty a elektrony se pohybují pod vlivem siločar magnetického pole Země. Struktura magnetických siločar rozhoduje jak o pohybu a chování přítomných iontů a elektronů, tak i o šíření různých druhů vln. Magnetosféra je deformována slunečním větrem, jak je patrné z obrázku 1.1.



Obrázek 1.3: Schéma magnetosféry okolo Země. [převzato z <http://helios.gsfc.nasa.gov/>]

1.5 Magnetopauza

Sféry vlivu slunečního větru a magnetického pole Země jsou poměrně dobře odděleny. Jejich hranice se nazývá magnetopauza. Sluneční vítr deformuje magnetické pole Země na denní straně do stlačeného tvaru, jenž na noční straně přechází v dlouhý chvost podobný těm, jaký mají komety. Čelo magnetopauzy je

vzdáleno od Země 10-11 R_E^1). Za délku chvostu lze považovat vzdálenost od Země, na které se sluneční vítr dostává opět do své rovnováhy. K tomu dochází na 100-200 R_E za Zemí [Kallenrode, 1998]. Poloha magnetopauzy závisí na aktuálních parametrech slunečního větru. Na obrázku 1.3 je dobře zřetelná oblast nad zemskými magnetickými póly, kde je slabší magnetické pole. Těmito děrami, jež jsou anglické literatuře nazývány „cusp“, mohou pronikat částice ze slunečního větru až do blízkosti Země.

1.6 Magnetoobálka²⁾

Magnetoobálka (magnetosheath) je oblast mezi rázovou vlnou (kde Sluneční vítr poprvé interaguje se Zemskou magnetosférou) a magnetopauzou (kde se vzájemně vyrušují vlivy tlaku magnetického pole Země a dynamického tlaku slunečního větru). Tato část magnetosféry Země je charakteristická poměrně silnými fluktuacemi přítomného plazmatu. Magnetoobálka ve chvostové oblasti na vzdálenostech desítek R_E od Země postupně splývá s okolním slunečním větrem.

1.7 Vlny ve studeném plazmatu

Když hledáme teorii šíření vln v kosmickém plazmatu můžeme použít různá přiblížení. Jedno ze základních je zanedbání tepelného pohybu plazmatu a srážek mezi jednotlivými částicemi – studené plazma. Neuvažujeme ani tlak samotného plazmatu ($p = nk(T_i + T_e)$), považujeme ho za zanedbatelný proti tlaku magnetického pole ($p_B = B^2/2\mu_0$). Předpokládáme konstantní velikost statického magnetického pole \mathbf{B}_0 a hustoty částic ρ_0 . Velikost poruchy \mathbf{B}_1 a ρ_1 považujeme za tak malou vůči rovnovážnému stavu, že v Taylorově rozvoji jdeme jen do prvního řádu.

Cyklotronní frekvence (1.7.1) udává úhlovou rychlost s jakou bude obíhat nabitá částice ve směru kolmém na magnetické siločáry. Závisí jen na velikosti magnetického pole, hmotnosti a náboje pohybující se částice. Tudíž je různá pro ionty a elektrony.

$$\omega_c = \frac{|q|B}{m} \quad (1.7.1)$$

Dalším ze základních parametrů plazmatu je jeho plazmová frekvence:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{m\epsilon_0}}, \quad (1.7.2)$$

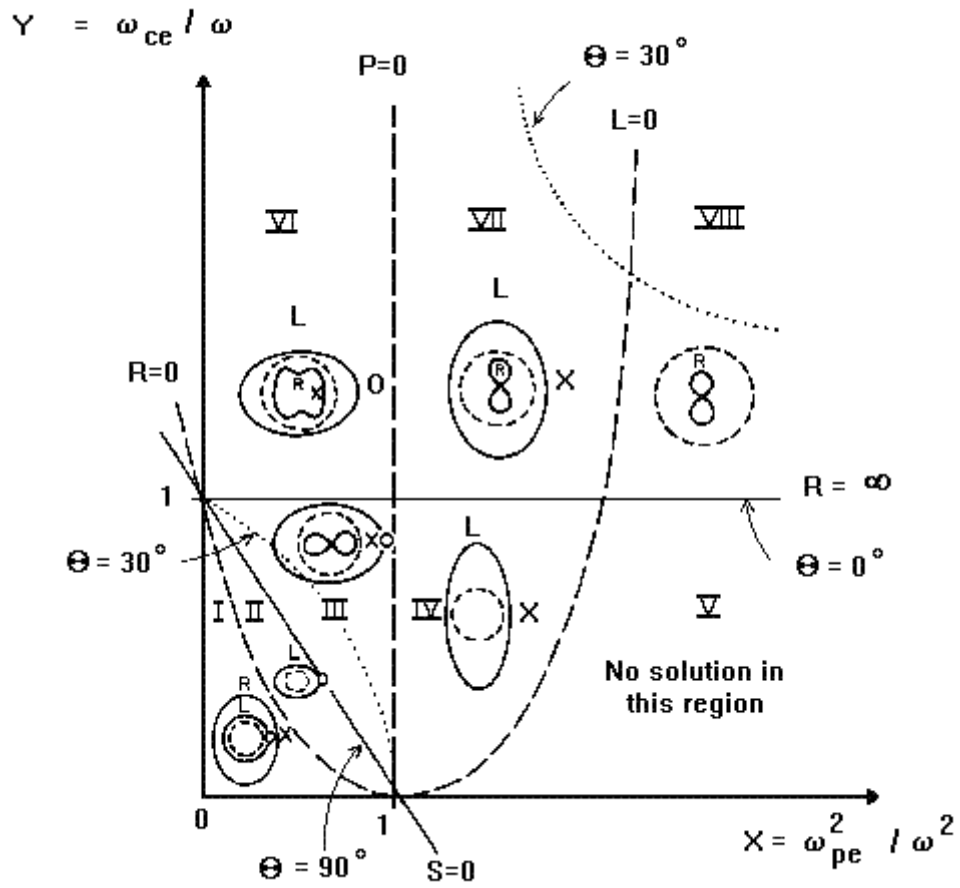
kde m je hmotnost částice a n je hustota. Při budování teorie šíření vln ve studeném plazmatu se vychází z Maxwellových rovnic a z pohybových rovnic pro jednotlivé druhy nabitých částic. Odtud plynou disperzní vztahy pro chování indexu lomu, který si zavedeme vektorově: $\mathbf{N} = \mathbf{k}c/\omega$, kde \mathbf{k} je vlnový vektor. Může docházet k rezonanci ($|\mathbf{N}| \rightarrow \infty$), nebo k ořezání ($|\mathbf{N}| \rightarrow 0$) a dostáváme maximálně dvě konečná nezáporná řešení disperzních vztahů pro $|\mathbf{N}|$, v závislosti na parametrech plazmatu a frekvenci a směru vlnového vektoru. Pro efektivní klasifikaci vln v přiblížení studeného plazmatu je výhodné užívat tzv. Stixovy koeficienty R , L , S , a P :

$$\begin{aligned}
 R &\equiv 1 - \sum_s \frac{\omega_{ps}^2}{\omega} \left(\frac{1}{\omega \pm \omega_{cs}} \right) \\
 L &\equiv 1 - \sum_s \frac{\omega_{ps}^2}{\omega} \left(\frac{1}{\omega \mp \omega_{cs}} \right) \\
 S &\equiv \frac{1}{2}(R + L) \quad D \equiv \frac{1}{2}(R - L) \\
 P &\equiv 1 - \sum_s \frac{\omega_{ps}^2}{\omega^2},
 \end{aligned} \tag{1.7.3}$$

kde sčítací index s běží přes všechny druhy vyskytnuvších se částic. U koeficientů R a L závisí znaménko ve jmenovateli na velikosti náboje (horní pro kladné částic, dolní pro záporné). Pomocí vztahu (1.7.4) mohu pak určit úhel mezi směrem fázové rychlosti vlny charakterizované vlnovým vektorem \mathbf{k} a okolním magnetickým polem.

$$\tan^2 \theta = - \frac{P(\mu^2 - R)(\mu^2 - L)}{(S\mu^2 - RL)(\mu^2 - P)}, \tag{1.7.4}$$

kde parametr μ je absolutní velikost vektorového indexu lomu $|\mathbf{N}|$. Velice názorný graf pro vlny ve studeném plazmatu s jedním druhem iontů je CMA (Clemmow-Mullaly-Allis) diagram (viz. obr. 1.4). Na škálu osy X (ω_{pe}^2/ω^2) lze nahlížet jako úměrnou hodnotě hustoty elektronů v plazmatu. Osa Y (ω_{ce}/ω) je úměrná velikosti magnetického pole. Prostor všech možných kombinací Stixových koeficientů R , L , S a P (viz. vztah 1.7.3), které jsou právě funkcemi ω_{pe} a ω_{ce} , je rozdělen na osm oblastí kde se mohou šířit vlny pouze určitých polarizací (kruhová/eliptická, R-pravotočivá/L-levotočivá) a módů (O-řádný/X-mimořádný). Jak se vlny šíří kosmickým prostorem a mění se lokálně velikost magnetického pole a hustoty plazmatu, mohou přecházet různé typy vln v jiné právě ve shodě s obr 1.4. Když se dostanou do regionu V, úplně vymizí.

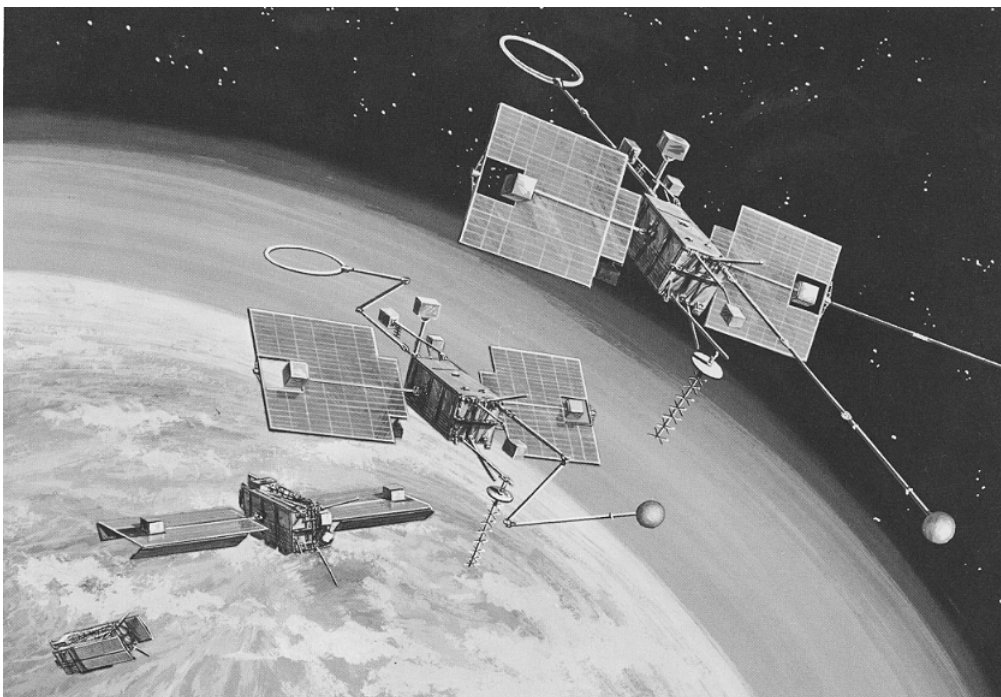


Obrázek 1.4: CMA (Clemmow-Mullaly-Allis) diagram. [převzato z <http://www.oulu.fi/>]

2. Současný stav problematiky

2.1 Lví řev

Termín „lví řev“ se poprvé ve fyzikálních časopisech objevil na konci šedesátých let. Smith et al. [1969] našli v datech z družic OGO 1,3,5 (Orbiting Geophysical Observatory, viz obrázek 2.1) impulzivní šum, který se objevoval sporadicky v magnetoobálce Země. V tradici badatelů na poli VLF (very low frequency) si pustili onen zvláštní signál přes zesilovač do reproduktorů a uslyšeli zvuk podobající se řevu lva. Toto slovní označení se mezi fyziky zabydlelo.



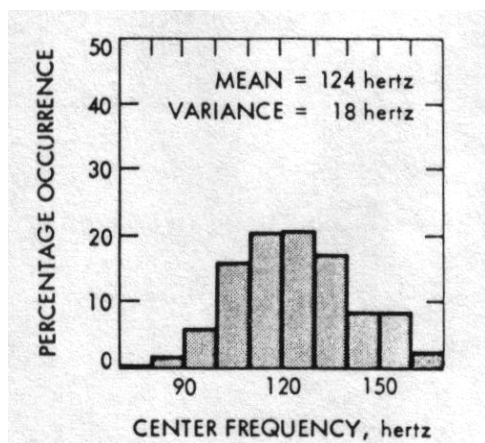
Obrázek 2.1: Družice OGO, která se rozbaluje na své oběžné dráze. [převzato z <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/>]

2.2 Frekvence

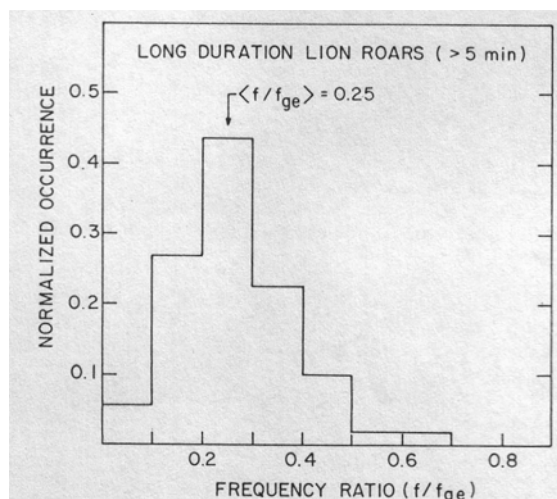
Smith et al. [1969] v první publikaci uvádějí, že frekvence lvích řevů se typicky pohybovala mezi 50 Hz a 200 Hz. Jako nejpravděpodobnější hodnotu našli 100 Hz, což odpovídalo přibližně polovině cyklotronové frekvence přítomných elektronů. O sedm let později Smith a Tsurutani [1976] dospěli k závěru že 90% všech lvích řevů má frekvenci 90 Hz až 160 Hz. Získané statistické rozdělení je na obr. 2.2.

Rodriguez [1985a] studoval v článku takzvané dlouhotrvající lví řevy. Z dat družice IMP 6 vybral emise vyznačující se trváním přes pět minut, na rozdíl od obvyklé délky trvání v řádu vteřin. Koreloval frekvenci sledovaných lvích řevů s okolní cyklotronovou frekvencí. Zjištěný poměr je přibližně čtvrtinový (viz. obr. 2.3).

Téhož roku se Rodriguez [1985b] zabýval obecně hvizdovými turbulencemi okolo Země. Sledoval při tom lví řevy s frekvencí 100 Hz až 300 Hz.



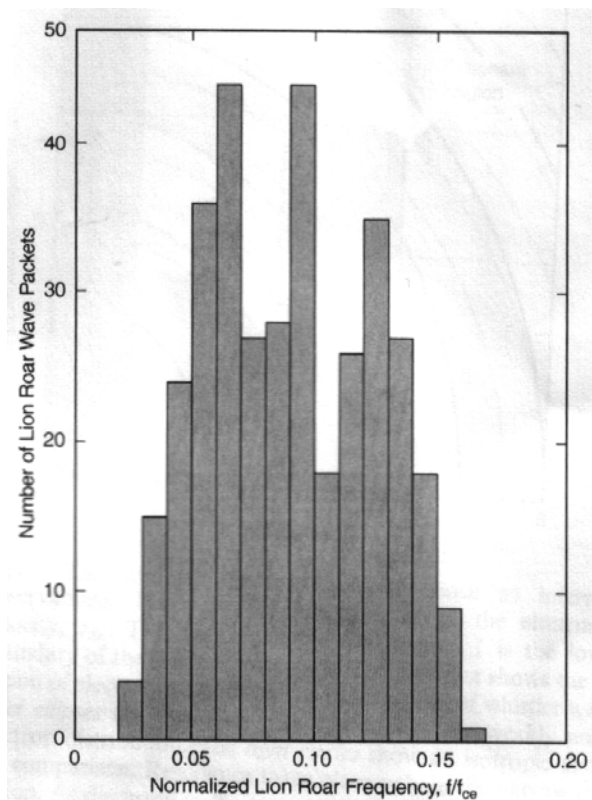
Obrázek 2.2: Frekvenční rozdělení lvích řevů [Smith et Tsurutani, 1976].



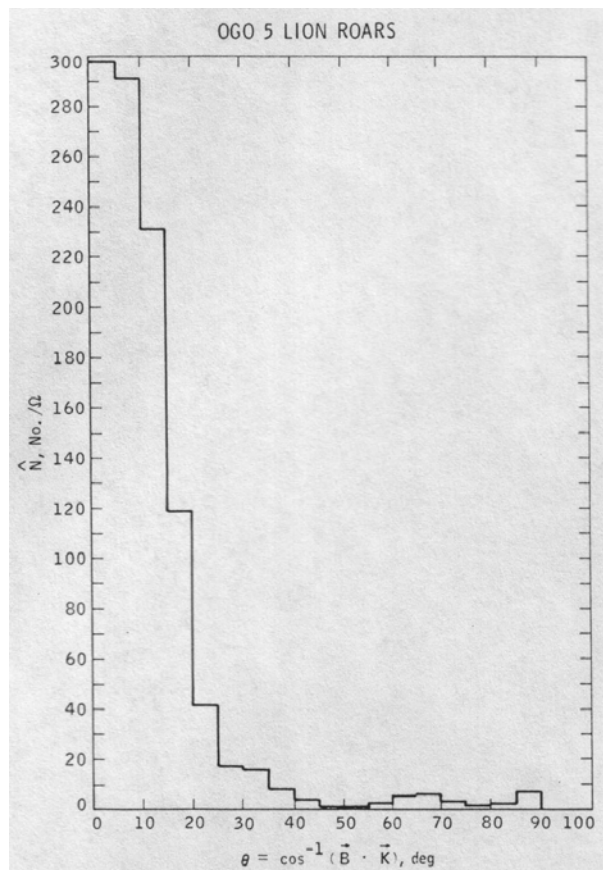
Obrázek 2.3: Frekvenční rozdělení dlouhotrvajících lvích řevů v poměru k cyklotronové frekvenci [Rodriguez, 1985b].

Při využití dat z družice Geotail Zhang et al. [1998] dospěli k závěru, že poměr frekvence lvích řevů ku frekvenci cyklotronové pokrývá interval od 0.02 až do 0.75, přičemž nejčastější hodnota byla 0.12.

Baumjohann et al. [1999] používali na družici Equator-S magnetometr nikoli pulzační ale „flux gate“ s časovým rozlišením 128 vektorů za vteřinu v normálním módu, 64 v duálním. Jejich výsledky se odlišují od ostatních článků v důsledku výběrového efektu způsobeného měřicí metodou. Nacházejí výrazně nižší frekvence než jejich kolegové. Výsledek zkoumání 356 nalezených lvích řevů je shrnut v obr. 2.4.



Obrázek 2.4: Frekvenční rozdělení lvích řevů v poměru k cyklotronové frekvenci [Baumjohann et al., 1999].



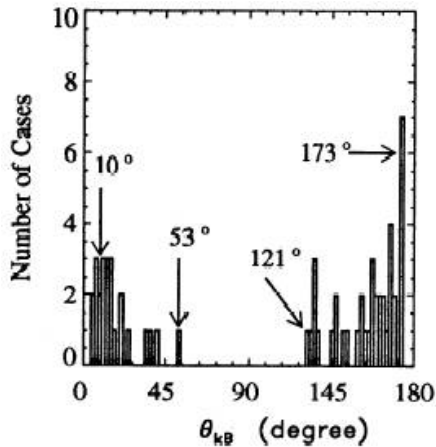
Obrázek 2.5: Závislost směru šíření lvích řevů na okolním magnetickém poli [Smith et al., 1976].

Maksimovic et al. [2001] měli už k dispozici data z družic Cluster. Zabývali se hlavně polarizací lvích řevů. Nicméně ze svých výsledků odhadli že typická frekvence leží mezi 40 Hz a 200 Hz.

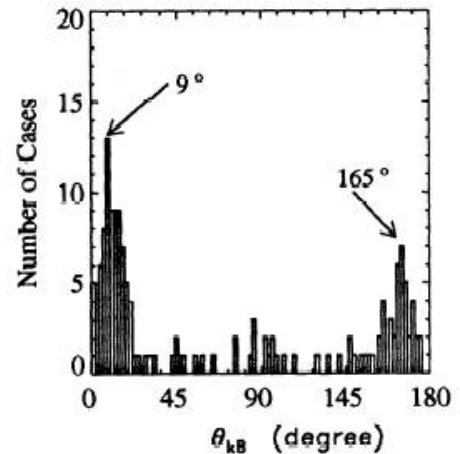
2.3 Polarizace

Již při objevení lvích řevů bylo Smithovi et al. [1969] jasné, že se jedná o vlny hvizdového módu (viz. obr. 1.7.1, region VIII R-vlny).

V další práci se Smith a Tsurutani [1976] se zajímají i o přesnější charakter polarizace. Zjistili že přes 75% pozorovaných lvích řevů svírá úhel vlnového vektoru k okolnímu magnetickému poli menší než 30° . Jedná se tudíž o elipticky polarizované vlnění, jež bývá často polarizováno i kruhově (pro úhel blízky nule), jak je vidno z obr. 2.5.

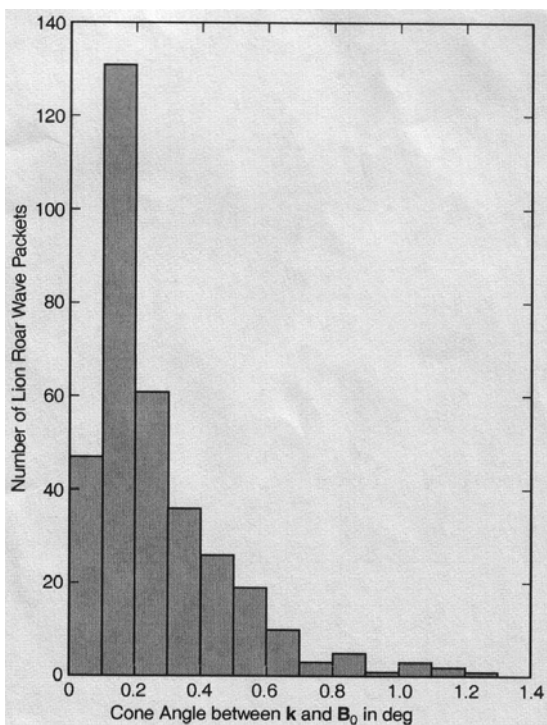


Obrázek 2.6: četnost lvích řevů typu A v závislosti na úhlu šíření [Zhang et al., 1998].

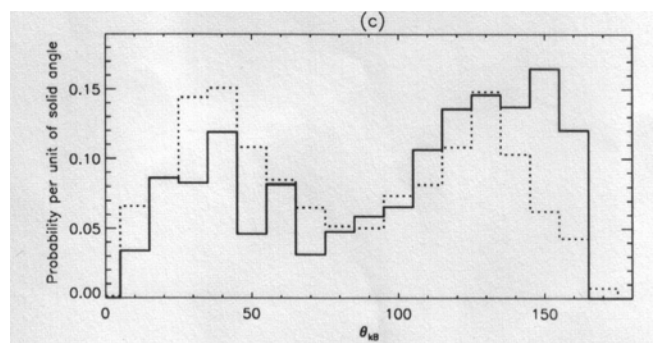


Obrázek 2.7: četnost lvích řevů typu A v závislosti na úhlu šíření [Zhang et al., 1998].

Zhang et al. [1998] prováděli statistiku s ohledem na to zda při vlnové emisi typu lví řev dochází (typ A), či nedochází (typ B) poklesu okolního magnetického pole. Jejich pozorování je shrnuto v obrázcích 2.6 a 2.7. Jako jedni z mála měli k dispozici i data z elektrických antén. Objevili vlny, jež mají směr šíření téměř antiparalelní s okolním magnetickým polem.



Obrázek 2.8: Závislost četnosti lvích řevů na úhlu šíření [Baumjohann et al., 1999].



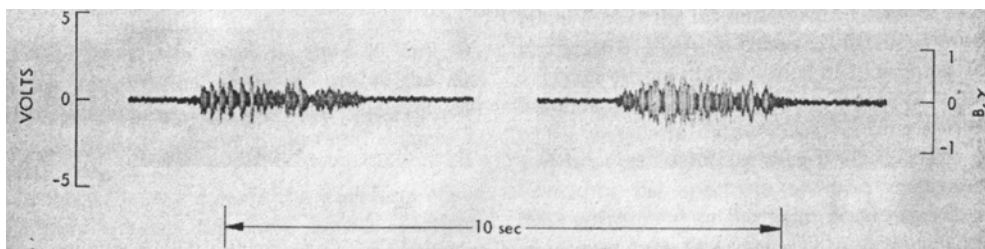
Obrázek 2.9: Závislost četnosti lvích řevů na úhlu šíření [Maksimovic et al., 2001].

Na téměř kruhově polarizované lví řevy narazili Baumjohann et al. [1999]. Jak jsem již zmiňoval výše, tak díky jiné měřicí metodě z Equatoru-S dostali poměrně odlišné výsledky od ostatních. Zkoumali totiž i jak se mění polarizace během samotných vlnových emisí. Výsledky jsou pro úhel vlnového vektoru k okolnímu magnetickému poli shrnuty v obr. 2.8, jenž ukazuje že vlnový vektor nebyl ve zmíněných případech od okolního magnetického pole odchýlen o více než ~ 1 stupeň.

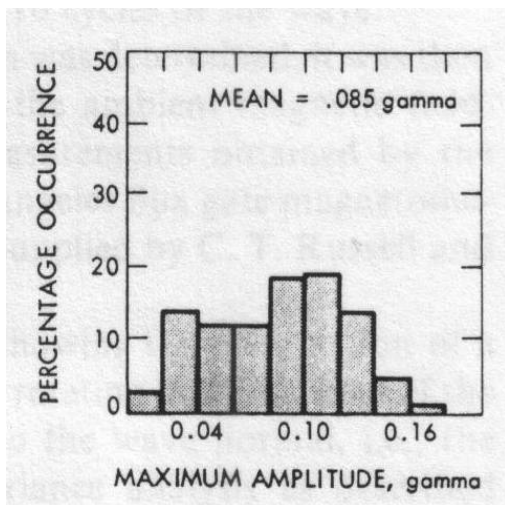
Maksimovic et al. [2001] také využili dobrého časového rozlišení a přítomnosti elektrických antén družic Cluster ke zkoumání dvou vybraných případů vlnových emisí typu lví řev. Histogram úhlu mezi vlnovým vektorem a okolním magnetickým polem jednoho z pozorovaných případů je zachycen na obr. 2.9 a ukazuje podstatně větší střední odchylky.

2.4 Intenzita lvích řevů

Již v počátcích Smith et al. [1969] konstatovali, že lví řevy jsou intenzivní vlnové emise. V oblastech s magnetickou indukcí 15 nT našli fluktuační amplitudou cca 0.4 nT a cca 1V, jak je vidět na obrázku 2.10.



Obrázek 2.10: časový vývoj amplitudy jednoho lvího řevu [Smith et al., 1969]

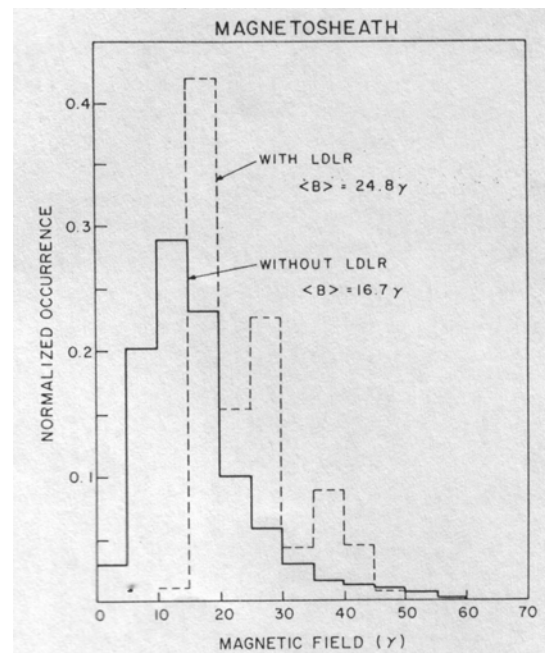


Obrázek 2.11: četnost lvích řevů typu A v závislosti na velikosti fluktuací magnetického pole [Smith et al., 1976].

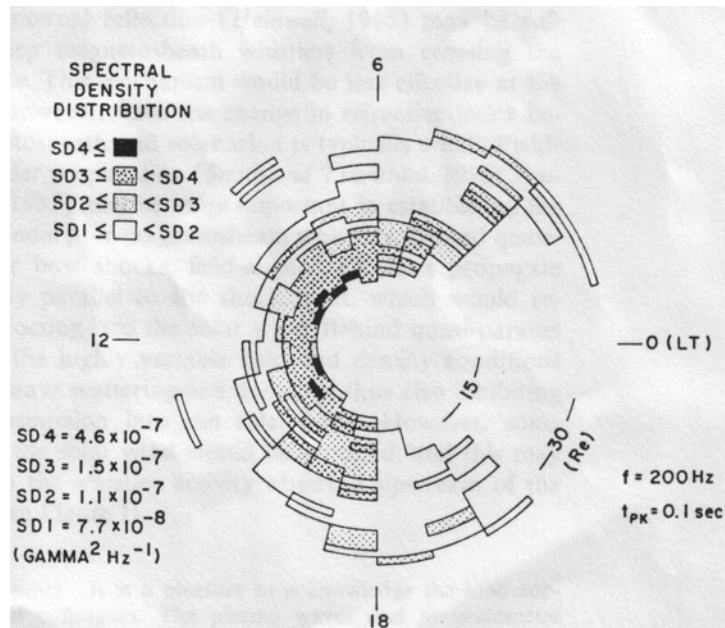
Smith a Tsurutani [1976] docházejí k odlišným výsledkům. Střední hodnota velikosti amplitudy je pouze 0.085 nT (viz. obr. 2.11).

Rodriguez [1985a], který se zabýval dlouhotrvajícími lvími řevy (LDLR), dospěl k závěru, že rozdíl velikosti okolního magnetického pole při a bez přítomnosti LDLR činí asi 8 nT (viz. obr. 2.12).

Nicméně ve své další práci [Rodriguez, 1985b] zkoumá přímo hustotu spektrálního výkonu v závislosti na místě výskytu. Dostal tak obr. 2.13, kde ukazuje, že maximální spektrální hustoty okolo $5 \cdot 10^{-7} \text{ nT}^2 \text{ Hz}^{-1}$ lze očekávat na denní straně v blízkosti magnetopauzy.

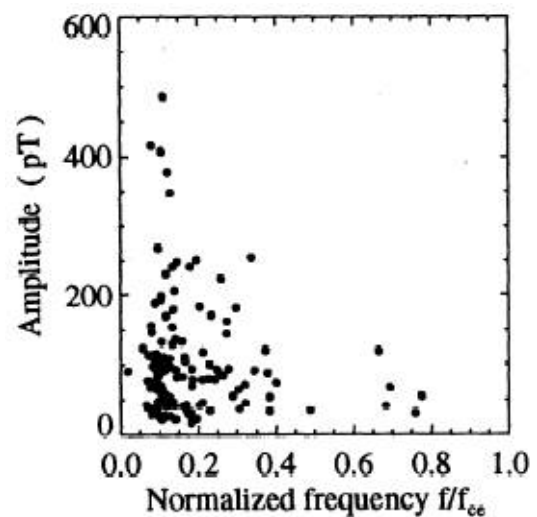
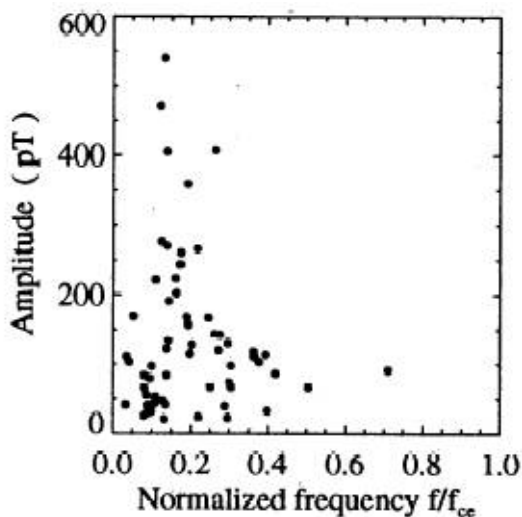


Obrázek 2.12: četnost lvích řevů LDRL v závislosti na velikosti okolního magnetického pole [Rodriguez, 1985a].



Obrázek 2.13: Rozložení hustoty spektrálního výkonu okolo Země [Rodriguez, 1985b].

Zhang et al. [1998] vztahovali v obrázcích 2.14 a 2.15 svá měření amplitud magnetického pole k normalizované frekvenci, při čemž obdrželi na nižších frekvencích větší amplitudy v rozmezí 0.01 až 0.5 nT. Typ A opět značí lví řevy doprovázené poklesem okolního magnetického pole na rozdíl od typu B.

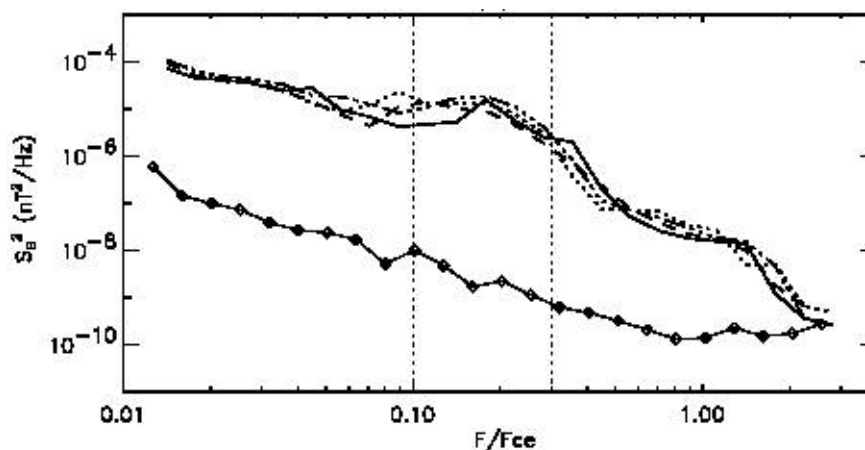


Obrázek 2.14: Velikost amplitudy lvích řevů typu A ku normalizované frekvenci [Zhang et al., 1998].

Obrázek 2.15: Velikost amplitudy lvích řevů typu B ku normalizované frekvenci [Zhang et al., 1998].

Baumjohann et al. [1999] shledali, že většina jimi pozorovaných lvích řevů má amplitudu v intervalu 0.2 až 1 nT.

Maksimovic et al. [2001] porovnávali hustotu spektrálního výkonu lvích řevů s úrovní šumu přístroje pro jeden lví řev viděný najednou čtyřmi družicemi Cluster v obr. 2.15 a dospěli k závěru, že pozorované hodnoty přes $10^{-5} \text{ nT}^2 \text{ Hz}^{-1}$ jsou asi o 4 řády vyšší, než je úroveň šumu přístroje.



Obrázek 2.16: Velikost hustoty spektrálního výkonu ku normalizované frekvenci [Maksimovic et al., 2001]. Čtyři horní křivky představují družice Cluster C1-C4. Spodní křivka nás informuje o citlivosti použitého magnetometru.

2.5 Mechanismy generace lvích řevů

V magnetoobálce se často vyskytují elektronové teplotní anizotropie [Fairfield, 1976]. Elektrony mají rozdílné rychlostní rozdělení ve složkách kolmých k magnetické siločáře a ve složce paralelní k magnetické siločáře. Míru této anizotropie určujeme funkcí elektronové anizotropie [viz. například Yearby et al., 2005]:

$$A_e = \frac{T_{\perp} - T_{\parallel}}{T_{\parallel}} \quad (2.5.1)$$

Podle Kennela a Petscheka [1966], pokud elektronová anizotropie přesáhne mez danou rovnicí (2.5.2), může dojít ke generaci vlnové emise, která odvádí energii z částic do vlnových emisí.

$$A_e > \frac{1}{(f_{ce}/f) - 1} \quad (2.5.2)$$

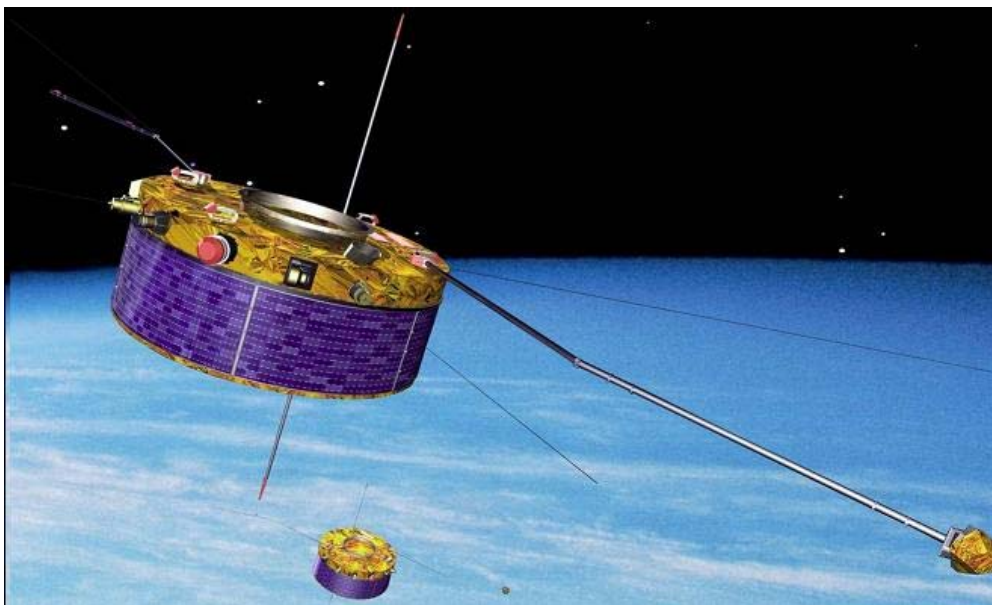
Poměr (f_{ce}/f) je podíl elektronové cyklotronové frekvence a frekvence generované vlny. Tomuto mechanismu bývá připisován původ vlnových emisí typu lví řev.

3. Cíle práce

Tato bakalářská práce si klade následující cíle:

1. Vyhledání měření vlnové emise typu „lví řev“ v záznamech družic Cluster, a to se zaměřením na data vlnových přístrojů STAFF-SA a WBD.
2. Nalezení vhodných případů pro další podrobné studium.
3. Určení směrů šíření nalezených emisí typu „lví řev“ a označení jejich pravděpodobných zdrojů.

4. Družice Cluster



Obrázek 4.1: Dvě družice Cluster. [převzato z <http://sci.esa.int/cluster/>]

4.1 Základní vlastnosti družic Cluster

Projekt Cluster II Evropské kosmické agentury se zaměřuje na podrobné zkoumání vztahu Země-Slunce. Jedná se o čtyři družice (označené po řadě Rumba, Salsa, Samba a Tango) jež svými výrazně excentrickými drahami obsáhnou jak blízký prostor okolo Země (poloměr orbity 19 000 km), tak zasahují i do slunečního větru (119 000 km). Díky podobnosti drah všech čtyř družic můžeme ze získaných dat určovat i směry šíření vln v plazmatu, potažmo identifikovat zdroje šířících se vzruchů. Základní technické parametry družice Cluster jsou shrnuty v tabulce 4.1:

Průměr	2.9 m
Výška	1.3 m
Hmotnost	1 200 kg
(z toho) pohonná jednotka	650 kg
(z toho) vědecké přístroje	71 kg
Výkon solárních článků	220 W
Perioda rotace	4 s
Perioda obletu	57 hodin
Životnost	5 let (prodloužená na 9 let)

Tabulka 4.1: Základní technické parametry

4.1.1 Vyuštění družic Cluster

Projekt odstartoval 16. července 2000 (viz obrázek 4.2) vypuštěním prvních dvou družic nosnou raketou Sojuz. Další dvě následovaly 9. srpna na též nosiči opět z ruského kosmodromu Bajkonur nacházejícího se v Kazachstánu.

Životnost družic byla původně určena na 5 let. V současné době systémy všech čtyř družic i naprostá většina vědecké přístrojů stále dobře fungují. Proto byl nedávno prodloužen příjem dat družic Cluster až do roku 2009.



Obrázek 4.2: Raketa Sojuz se dvěma družicemi projektu Cluster. [převzato z <http://sci.esa.int/cluster/>]

4.1.2 Palubní přístroje

Na palubách se nachází 11 přístrojů, vyrobených evropskými a americkými laboratořemi a univerzitami ve spolupráci s ESA a NASA.

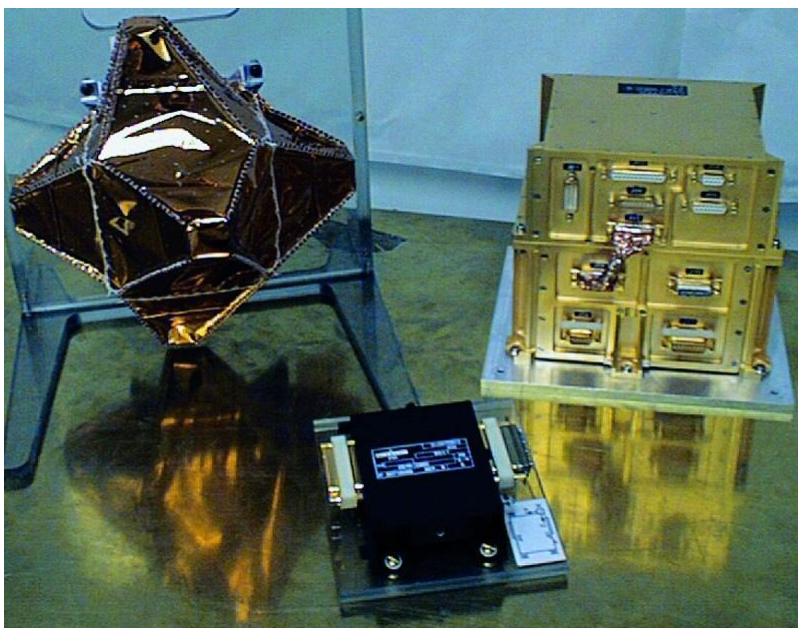
FGM	Fluxgate Magnetometer
EDI	Electron Drift Instrument
ASPOC	Active Spacecraft Potential Kontrol experiment
STAFF	Spatio-Temporal Analysis of Field

	Fluctuation experiment
EFW	Electric Field and Wave experiment
DWP	Digital Wave Processing experiment
WHISPER	Waves of High frequency and Sounder for Probing of Electron density by Relaxation experiment
WBD	Wide Band Data instrument
PEACE	Plasma Electron And Current Experiment
CIS	Cluster Ion Spectrometry experiment
RAPID	Research with Adaptive Particle Imaging Detectors
WEC	Wave Experiment Consortium (DWP, EFW, STAFF, WBD, and WHISPER)
Tabulka 4.2: Přístroje na palubách družic Cluster	

Z jedenácti přístrojů na palubách družic Cluster jsem použil hlavně data z přístroje STAFF-SA (Spatio-Temporal Analysis of Field Fluctuation Spectrum Analyser) a WBD (Wide Band Data instrument). Jejich popisu se proto budu věnovat detailněji.

4.2.1 STAFF

Přístroj STAFF (viz. obrázek 4.3) se skládá z tříosého pulzačního magnetometru určeného k měření magnetických fluktuací (s rozsahem od 0.1 Hz až 4 kHz), výkonnostního předzesilovače a ze schránky, v níž se nachází samotné dva vyhodnocující přístroje: palubní jednotka vlnových forem (STAFF-SC) a spektrální analyzátor (STAFF-SA). STAFF je součástí konsorcia experimentů WEC [Cornilleau-Wehrin et al., 2003].



Obrázek 4.3: Přístroj STAFF-SA [převzato z <http://sci.esa.int/cluster/>]

4.2.2 STAFF-SC

Magnetický analyzátor vlnových forem se sestává ze tří základních součástí: filtrovací jednotka s digitalizací vlnových forem, výstupní rozhraní a palubní kalibrace. Získaná data z magnetometru jsou filtrována na dvou rozsazích: 0.1 Hz až 10 Hz, resp. 0 Hz až 180 Hz. Pak jsou souběžně digitalizována do 16ti bitů a vzorkována na 25 Hz, resp. 450 Hz.

4.2.3 STAFF-SA

Přístroj STAFF-SA je spektrální analyzátor. Generuje korelační matice 5x5 ze všech vstupních kanálů (B_x , B_y , B_z , E_y , E_z) s rozsahem devíti oktáv. Frekvenční spektrum přístroje (8 Hz do 4 kHz) je rozděleno do tří hlavních pásem (pásma A: 8 –164 Hz, pásmo B: 64 Hz – 512 Hz, pásmo C: 512 Hz – 4048 Hz), z nichž každé je ještě roztrženo do devíti podpásem. Celkový rozsah frekvencí je tudíž rozdělen do 27 logaritmicky rozmístěných frekvenčních pásem. Pro každá tři hlavní pásma a každých pět sensorových kanálů je vlastní pásmový filtr, jež ořezává jak nižší frekvence, tak i vyšší frekvence (pro zachování Nyquistova teorému).

Data z přístroje STAFF-SA jsou zpracovávána na observatoři v Meudonu u Paříže programovým vybavením vyvinutým na MFF UK. Výsledkem jsou datové soubory s příponami PSD (Power Spectral Density), SM (Spectral Matrices) a AUX (Auxiliary data).

V souborech SM se nacházejí spektrální matice 5x5 [Santolik et al.,2003], jež jsou získány kombinací měření elektrického a magnetického pole (viz obrázek 4.2).

$$\begin{pmatrix} B_x^2 & B_x \cdot B_y^* & B_x \cdot B_z^* & B_x \cdot E_x^* & B_x \cdot E_y^* \\ B_y \cdot B_x^* & B_y^2 & B_y \cdot B_z^* & B_y \cdot E_x^* & B_y \cdot E_y^* \\ B_z \cdot B_x^* & B_z \cdot B_y^* & B_z^2 & B_z \cdot E_x^* & B_z \cdot E_y^* \\ E_x \cdot B_x^* & E_x \cdot B_y^* & E_x \cdot B_z^* & E_x^2 & E_x \cdot E_y^* \\ E_y \cdot B_x^* & E_y \cdot B_y^* & E_y \cdot B_z^* & E_y \cdot E_x^* & E_y^2 \end{pmatrix}$$

Obrázek 4.4: Formát spektrální matice (SM). [převzato z Mirioni, 2005]

PSD soubory vzniknou z diagonálních prvků SM, jsou však zpracovány s větším časovým rozlišením, proto jsou uloženy v jiném souboru. Data z SM i PSD jsou opět rozdělena na 27 logaritmičsky oddělených frekvenčních pásem [Santolik, 2003; Mirioni, 2005].

4.2.4 WBD

Wide Band Data Instrument (WBD) je přístroj na palubách družic Cluster II poskytující měření elektrických a magnetických polí s velmi vysokým časovým rozlišením ve frekvenčních pásmech od 25 Hz do 577 kHz. Byl vyroben na University of Iowa. Digitalizuje souvislé vlnové formy a posílá je buď v 220 kbit/s real-time módu a nebo v 73 kbit/s burst módu. V prvním případě jsou data přijímána stanicemi v rámci projektu NASA Deep-Space Network (DSN). Přístroj je znázorněn na obrázku 4.5.



Obrázek 4.5: Přístroj Wide Band Data Instrument. [převzato z <http://www-pw.physics.uiowa.edu/>]

5. Programové vybavení použité v práci

5.1 IDL

IDL (Interactive Data Language) je vývojové prostředí založené na bázi vyšších programovacích jazyků s vhodně implementovanými rutinami usnadňující práci při vyhodnocování velkých objemů dat. Bylo vyvinuto firmou RSI (Research Systems Inc. <http://www.rsinc.com/>). Je často užíváno v kosmickém výzkumu. ESA (European Space Agency) pomocí IDL vyhodnocuje například snímky Halleyovy komety. Týmu opravující Hubbleův teleskop pomáhá k diagnostice anomálií čoček. Astronauti používají IDL na palubách raketoplánu ke studiu ultrafialového záření. Taktéž většina programového vybavení používaného na KEVF MFF UK k analýze družicových dat je napsána v tomto prostředí.

5.2 Prasadco

Prasadco (PRopagation Analysis of STAFF-SA Data with COherency tests) je počítačový program napsaný v IDL a určený na analýzu elektromagnetických vln z dat získaných z měření elektrických a magnetických polí [Santolík, 2003] přístrojem STAFF-SA (viz. kapitola 4.2.4). K analýze lze použít různé metody, popsané v [Santolík et al., 2000; 2001a,b; 2002a,b,c; 2003]. Program má jak grafický výstup v podobě PNG (Portable Network Graphics) souboru (popř. jiné grafické formáty) tak i v numerickém formátu SAV kompatibilním s prostředím IDL. Výhodou programu je že data je možno různě filtrovat. Vstupní data pro Prasadco jsou PSD, SM a AUX soubory (viz kapitola 4.2.3) a kontrolní soubor jenž obsahuje informace o tom jaká data, v jakém měřítku a kam se mají vykreslit [Santolík, 2003].

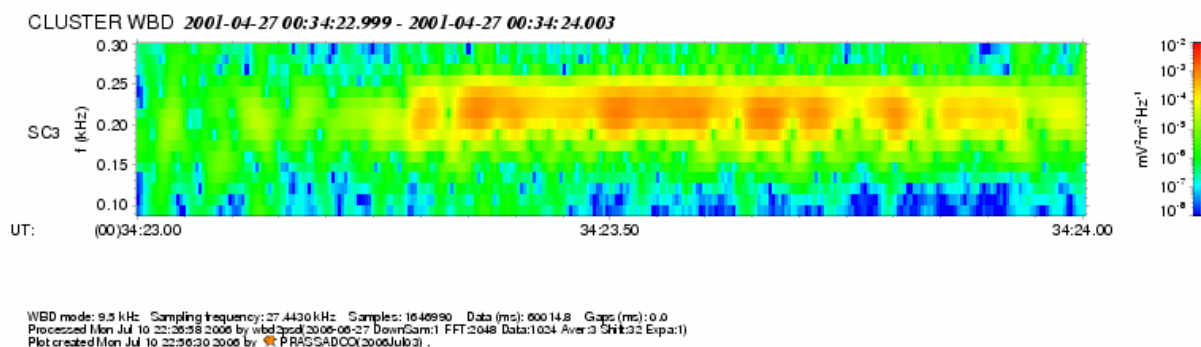
5.3 wbd2psd

Wbd2psd je program pro IDL napsaný pro převádění dat z WBD (viz. 4.2.4) do PSD souborů, které jsou posléze zpracovávány pomocí programu Prasadco (viz 5.2). Program byl použit např. v [Santolík et al., 2002b,2004]. Další funkcí wbd2psd, zmíněnou i v [Santolík et al., 2004], je tvorba zvukových souborů WAV z dat z WBD.

6. Vlastní výsledky

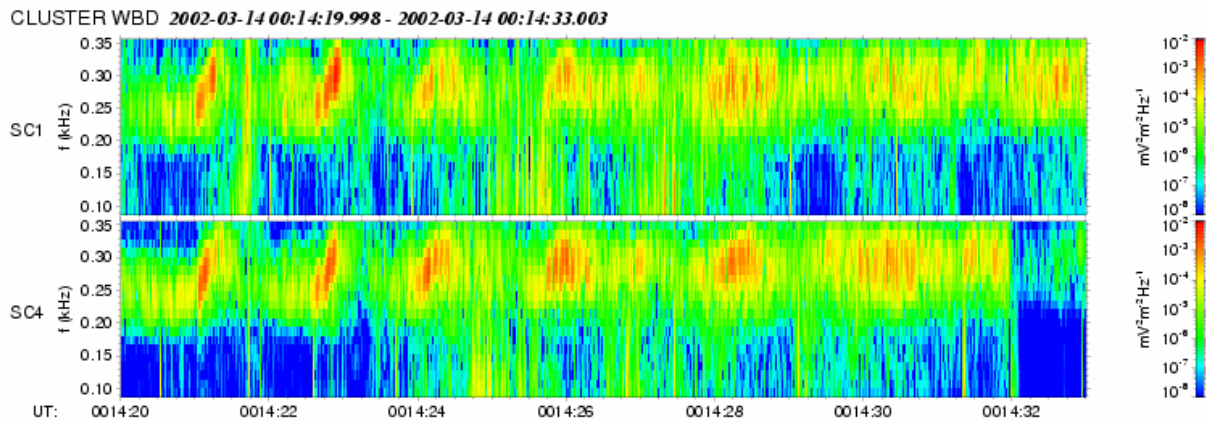
6.1 Analýza dat z WBD

Seznamy všech intervalů, kdy pracoval přístroj WBD na družicích Cluster, jsem obdržel ze serveru University of Iowa, kde byl přístroj vyroben [<http://www-pw.physics.uiowa.edu/>]. Jednalo se o 114 081 intervalů za období let 2001 až 2004. Pak jsem vlastním programem vybral z těchto seznamů pouze ty intervaly, kdy WBD byl zapnut ve vhodném módu (frekvenční rozsah od 25 Hz do 9.5 kHz). Těchto intervalů bylo 44 790. Poté jsem procházel dráhy družic Cluster během nichž byl WBD ve vhodném frekvenčním módu. Uvažoval jsem pro jednoduchost model rotačního paraboloidu daného rovnicí $7X_{GSE} + Y_{GSE}^2 + Z_{GSE}^2 - 49 = 0$, který přibližně vystihuje nejnižší praktický limit hranice magnetoobálky (viz. obr. 1.3). Porovnával jsem polohu začátků a konců zmíněných 44790 intervalů za pomoci AUX souborů (viz kapitola 4.2.3) obsahujících polohy družic a nacházejících se na serveru Oberon (<http://oberon.troja.mff.cuni.cz/>) a pokud alespoň jeden z nich ležel vně paraboloidu zaznamenal jsem si jej do samostatného souboru. Takových intervalů bylo již pouze 900. K nim jsem dalším vlastním programem našel příslušné spektrogramy a polarizace opět z přístroje STAFF-SA. Takových souborů bylo už pouze 288. Na nich jsem hledal konkrétní případy lvích řevů. Na jeden výraznější příklad jsem aplikoval program wbd2psd, který mi vyrobil PSD soubor a zvukový WAV soubor. Po poslechu zvukového souboru jsem musel dát Smithovi et al. [1969] za pravdu. Zavedené názvosloví skutečně odpovídalo. Zvuk se opravdu podobal řevu lva. Získaný PSD soubor jsem pomocí programu Prassadco vykreslil do obrázku 6.1. Mezi frekvencemi 150 Hz a 250 Hz je zřetelně patrná úzko-pásmová struktura vlnové emise typu lví řev.



Obrázek 6.1: Příklad lvího řevu z dat WBD

Stejnou metodou jsem získal i obrázek 6.2. Je na něm zachycena série lvích řevů, kterou současně naměřily přístroje WBD na družicích Cluster 1 a 4. Opět je zde zřejmá úzko-pásmová struktura vlnové emise typu lví řev tentokrátě však na vyšších frekvencích než na obr. 6.1.



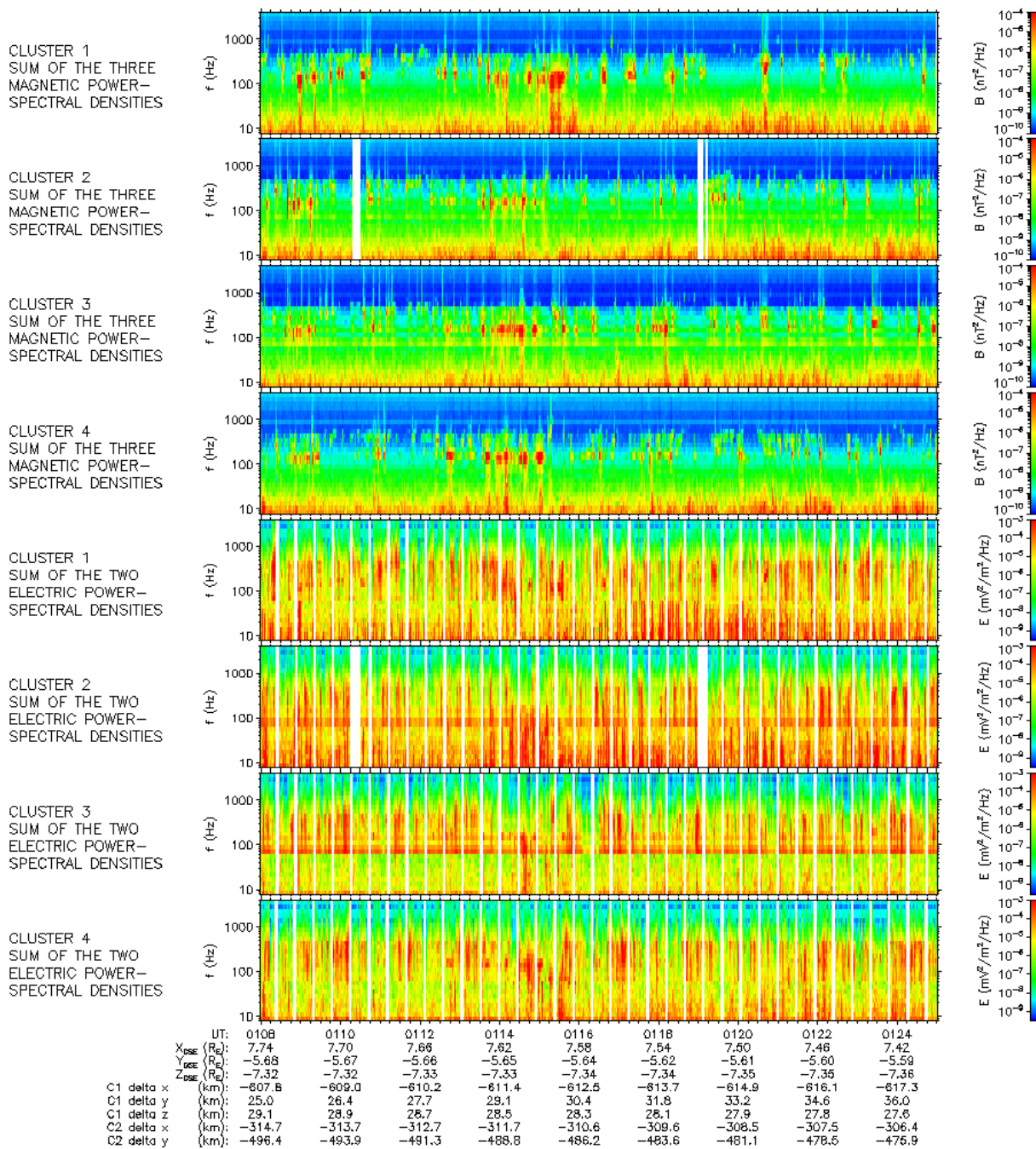
Obrázek 6.2: Příklad série lvích řevů z dat WBD

6.2 Analýza dat z STAFF-SA

V Akademickém roce 2004/2005 jsme s kolegou Alexandrem Piťňou zabývali v rámci studentského projektu hledáním intervalů během nichž registrovaly přístroje STAFF-SA lví řevy. Nyní byla mým cílem jejich podrobnější analýza. Připravil jsem programové vybavení k vytváření kontrolních souborů pro program Prassadco k jednotlivým intervalům. Poté jsem je analyzoval programem Prassadco. Na obrázcích 6.2 až 6.4 můžete vidět příklad výrazné série emisí typu lví řev z přístroje STAFF-SA z 19. března 2001. Horní čtyři panely na obrázku 6.2 obsahují měření z magnetických antén z družic C1, C2, C3, C4 po řadě. Je na nich zřetelně vidět sporadická vlnová emise lvích řevů mezi 100 a 300 Hz. Pátý až osmý panel ukazují časový vývoj elektrického pole, kde intenzivní lví řevy také občas pronikají širokopásmovými přírodním šumem, jež je v magnetoobálce častým projevem nelineárních solitárních elektrostatických struktur [Pickett et al., 2004, 2005]. Obrázek 6.3 zachycuje polarizaci z přístrojů STAFF-SA. První čtyři panely obsahují stupeň polarizace vypočítaný podle [Santolik et al., 2000] z vlastních čísel spektrálních matic (viz. obr. 4.4). V oblasti výskytu lvích řevů se blíží stupeň polarizace k hodnotě 0.8-1, což znamená šíření podobné rovinné vlně. Další čtyři panely ukazují elipticitu polarizace [Santolik et al., 2002a]. Z obrázku 6.3 je dobře

vidět, že pozorované lví řevy jsou pravotočivě kruhově polarizované vlnové emise. Poslední čtyři panely nám ukazují komponenty a velikost okolního magnetického pole v souřadné soustavě GSE. Na obrázku 6.4 prvních osm panelů představují po řadě ze všech družic polární úhel Θ , který svírá vlnový vektor \mathbf{k} s vektorem magnetické indukce \mathbf{B} a příslušný azimutální úhel. Úhel Θ , resp. úhel Φ , se pohybuje mezi 20° a 40° , resp. -20° a 20° . Normalizovaná projekce Poyntingova vektoru do směru rovnoběžného s \mathbf{B} (poslední 4 panely v obrázku 6.4) ukazuje, že intenzivní lví řevy na počátku časového intervalu se šíří proti směru lokálního magnetického pole v magnetoobálce. Při měření se družice nacházely nad jižní polokoulí přibližně ve vzdálenosti $12 R_E$. Ze směru magnetických siločar (viz. komponenty \mathbf{B} na obr. 6.3), z projekce Poyntingova vektoru a ze směru vlnového vektoru \mathbf{k} vůči \mathbf{B} můžeme odhadnout, že pozorované lví řevy se pravděpodobně generovaly na vyšších šířkách, tedy v oblasti poblíž magnetopauzy.

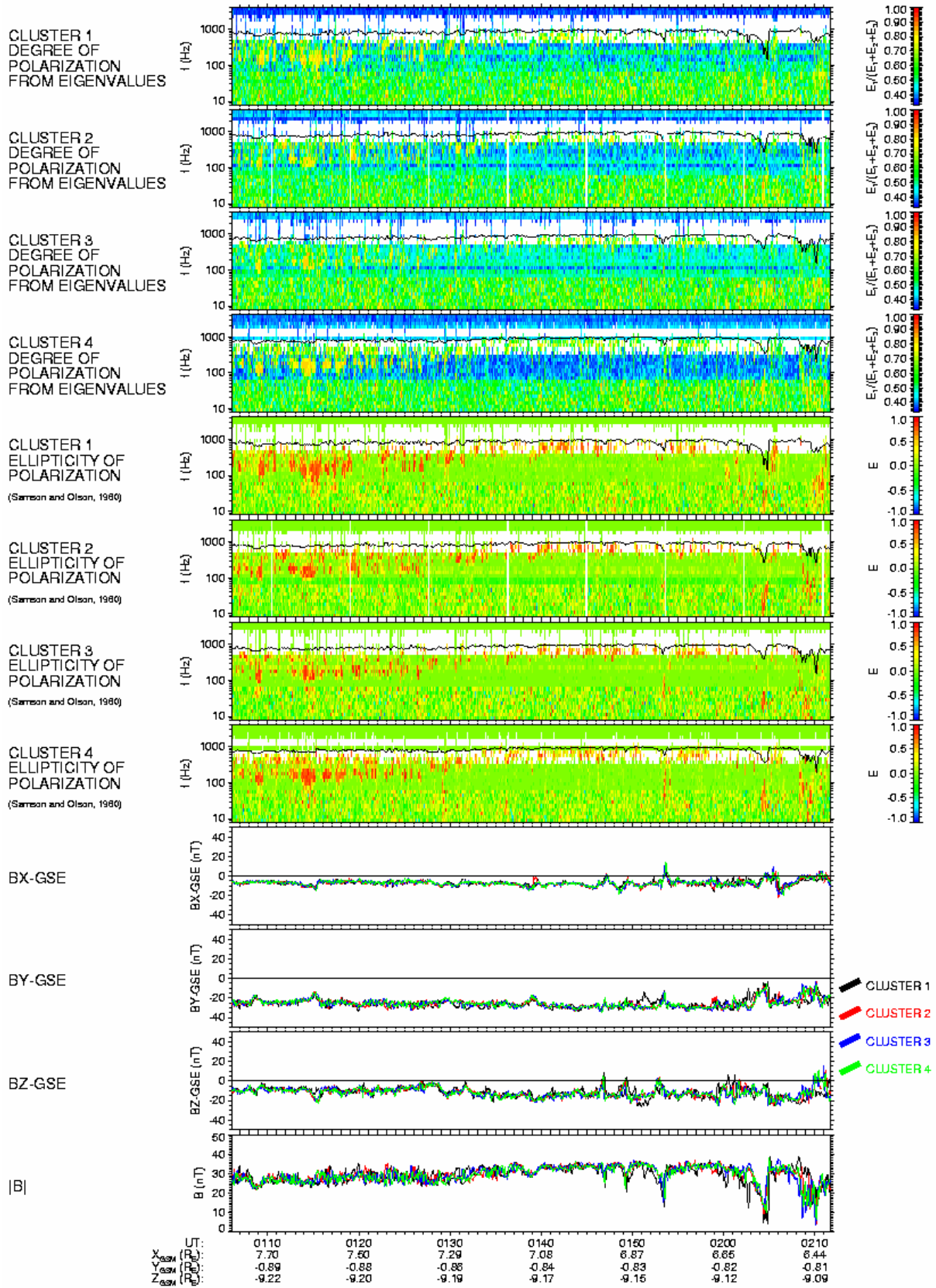
CLUSTER STAFF-SA 2001-03-19 01:07:59.323 - 2001-03-19 01:25:00.728



All data from N2 files C1_010319_1_2a.n2sa C2_010319_1_2a.n2sa C3_010319_1_2a.n2sa C4_010319_1_2a.n2sa
 Calibrated by C1_CT_STASA_20010110_V003.cal C2_CT_STASA_20010110_V003.cal C3_CT_STASA_20010110_V003.cal C4_CT_STASA_20010110_V003.cal ,
 Processed Tue Feb 18 07:22:54 2002 by read_N2SA(2001May15) . Coordinates C1-B0 C2-B0 C3-B0 C4-B0. Attitude OK.
 Plot created Thu Jul 20 12:17:26 2006 by PRASSADDO(2006Jul03) . ORBIT No. 112.9

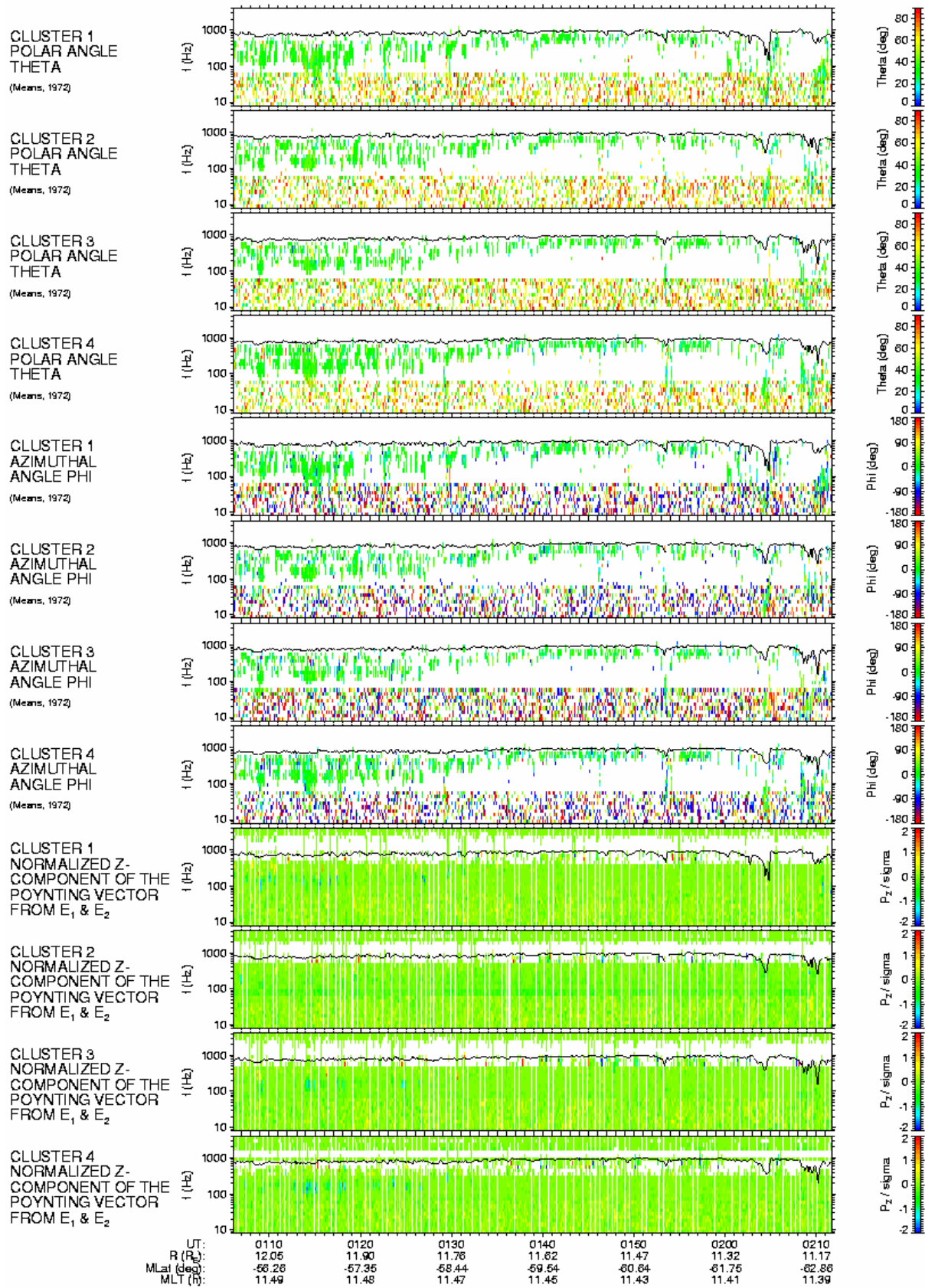
Obrázek 6.2: Spektrogram Ivlích řevů z dat STAFF-SA

CLUSTER STAFF-SA 2001-03-19 01:06:01.778 - 2001-03-19 02:11:45.773



Obrázek 6.3: Polarizace lvič řevů z dat STAFF-SA

CLUSTER STAFF-SA 2001-03-19 01:06:01.778 - 2001-03-19 02:11:45.773



Obrázek 6.4: Složky vlnového a Poyntingova vektoru I vích řevů z dat STAFF-SA

7. Závěr

Tato bakalářská práce byla věnována poměrně často se vyskytující vlnové emisi označované jako „lví řev“. Přestože jsou tyto vlnové emise známé z družicových měření v magnetoobálce Země již po více než 30 let, není dosud přesně zjištěn způsob ani místo jejich vzniku. Družicový projekt Cluster a vlnové přístroje STAFF a WBD, na které jsem se ve své práci zaměřil, mají všechny předpoklady, aby tento problém pomohly vyřešit.

V datech přístroje WBD jsem našel časové intervaly, kdy se družice nalézaly v oblasti magnetoobálky a kdy zároveň pracoval přístroj WBD ve vhodném frekvenčním režimu. Mezi těmito intervaly jsem si jako příklad vybral jednodružicové pozorování lvího řevu s frekvenčním rozsahem 150 – 250 Hz trvajícím jednu vteřinu a dvoudružicové měření série lvích řevů s frekvencemi 200 až 350 Hz.

Z dat přístroje STAFF-SA, která nesou i informace o šíření vlnových emisí, jsem analyzoval jeden konkrétní případ čtyřdružicového měření. Série lvích řevů měla frekvenci 100 – 300 Hz. Šířila se téměř antiparalelně s magnetickou siločárou. Z pozice družic a lokální orientace magnetického pole lze odhadnout, že se tyto lví řevy generovaly na vyšších šířkách v blízkosti magnetopauzy.

Tyto první slibné výsledky představují dobrý základ pro další systematické studium emisí typu „lví řev“ z dat družic Cluster.

Poznámky

1.kapitola

1) Souřadný systém GSE (Geocentric Solar Ecliptical) má počátek ve středu Země. Osa X směřuje ke Slunci. Rovina XY je rovinou ekliptiky. Osa Z je k této rovině kolmá a směřuje k severu. Používaná jednotka R_E je poloměr Země.

2) Použil jsem jeden z možných doslovných překladů anglického *magnetosheath*. Z ruskojazyčné literatury se u nás též vyskytuje označení „přechodová oblast“.

Literatura

- Baumjohann, W., Treumann, R.A., Georgescu, E., Haerendel, G., Fornaçon, K.-H., and Aster, U., Waveform and packet structure of lion roars, *Ann.Geophysicae*, 17, 1528, 1999
- Biermann, L., Relationship between Plasma Physics and Astrophysics, *Reviews of modern physics*, 32, 4, 1960
- Cornilleau-Wehrlin N., Chanteur G., Perraut S., Rezeau L., Robert P., Roux A., Villedary C. de, Canu, P., Maksimovic M., Conchy, Y. de, Hubert D., Lacombe, C., Lefeuvre, F., Parrot M., Pincon, J.L., Decrau P.M.E., Harvey C.C., Louarn Ph., Santolik, O., Alleyne H.St.C., M. Roth and STAFF team, First results obtained by the Cluster STAFF experiment, *Ann. Geophys.* 21, 437-456, 2003.
- Fairfield, D. H., Magnetic Fields of the Magnetosheath, *Reviews of geophysics and space physics*, 14, 1, 1976
- Kallenrode, M.-B., Space physics, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York*, 1998
- Kennel, C. F. a Petschek, H. E., Limit on stably trapped particle fluxes, *J. Geophys.*, 77, 1, 1966
- Maksimovic, M., C.C. Harvey, O. Santolik, C. Lacombe, Y. de Conchy, D. Hubert, F. Pantellini, N. Cornilleau-Werhlin, I. Dandouras, E.A. Lucek, and A. Balogh, Polarisation and propagation of Lion Roars in the dusk side Magnetosheath, *Ann. Geophys.*, 19, 1429, 2001
- Mirioni L., N. Cornilleau-Wehrlin, P. Robert, M. Maksimovic, Y. de Conchy, and C. C. Harvey, STAFF products for the Cluster Active Archive, *Proceedings of the Cluster and Double Star Symposium 5th Anniversary of Cluster in Space 19 – 23 September 2005, Noordwijk, The Netherlands*
- Parker E. N., Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields, *Astrophysical Journal*, vol. 128, p.664, 1958
- Pickett, J. S., L.-J. Chen, S. W. Kahler, O. Santolik, D. A. Gurnett, B. T. Tsurutani, and A. Balogh, Isolated electrostatic structures observed throughout the Cluster orbit: relationship to magnetic field strength, *Ann. Geophys.*, 22, 2515-2523, 2004.
- Pickett, J. S. , Chen, L. -J., Kahler, S. W., Santolik, O., Goldstein, M. L., Lavraud, B., Décréau, P. M. E., Kessel, R., Lucek, E., Lakhina, G. S., Tsurutani, B. T., Gurnett,

- D. A., Cornilleau-Wehrlin, N., Fazakerley, A., Reme, H. and Balogh, A. On the generation of solitary waves observed by Cluster in the near-Earth magnetosheath, *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol. 12, pp 181-193, 2005.
- Rodriguez P., Long-duration lion roars associated with quasi perpendicular bow shocks, *J. Geophys. Res.* 90, 241, 1985a
- Rodriguez P., Magnetosheath Whistler Turbulence, *J. Geophys. Res.*, 90, 6337, 1985b
- Santolik O., F. Lefeuvre, and J.Y. Brochot, Determination complete de la direction du vecteur d'onde a partir de donnees MEMO TBF (in french), LPCE/NTS/074.A, Lab. Phys. Chimie Environ./CNRS, Orleans, France, 2000.
- Santolik, O., F. Lefeuvre, M. Parrot, and J.L. Rauch, Complete wave-vector directions of electromagnetic emissions: Application to INTERBALL-2 measurements in the nightside auroral zone, *J. Geophys. Res.*, 106, 13,191-13,201, 2001a.
- Santolik, O., F. Lefeuvre, M. Parrot, and J.L. Rauch, Propagation of Z-mode and whistler-mode emissions observed by Interball 2 in the nightside auroral region, *J. Geophys. Res.*, 106, 21,137-21,146, 2001b.
- Santolik, O., J. S. Pickett, D. A. Gurnett, and L. R. O. Storey, Magnetic component of narrow-band ion cyclotron waves in the auroral zone, *J. Geophys. Res.*, 107(A12), 1444, doi:10.1029/2001JA000146, 2002a.
- Santolik, O., J. S. Pickett, D. A. Gurnett, M. Maksimovic, N. Cornilleau-Wehrlin, Spatiotemporal variability and propagation of equatorial noise observed by Cluster, *J. Geophys. Res.*, 107(A12), 1495, doi:10.1029/2001JA009159, 2002b.
- Santolik, O. and D. A. Gurnett, Propagation of auroral hiss at high altitudes, *Geophys. Res. Lett.*, 29(10), 1481, doi:10.1029/2001GL013666, 2002c.
- Santolik, O., M. Parrot, and F. Lefeuvre, Singular value decomposition methods for wave propagation analysis, *Radio. Sci.* 38(1), 1010, doi:10.1029/2000RS002523, 2003.
- Santolik O., Propagation Analysis of STAFF-SA Data with Coherency Tests (A User's Guide to PRASSADCO), 2003
- Santolik, O., D. A. Gurnett, and J. S. Pickett, Multipoint investigation of the source region of storm-time chorus, *Ann. Geophys.*, 22, 2555-2563, 2004.
- Smith E.J., R.E. Holzer, C.T. Russell, Magnetic Emissions in the Magnetosheath at Frequencies near 100 Hz, *J. Geophys. Res.*, 74, 3027, 1969

- Smith E.J., and B.T. Tsurutani, Magnetosheath lion roars, *J. Geophys. Res.*, *81*, 2261, 1976
- Yearby, K.H., H.S.C.K. Allene, N. Cornilleau-Wehrin, O. Santolik, M.A. Balikhin, S.N. Walker, A. Fazakerley and A. Lahiff, Observation of lion roars in the magnetosheath by STAFF/DWP experiment on the Double Star TC-1 spacecraft, *Ann. Geophysicae*, *23*, 2861, 2005
- Zhang Y., Matsumoto, H., and Kojima, H., Lion roars in the magnetosheath: the Geotail observations, *J. Geophys. Res.* *103*, 4615, 1998