

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko–fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Vratislav Krupař

Studium šíření emisí typu ”lví řev” z dat družic Cluster

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí diplomové práce: Doc. RNDr. Ondřej Santolík, Dr.

Konzultant diplomové práce: Doc. RNDr. Lubomír Přech, Dr.

Studijní program: Fyzika

Praha 2008

Chtěl bych zejména poděkovat Doc. RNDr. Ondřejovi Santolíkovi, Dr. za jeho trpělivost a obětavost během příkladného vedení mé práce. Nemohu opomenout cenné rady mého konzultanta Doc. RNDr. Lubomíra Přecha, Dr. Díky vřelé pomoci Prof. RNDr. Jany Šafránkové, DrSc. a Doc. RNDr. Jana Wilda, CSc. se mi podařilo stihnout navazující magisterské studium v nestandardní délce. Rád bych poděkoval všem zaměstnancům a studentům Katedry fyziky povrchů a plazmatu, kteří tvoří zcela výjimečný kolektiv.

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

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

V Praze dne 2. května 2008

Vratislav Krupař

Obsah

Abstrakt

1	Úvod	1
2	Hvizdové vlny v magnetoobálce Země	2
2.1	Heliosféra	2
2.1.1	Slunce	2
2.1.2	Sluneční vítr	5
2.1.3	Rázová vlna	6
2.1.4	Magnetoobálka	6
2.2	Teorie šíření vln ve studeném plazmatu	8
2.3	Současný stav problematiky lvích řevů	11
2.3.1	První pozorování	11
2.3.2	Zdroje lvích řevů	11
2.3.3	Frekvenční vlastnosti lvích řevů	14
2.3.4	Polarizace a vlastnosti vlnových forem	17
2.3.5	Intenzita	21
3	Cíle práce	24
4	Zdroj dat	25
4.1	Základní vlastnosti družic CLUSTER	25
4.2	Přístroj STAFF	26
4.3	Přístroj STAFF-SA	26
4.4	Přístroj WBD	28
5	Metody analýzy	31
5.1	Program INTERVAL	31
5.2	Program PRASSADCO	32
5.3	Program wbd2psd	32

OBSAH

6	Vlastní výsledky a jejich diskuze	33
6.1	Získání datového souboru	33
6.2	Prostorové rozdělení pozorovaných lvích řevů	35
6.3	Frekvenční rozdělení pozorovaných lvích řevů	39
6.4	Rozdělení intenzit pozorovaných lvích řevů	40
6.5	Vlastnosti šíření pozorovaných lvích řevů	41
6.6	Pozorování lvích řevů z přístroje WBD	43
6.6.1	Jemná struktura	43
6.6.2	Časová zpodění mezi družicemi	45
7	Závěr	48
A	Souřadnicový systém GSE	50

Abstrakt

Název práce: *Studium šíření emisí typu "lví řev" z dat družic Cluster*

Autor: *Vratislav Krupař*

Katedra (ústav): *Katedra fyziky povrchů a plazmatu*

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

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

Abstrakt: *Úkolem této diplomové práce je statistická studie vlnových emisí typu lví řev v Zemské magnetoobálce. Použili jsme velký datový soubor získaný družicemi projektu Cluster. Studovali jsme frekvenční, prostorové a intenzitní rozdělení. Zkoumali jsme taktéž vlastnosti šíření za pomoci pokročilých metod aplikovaných na vícesložkové měření. Ověřili jsme si úzkopásmovou strukturu lvích řevů. Porovnali jsme pozorované a vypočítané (z teorie šíření vln ve studeném plazmatu) zpoždění vlnových emisí mezi družicemi při krátkých vzdálenostech.*

Klíčová slova: *vlny ve hvízdovém módu, Zemská magnetoobálka, družice Cluster*

Abstract

Title: *Analysis of propagation of "lion roar" emissions using the data of the Cluster spacecraft*

Author: *Vratislav Krupař*

Department: *Department of Surface and Plasma Science*

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

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

Abstract: *The main task of this thesis was a statistical study of lion roar wave emissions in the Earth's magnetosheath. Large data set obtained from the Cluster spacecraft has been used. We have studied a frequency distribution, a wave power distribution and a spatial distribution. We have investigated propagation characteristics using advanced methods applied on multi-components measurement. We have confirmed the narrow-band structure of lion roars. We have compared observed and estimated (from the cold plasma theory) time lags between spacecraft during short separations.*

Keywords: *whistler-mode waves, the Earth's magnetosheath, the Cluster spacecraft*

Kapitola 1

Úvod

Slunce jako předmět zájmu lidstvo přitahovalo od pradávna. Díky své blízké poloze k Zemi můžeme studovat nejen jeho elektromagnetické záření, ale i emitované plazma – sluneční vítr, který přímo ovlivňuje naši planetu. Interakcí zemského převážně dipólového magnetického pole se zamrzlým magnetickým polem ze Slunce ve slunečním větru se generují různé vlnové emise. Jedné z nich, lvím řevům, je věnovaná i tato práce.

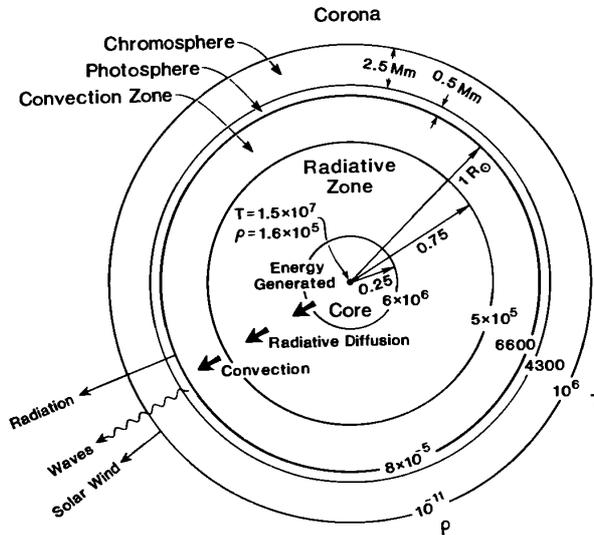
Předkládaná diplomová práce obsahuje sedm kapitol a jednu přílohu. 1. kapitola podává základní motivaci a přehled členění práce. Ve 2. kapitole naleznete stručný fyzikální popis Slunce, slunečního větru a jeho interakcí se Zemskou magnetosférou. Dále je zde nastíněna teorie šíření vln ve studeném plazmatu s důrazem na hvizdové vlny. Také je zde k nalezení současný stav problematiky vlnových emisí typu lví řev. Cíle předkládané diplomové práce jsou shrnuty ve 3. kapitole. Stručný popis základních vlastností družic projektu Cluster a vlnových přístrojů je uveden ve 4. kapitole. Použitým programům a metodám analýzy naměřených dat je věnována 5. kapitola. V 6. kapitole předkládám své původní výsledky společně s diskuzí. 7. kapitola je závěr. V příloze A popisují souřadnicový systém GSE, který používám v předkládané diplomové práci.

Kapitola 2

Hvizdové vlny v magnetoobálce Země

2.1 Heliosféra

2.1.1 Slunce



Obrázek 2.1: Průřez Sluncem (převzato z *Kivelson a Russell* [1995]).

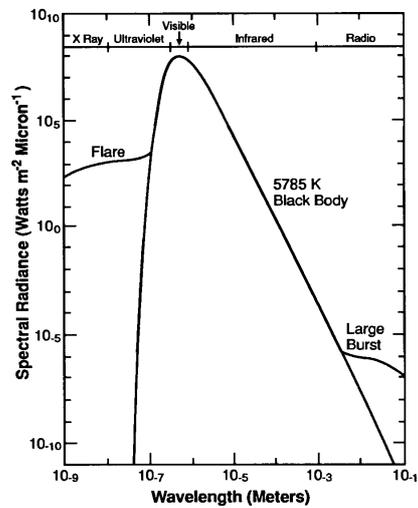
Slunce je pro astrofyziky běžná hvězda spektrální třídy G2V, taktéž zvaná žlutý trpaslík (*Kivelson a Russell* [1995]). Skládá se především z vodíku (92 %

ve smyslu počtu částic nebo 72 % celkové hmotnosti). Zbytek tvoří prakticky jen hélium jako produkt nukleárních reakcí. Přehled základních vlastností Slunce je shrnut v tabulce 2.1.

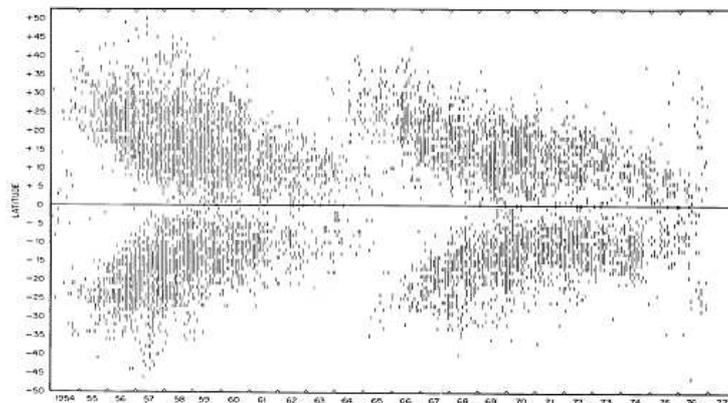
Stáří	4.5×10^9 let
Hmotnost	1.99×10^{30} kg
Poloměr	696000 km
Střední hustota	1.4×10^3 kg.m ⁻³
Vzdálenost od Země	150×10^6 km
Perioda rotace	26 dní (na rovníku)
Svítivost	3.86×10^{26} W
Úbytek hmotnosti	10^9 kg.s ⁻¹

Tabulka 2.1: Základní vlastnosti Slunce *Kivelson a Russell* [1995].

Jaderná fúze vodíku probíhá ve slunečním jádru (viz. obrázek 2.1). Teplota zde dosahuje řádově 10^7 K a hustota 10^5 kg.m⁻³. Následuje tzv. radiační zóna, kde dochází k transportu energie zejména zářením. Cesta fotonu touto oblastí, díky mnohonásobnému rozptylu, může trvat i 10 milionů let. Další je konvekční oblast, jež přechází ve fotosféru odpovědnou za emitované světlo. Sluneční spektrum (viz. obrázek 2.2) je velmi podobné záření černého tělesa s teplotou 5785 K. V chromosféře dochází k značnému poklesu koncentrace a nárůstu teploty. Magnetické pole na neporušeném povrchu Slunce je řádově 1 nT. S periodou přibližně 11ti let se objevují a mizí tzv. sluneční skvrny v nichž magnetické pole dosahuje až 0.3 T. Obrázek 2.3 ukazuje polohu skvrn na povrchu Slunce během dvou slunečních cyklů v letech 1954 - 1977 v závislosti na sluneční šířce. Je vidět že se sluneční skvrny se nejdříve objevují ve vyšších šířkách, a postupně zanikají v rovníkové oblasti. Takovému grafu se říká Maunderův motýlkový diagram. Sluneční cyklus má ve skutečnosti dvojnásobnou délku, během níž se střídá i orientace magnetického pole Slunce.

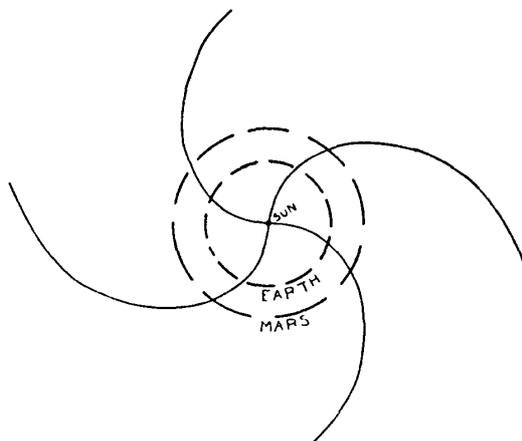


Obrázek 2.2: Sluneční spektrum (převzato z *Kivelson a Russell* [1995]).



Obrázek 2.3: Mauderův digram. Průběh pozemních pozorování skvrn na povrchu Slunce v závislosti na Sluneční šířce v letech 1954 – 1977 (převzato z *Kivelson a Russell* [1995]).

2.1.2 Sluneční vítr



Obrázek 2.4: Parkerovy spirály (převzato z *Parker* [1958]).

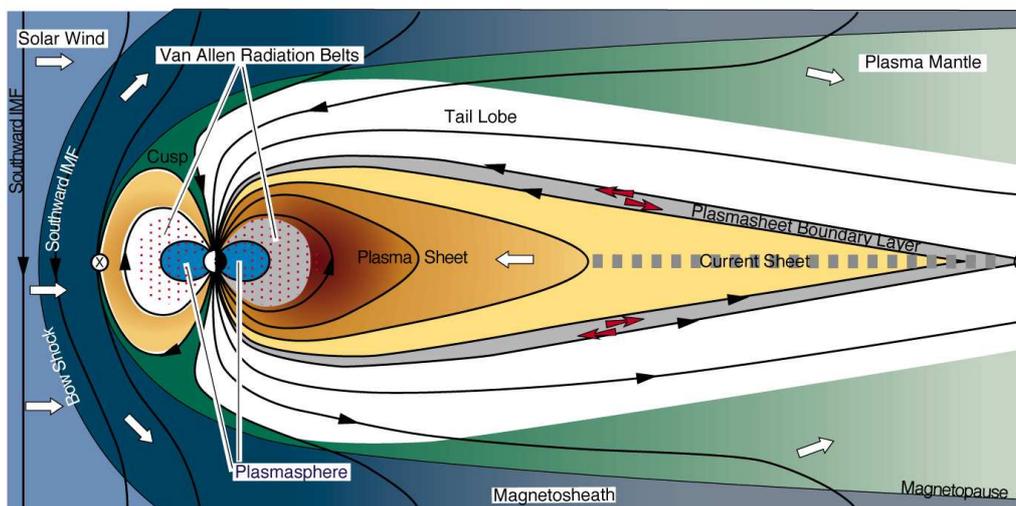
Sluneční vítr je proud plazmatu, který opouští sluneční korónu a vyplňuje celou heliosféru. Jeho základní vlastnosti v okolí Země jsou shrnuty v tabulce 2.2.

Hustota protonů	6.6 cm^{-3}
Hustota elektronů	7.1 cm^{-3}
Hustota He^{2+}	0.25 cm^{-3}
Radiální rychlost	$450 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$
Teplota protonů	$1.2 \times 10^5 \text{ K}$
Teplota elektronů	$1.4 \times 10^5 \text{ K}$
Magnetické pole	7 nT

Tabulka 2.2: Střední parametry slunečního větru (převzato z *Kivelson a Russell* [1995]).

Díky supravodivosti plazmatu v něm zamrzá magnetické pole Slunce (*Kallenrode* [1998]). To je deformované sluneční rotací a tvoří tzv. Parkerovy spirály (*Parker* [1958], viz obrázek 2.4). Oběžná dráha Země svírá se zamrzlým magnetickým polem ve slunečním větru přibližně 45° .

2.1.3 Rázová vlna



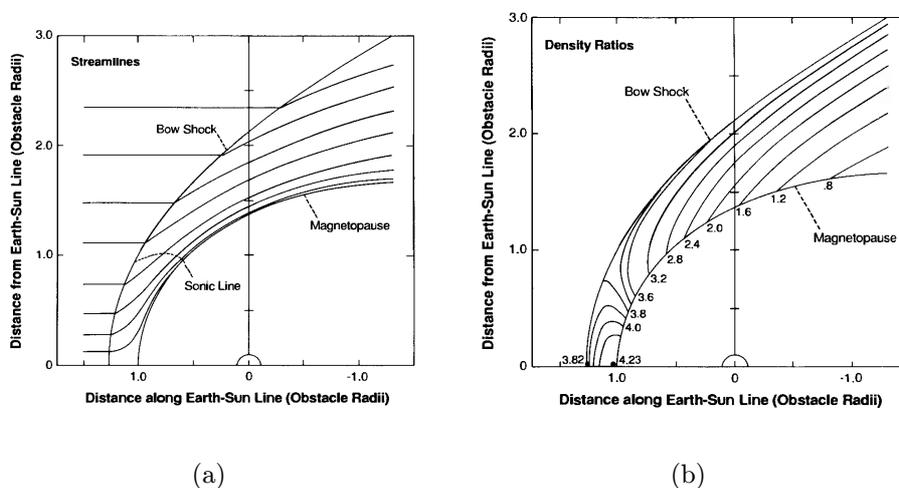
Obrázek 2.5: Magnetosféra Země (převzato z <http://space.rice.edu/>).

Rázová vlna (Bow shock) vzniká interakcí mezi Zemským dipólem a slunečním větrem jež se šíří v blízkosti Země nadzvukovou rychlostí. V této oblasti (viz. obrázek 2.5) dochází ke skokové změně parametrů plazmatu: pokles rychlosti proudění slunečního větru a naopak nárůst hustoty, teploty a entropie. Zjednodušeně se jedná o přeměnu energie proudění v tepelnou energii. Rozdíl mezi rázovou vlnou za nadzvukovým letadlem je hlavně v tom, že Zemská rázová vlna je bezesrážková a elektromagnetické síly mají dominantní úlohu.

2.1.4 Magnetoobálka

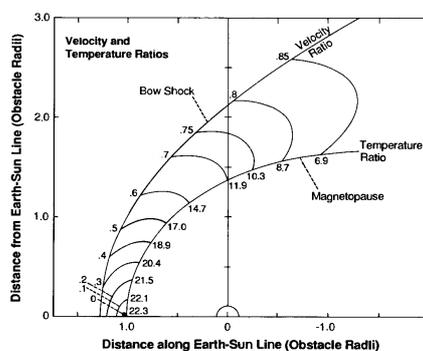
Oblastí mezi rázovou vlnou a samotným magnetickým polem Země se říká magnetoobálka (angl. magnetosheath, nebo z ruštiny také přechodová oblast). Je to ta část slunečního větru, která je narušena přítomností magnetického pole Země. Vlastnosti magnetoobálky jsou těsně svázané s aktuálními parametry slunečního větru (např. směr zamrznutého magnetického pole, hustota, apod.). Na obrázku 2.6(a) můžete vidět jak sluneční vítr obtéká Zemskou magnetosféru pro Machovo číslo 8 a polytropický index $\frac{5}{3}$.

Obrázek 2.6(b) nám za stejných podmínek udává hustotu částic vztaženou na hustotu přitékajícího slunečního větru.



Obrázek 2.6: a) Proudnic slunečního větru v Zemské magneotoobálce, b) Hustota částic slunečního větru v Zemské magneotoobálce vztahované k parametrům ve slunečním větru (převzato *Kivelson a Russell [1995]*).

Teplotu a rychlost proudění opět za stejných podmínek můžeme vyčíst z obrázku 2.7.



vln.

2.2 Teorie šíření vln ve studeném plazmatu

Základní přiblížení teorie šíření vln ve studeném plazmatu spočívá v tom, že tlak plazmatu ($p_D = nk(T_e + T_i)$) je zanedbatelný vzhledem k tlaku magnetického pole ($p_B = B^2/2\mu_0$). Jinými slovy neuvažujeme tepelný pohyb částic. Dalším předpokladem je malá velikost fluktuací parametrů plazmatu v porovnání s ustáleným stavem: zkoumanou problematiku si linearizujeme *Stix* [1992]. Pro popis šíření vln ve studeném plazmatu nám pak stačí tři parametry: cyklotronová frekvence ω_{cs} , plazmová frekvence ω_{ps} , frekvence samotné vlny ω a vlnový vektor \mathbf{k} .

Cyklotronová frekvence ω_{cs} nám říká jakou úhlovou rychlostí bude rotovat nabitá částice okolo magnetické siločáry. ω_{cs} je závislá pouze na velikosti magnetického pole B_0 , hmotnosti m_s a náboje q_s pohybující se částice:

$$\omega_{cs} = \frac{|B_0||q_s|}{m_s} \quad (2.1)$$

Kladně nabitě částice se od těch záporných liší opačnou orientací rotace okolo magnetické siločáry. Plazmová frekvence udává frekvenci vnitřních oscilací v plazmatu a vypočítá se z lokální koncentrace n_s , hmotnosti m_s a náboje q_s oscilující částice:

$$\omega_{ps} = \sqrt{\frac{n_s q_s^2}{\epsilon_0 m_s}} \quad (2.2)$$

Velice výhodné pro popis šíření vln v neizotropním prostředí je vektorový index lomu:

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{k}c}{\omega}, \quad (2.3)$$

kde c je rychlost světla. Pokud $|\mathbf{n}| \rightarrow \infty$ nastává rezonance. Při $|\mathbf{n}| \rightarrow 0$ jedná se o ořezání. Zavedení tzv. Stixových koeficientů je velice účelné pro jednoduchou klasifikaci různých typů vln:

$$R = 1 - \sum_s \frac{\omega_{ps}^2}{\omega(\omega + \omega_{cs})} \quad (2.4)$$

$$L = 1 - \sum_s \frac{\omega_{ps}^2}{\omega(\omega - \omega_{cs})} \quad (2.5)$$

$$P = 1 - \sum_s \frac{\omega_{ps}^2}{\omega^2} \quad (2.6)$$

$$S = \frac{1}{2} \cdot (R + L) \quad (2.7)$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot (R - L) \quad (2.8)$$

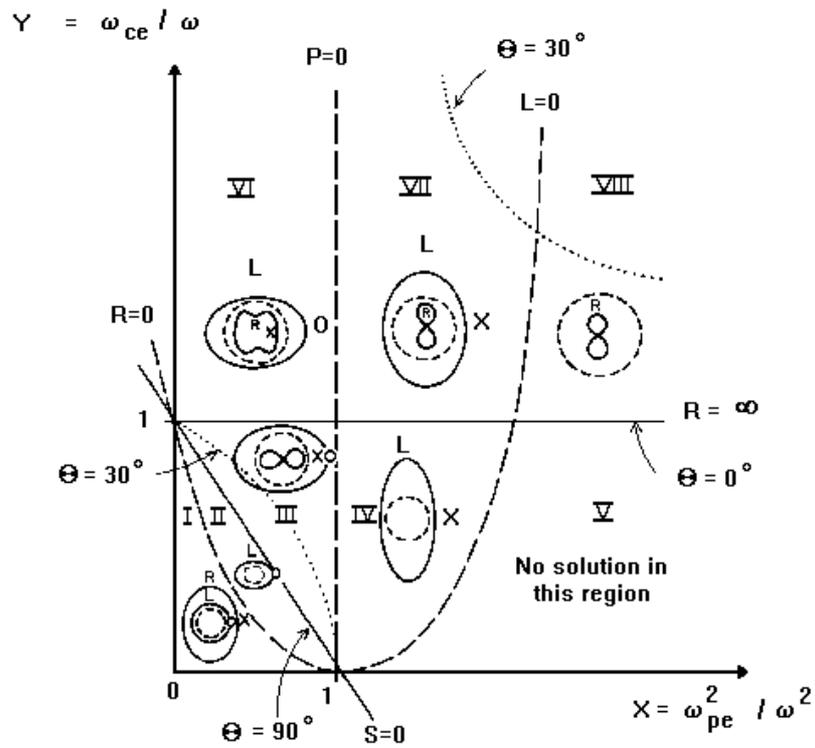
Pro hvizdové vlny které jsou předmětem této práce platí $R = n^2$. Pomocí výše zmíněných vztahů jsme schopni vypočítat jak fázovou rychlost (v_p), která nám říká s jakou rychlostí se mění fáze vlny:

$$v_p = \frac{\omega}{k} \quad (2.9)$$

Grupová rychlost (v_g) nám udává rychlost jakou se šíří vlna v prostoru:

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (2.10)$$

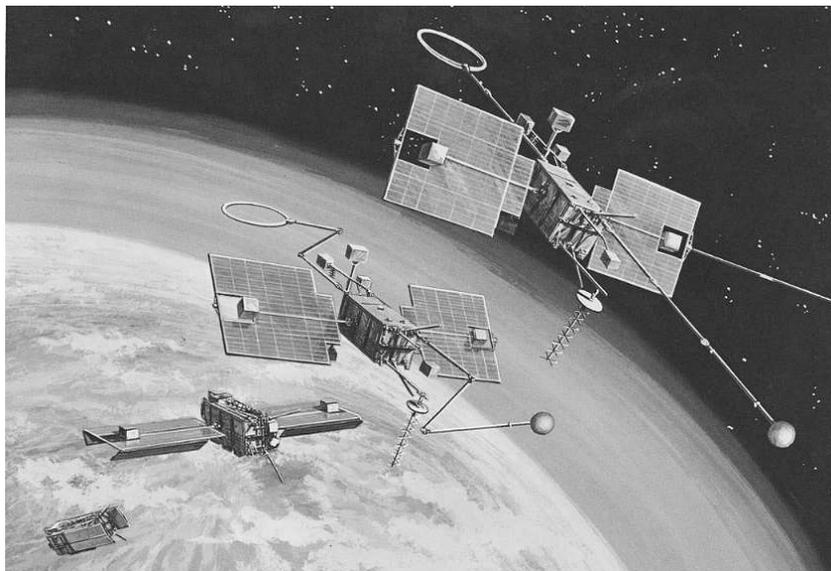
Názorný způsob, ukazující za jakých podmínek se mohou šířit určité typy vln je CMA (Clemmow-Mullaly-Allis) diagram (viz obrázek 2.8). Na ose X je ω_{ps}^2/ω^2 , čili je přímo úměrná hustotě plazmatu. Osa Y (ω_{cs}/ω) je odvislá od velikosti magnetického pole. CMA diagram je rozdělen na osm oblastí v závislosti na hodnotách Stixových koeficientů.



Obrázek 2.8: CMA diagram (převzato z <http://www.oulu.fi/>).

2.3 Současný stav problematiky lvích řevů

2.3.1 První pozorování



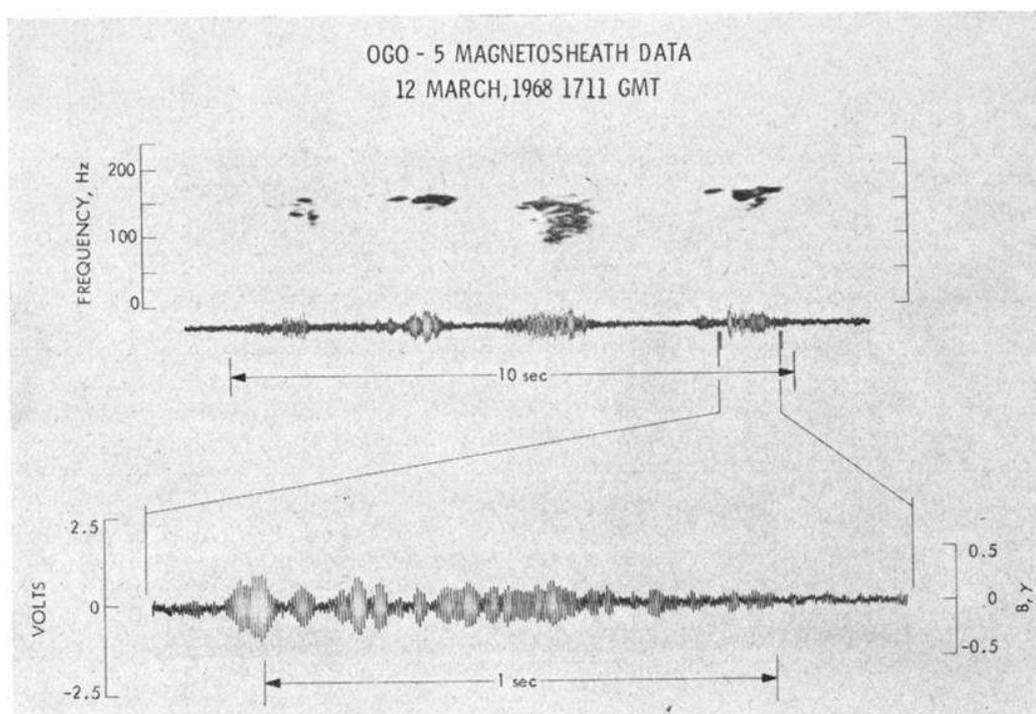
Obrázek 2.9: Družice OGO-5 rozbalující se na oběžné dráze Země (převzato z <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/>).

Termín "lví řev" v souvislosti s vlnami v kosmickém plazmatu se poprvé objevil v článku *Smith a kol.* [1969]. V datech z družice OGO-5 (viz obrázek 2.9) identifikovali v magnetoobálce Země intenzivní úzkopásmové elektromagnetické vlnové emise (viz obrázek 2.10). Už tehdy vyslovili domněnku že se může jednat o hvizdové vlny generované vlnově-částicovými nestabilitami v turbulentním plazmatu Zemské magnetoobálky. V tradici badatelů na poli VLF si získaný signál pustili přes reproduktor a výsledný zvuk jim o nízké frekvenci okolo 100 Hz připomínal řev lva, proto zavedené pojmenování. Termín se ve fyzikálních časopisech ujal.

V následujících kapitolách předkládám přehled dosavadních pozorování lvích řevů na družicích OGO-5, ISEE-1, ISEE-2, IMP6, Geotail, Equator-S, Cluster a Double Star TC-1.

2.3.2 Zdroje lvích řevů

Hned v počátku *Smith a kol.* [1969] zmiňují že lví řevy jsou pravděpodobně generovány vlnově-částicovými nestabilitami v turbulentním plazmatu mag-



Obrázek 2.10: První popsáný lví řev (převzato z *Smith a kol.* [1969]).

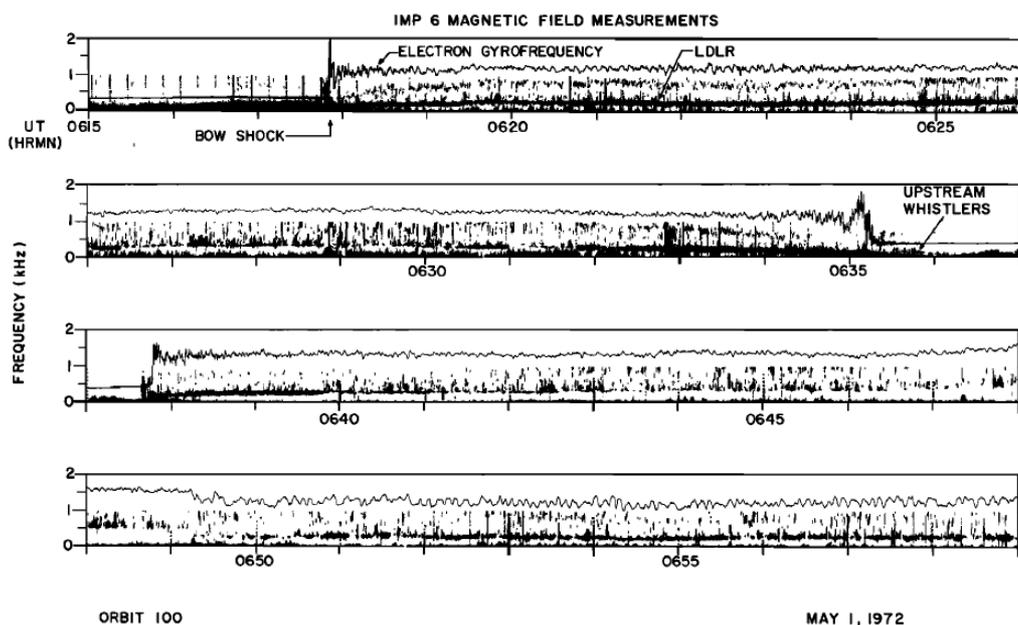
netoobálky Země. Později *Smith a Tsurutani* [1976] dávají lví řevy do souvislosti s poklesem magnetického pole, který během jejich pozorování nastává když se vlnové emise objeví a vrací se do přibližně původních hodnot po skončení série lvích řevů. Landauova rezonance se jim zdá málo pravděpodobná. Spíše se přikláněli k elektronové cyklotronové rezonanci způsobené elektronovou teplotní anizotropií (kolmá složka elektronové teploty vzhledem k magnetické siločáře je odlišná od té podélné). Podle *Kennel a Petscheck* [1966] může dojít ke generaci vlnové emise, pokud elektronová anizotropie přesáhne mez danou rovnicí:

$$\frac{T_{\perp} - T_{\parallel}}{T_{\parallel}} > \left(\frac{1}{(f/f_{CE}) - 1} \right) \quad (2.11)$$

(f/f_{CE}) značí poměr frekvence vlny k lokální elektronové cyklotronové frekvenci. *Thorne a Tsurutani* [1981] domněnku o elektronové teplotní anizotropii potvrzují svým pozorováním lvích řevů na družici ISEE-1. Podle nich se lví řevy generují pokud magnetický tlak ($p_B = B^2/2\mu_0$) klesne na hodnotu srovnatelnou s tlakem plazmatu ($p_D = nk(T_e + T_i)$). Při těchto podmínkách dochází k elektronové cyklotronné rezonanční nestabilitě, která produkuje

právě lví řevy.

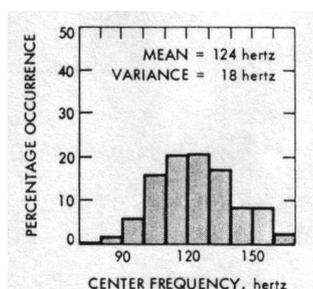
Tsurutani a kol. [1982] pozorovali na družicích ISEE-1 a ISEE-2, že lví řevy jsou spojeny s poklesem magnetického pole a zároveň s nárůstem koncentrace částic. *Rodriguez* [1985a] spojení lvích řevů s poklesem magnetického pole nepokládá za samozřejmé (viz obrázek 2.11). Spíše se přiklání k souvislosti s kvaziperpendikulární rázovou vlnou, v jejíž blízkosti je často pozoroval v datech z družice IMP6.



Obrázek 2.11: Spojení lvích řevů s vlnami hvizdového módu ve slunečním větru (převzato z *Rodriguez* [1985a]).

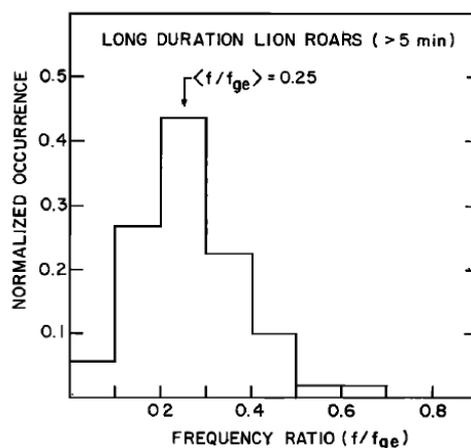
Lee a kol. [1987] diskutovali elektronovou dynamiku spojenou s vlnami v zrcadlovém módu. Zdroj lvích řevů připisují spíše iontové teplotní anizotropii než elektronové. Korelace mezi útlumem lvích řevů a nárůstem magnetického pole je pak podle nich dána Landauovým útlumem. *Zhang a kol.* [1998] na družici Geotail častěji viděli lví řevy nespojené s poklesem magnetického pole. Vysvětlují to však tak, že se lví řevy mohli k družici došírit od zdrojové oblasti, kde pokles magnetického pole pod kritickou hodnotu nastal.

2.3.3 Frekvenční vlastnosti lvích řevů



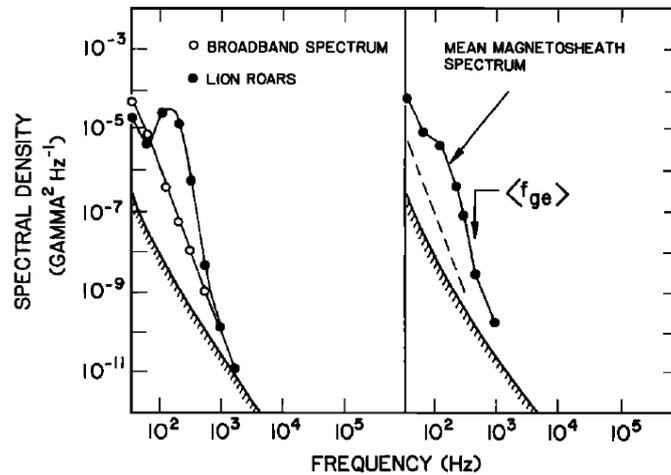
Obrázek 2.12: Rozdělení frekvencí lvích řevů (převzato z *Smith a Tsurutani* [1976]).

Podle *Smith a Tsurutani* [1976] má 90% lvích řevů na družici OGO-5 má frekvenci mezi 90 a 160 Hz (viz obrázek 2.12 a jsou přibližně na polovině elektronové cyklotronové frekvence. Přes 70% pozorovaných vlnových emisí trvalo dvě sekundy a méně. *Rodriguez* [1985a] používá měření družice IMP6. Ve své statistice se zajímá pouze o lví řevy trvající déle než pět minut, které pozoruje v blízkosti kvaziperpendikulární rázové vlny. Shledává, že normovaná frekvence lvích řevů na elektronovou cyklotronovou frekvenci je přibližně 0.25 (viz obrázek 2.13).



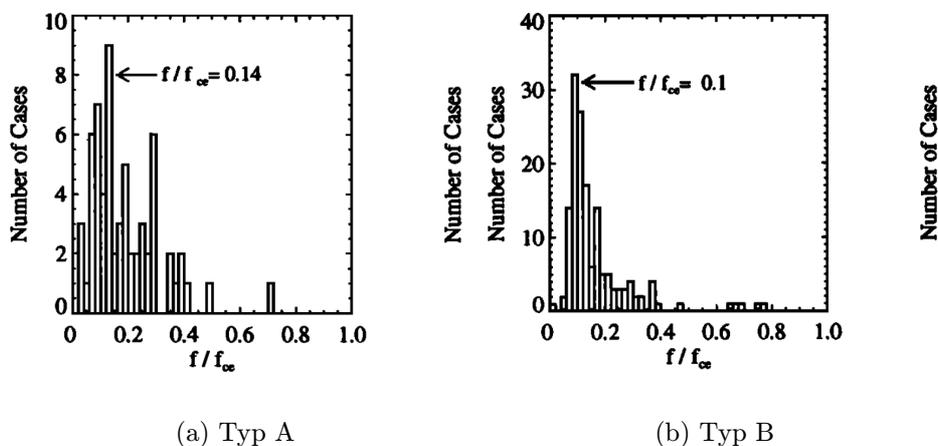
Obrázek 2.13: Rozdělení frekvencí dlouhotrvajících lvích řevů normalizovaných na lokální elektronovou cyklotronovou frekvenci (převzato z *Rodriguez* [1985a]).

Ve své další práci *Rodriguez* [1985b] srovnával lví řevy se širokopásmovým šumem v magneotoobálce (viz obrázek 2.14).



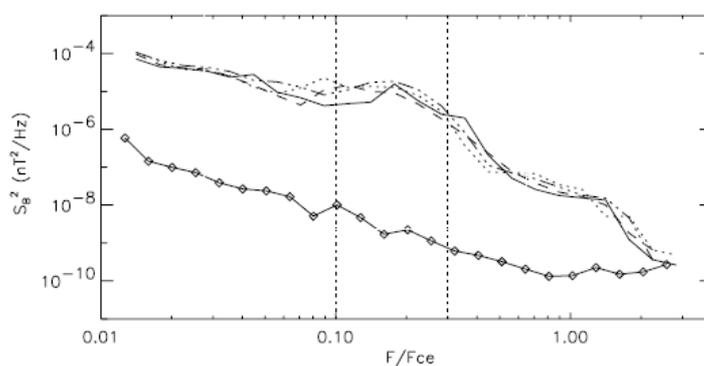
Obrázek 2.14: Srovnání výkonového spektra lvích řevů a širokopásmového šumu v Zemské magneotoobálce (převzato z *Rodriguez* [1985b]).

Zhang a kol. [1998] rozdělil své pozorované lví řevy na družici Geotail podle toho jestli jsou (typ A: 30% událostí) a nebo nejsou (typ B: 70% událostí) spojeny s poklesem lokálního magnetického pole. Poměr frekvencí lvích řevů k lokální elektronové cyklotronové frekvenci byl u typu A větší než u typu B (viz obrázky 2.15(a) a 2.15(b))



Obrázek 2.15: Rozdělení frekvencí lvích řevů normalizovaných na lokální elektronovou cyklotronovou frekvenci (převzato z *Zhang a kol.* [1998]).

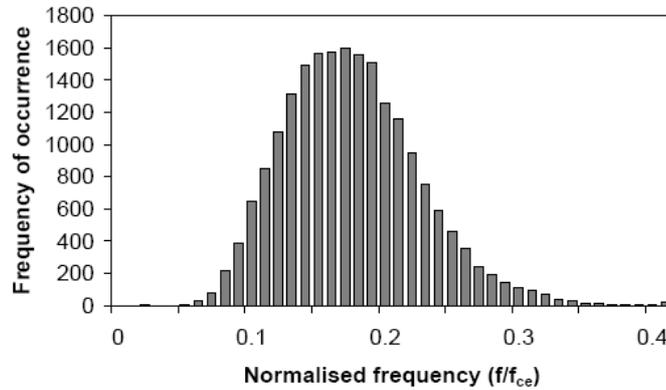
Případovou studii dvou událostí na večerní straně magnetoobálky pozorované družicí Cluster zpracovali *Maksimovic a kol.* [2001]. Výkonové spektrum normalizované na lokální elektronovou cyklotronovou frekvenci můžeme vidět na obrázku 2.16.



Obrázek 2.16: Čárové spektrum lvích řevů na večerní straně Zemské magnetoobálky (převzato z *Maksimovic a kol.* [2001]). Čtyři horní křivky představují družice Cluster 1 až Cluster 4. Spodní křivka nám udává citlivost použitého magnetometru.

Zatím nejnovější statistickou studii lvích řevů zveřejnili *Yearby a kol.* [2005]. V datech z družice Double Star TC-1 našli zhruba 20000 spekter

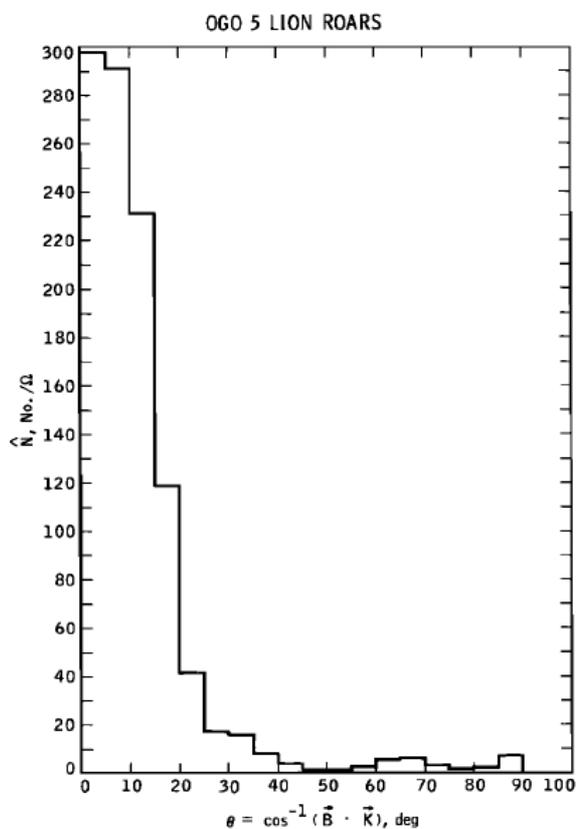
které zpracovali. Průměrná frekvence byla 117 Hz a frekvence normalizovaná lokální elektronovou cyklotronovou frekvencí byla 0.17 (viz obrázek 2.17).



Obrázek 2.17: Rozdělení frekvencí lvích řevů normalizovaných na lokální elektronovou cyklotronovou frekvenci (převzato z *Yearby a kol.* [2005]).

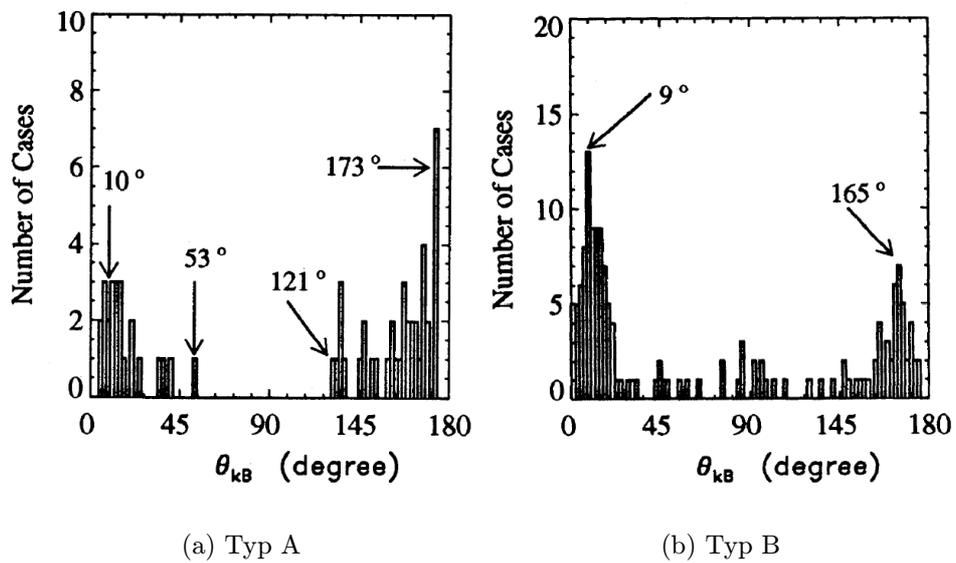
2.3.4 Polarizace a vlastnosti vlnových forem

Již při prvním pozorování *Smith a kol.* [1969] označili lví řevy za vlny šířící se ve hvizdovém módu, tj. s pravotočivou polarizací. V další práci *Smith a Tsurutani* [1976] již přímo měří úhly mezi vlnovým vektorem lvích řevů a magnetickým polem (viz obrázek 2.18). Pokud je úhel rovný 0° nebo 180° , jedná se o kruhově polarizovanou vlnu.

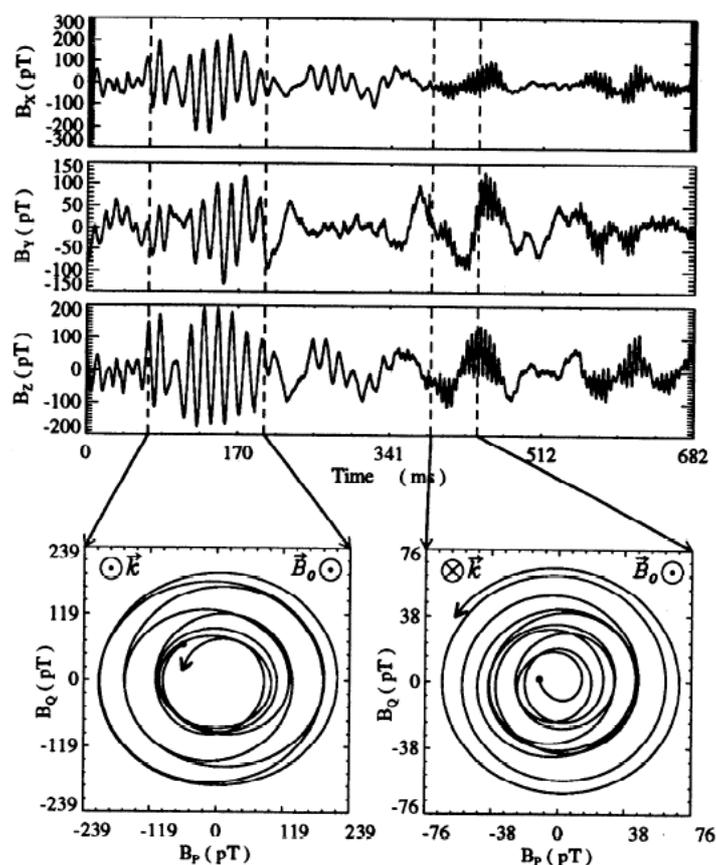


Obrázek 2.18: Rozdělení úhlů mezi vlnovými vektory lvích řevů a lokálním magnetickým polem (převzato z *Smith a Tsurutani* [1976]).

Zhang a kol. [1998] kombinovali měření elektrického a magnetického pole. Díky tomu mohli identifikovat i lví řevy šířící se proti směru lokálního magnetického pole (viz obrázky 2.19(a) a 2.19(b)). Své pozorování opět rozdělili na typ A spojený s poklesem magnetického pole a typ B bez poklesu a v obou případech pozorovali téměř pravotočivě kruhově polarizované vlny šířící se v obou směrech vzhledem k magnetickému poli. Ukázkový příklad vlnové formy dvou lvích řevů i s příslušnými hodogramy jsou na obrázku 2.20.

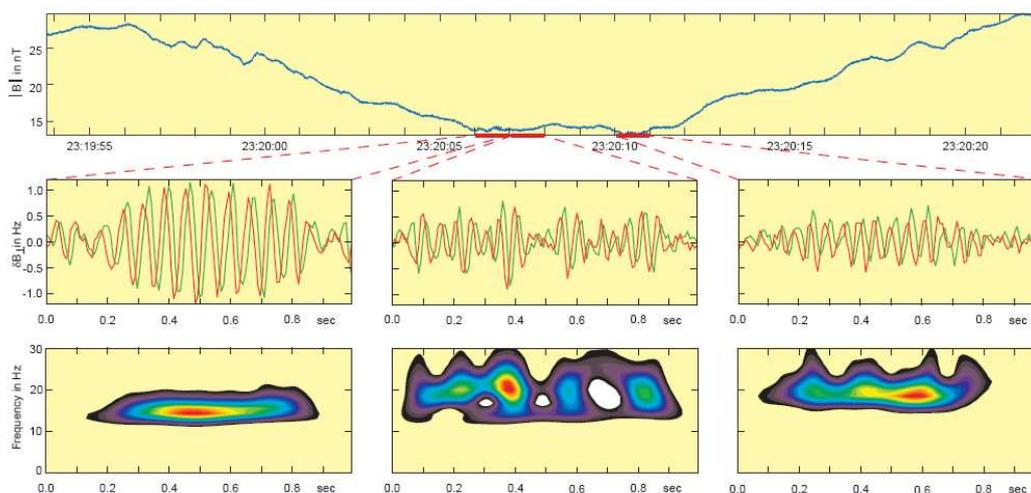


Obrázek 2.19: Rozdělení úhlů mezi vlnovými vektory lvích řevů a lokálním magnetickým polem (převzato z *Zhang a kol.* [1998]).



Obrázek 2.20: Vlnové formy dvou lvích řevů šířících se podél a proti magnetickému poli spolu i s příslušnými hodogramy (převzato z *Zhang a kol.* [1998]).

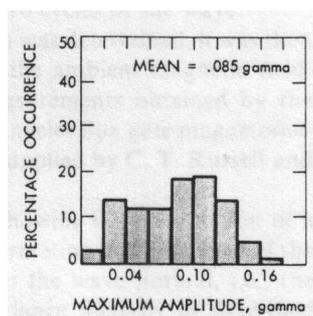
Baumjohann a kol. [1999] měli k dispozici velmi citlivý magnetometr na palubě družice Equator-S. Přestože měl zhora frekvenční omezení na 64 Hz, byl využit ke studiu jemné struktury lvích řevů. Na obrázku 2.21 můžete vidět průběh lokálního magnetického pole, vlnové formy ze dvou složek a waveletový spektrogram tří lvích řevů spojených s poklesem magnetického pole.



Obrázek 2.21: Průběh magnetického pole, vlnové formy tří lvích řevů s příslušnými waveletovými spektrogramy (převzato z *Baumjohann a kol.* [1999]).

2.3.5 Intenzita

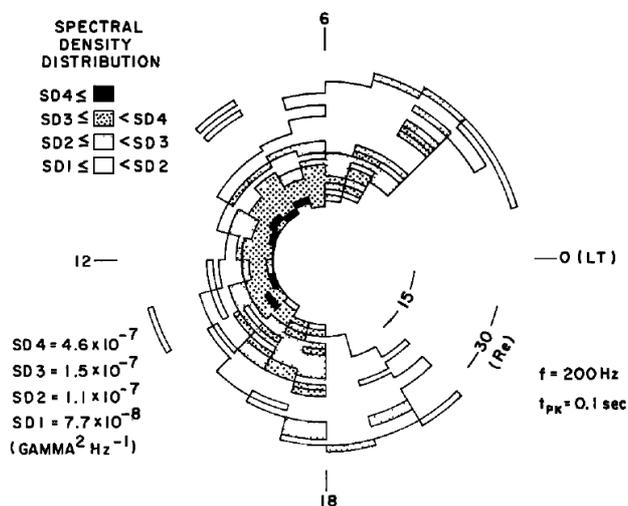
Smith a kol. [1969] označili lví řevy v definici jako intenzivní vlnové emise. Pozorovali amplitudu vln v řádu desítek nT (viz obrázek 2.10). O několik let později *Smith a Tsurutani* [1976] dospěli k průměrné hodnotě 0.085 nT (viz obrázek 2.22)



Obrázek 2.22: Histogram velikosti amplitudy (převzato z *Smith a Tsurutani* [1976]).

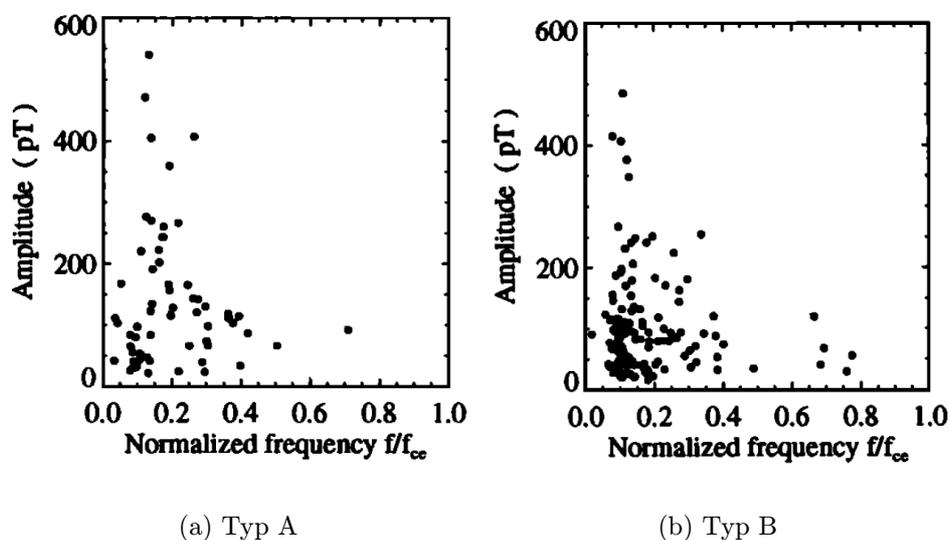
Rodriguez [1985b] studoval prostorové rozdělení spektrální výkonové hustoty fluktuací magnetického pole lvích řevů o frekvenci 200 Hz. Obrázek 2.23

ukazuje, že vlnové emise jsou intenzivnější u Zemské magnetopauzy než u rázové vlny.



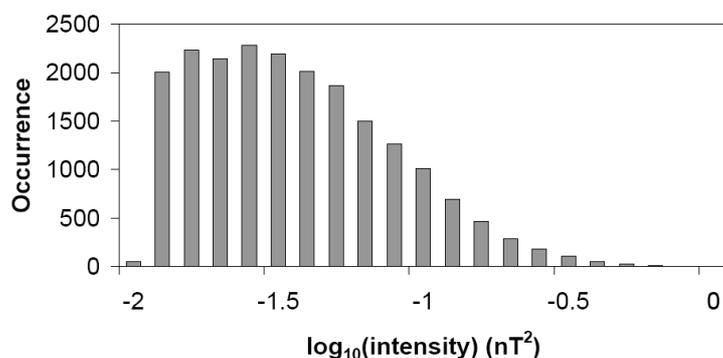
Obrázek 2.23: Prostorové rozdělení spektrální výkonové hustoty fluktuací magnetického pole lvích řevů o frekvenci 200 Hz (převzato z *Rodriguez* [1985b]).

Zhang a kol. [1998] porovnávali amplitudu lvích řevů s frekvencí normalizovanou lokální elektronovou cyklotronovou frekvencí. Svou studii opět rozdělili na typ A spojený s poklesem magnetického pole a typ B bez poklesu (viz obrázky 2.24(a) a 2.24(b)).



Obrázek 2.24: Rozdělení úhlů mezi vlnovými vektory lvích řevů a lokálním magnetickým polem (převzato z *Zhang a kol.* [1998]).

Yearby a kol. [2005] pozorovali lví řevy s průměrnou spektrální výkonovou hustotou fluktuací magnetického pole $9.57 \times 10^{-4} \text{ nT}^2/\text{Hz}$. Obrázek 2.25 ukazuje histogram integrovaného výkonu magnetického pole přes frekvence.



Obrázek 2.25: Histogram integrovaného spektrálního výkonu magnetické složky (převzato z *Yearby a kol.* [2005]).

Kapitola 3

Cíle práce

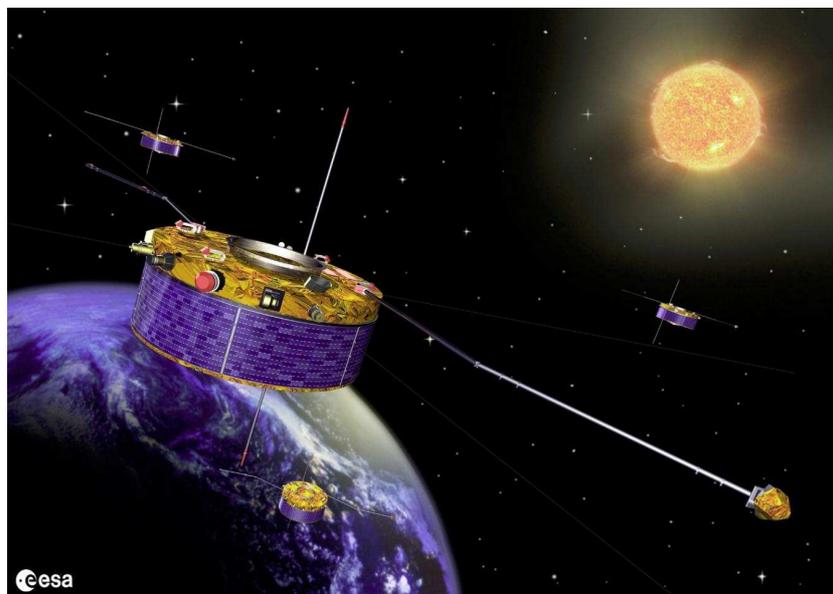
Předkládaná diplomová práce si klade za cíl lépe porozumět vlnovým emisím typu lví řev pozorovaných v Zemské magnetoobálce. K tomuto účelu je využit velký objem dat naměřený čtyřmi družicemi projektu Cluster během dvou let.

Hlavní předměty mého zkoumání jsou následující:

- Kde všude družice Cluster pozoruje emise typu lví řev?
- Jaké je rozdělení frekvencí lvích řevů a jejich vztah k lokální elektronové cyklotronové frekvenci?
- Jaká je intenzita hustoty fluktuací elektrického a magnetického pole lvích řevů?
- Jakým směrem vzhledem k Zemi se pozorované lví řevy šíří?
- Jakou mají lví řevy jemnou strukturu?
- Jak se shodují pozorované zpoždění lvích řevů mezi družicemi s teorií šíření vln ve studeném plazmatu?

Kapitola 4

Zdroj dat



Obrázek 4.1: Družice Cluster (převzato z <http://sci.esa.int/cluster/>).

4.1 Základní vlastnosti družic CLUSTER

Hlavním záměrem družic projektu CLUSTER (viz obrázek 4.1) je trojrozměrné studium struktur Zemské magnetosféry a jejího okolí. První myšlenka o vývoji čtyř identických družic v Evropské kosmické agentuře (ESA) se objevila již v listopadu 1982. Ke schválení projektu došlo až o celé čtyři roky

později. Po deseti letech vývoje byly všechny čtyři družice připraveny k vypuštění. Start 4.června 1996 na francouzské nosné raketě ARIANE-5 se však bohužel díky softwarové chybě nezdařil. Přes obrovskou ztrátu ESA zaplatila znovupostavení družic CLUSTER. A tak v roce 2000 došlo opětovnému vypuštění tentokrát ruskou nosnou raketou Sojuz. První dvojice družic byla vynesena na oběžnou dráhu 16. července a druhá 9. srpna. Základní parametry družic CLUSTER jsou uvedeny v tabulce 4.1. Každá družice nese na palubě 11 přístrojů. Ve své práci jsem použil data hlavně z přístroje STAFF-SA a WBD, které zevrubněji popíší v následujících kapitolách.

Průměr	2.9 m
Výška	1.3 m
Hmotnost	1200 kg
Perigeum	19000 km
Apogeum	119000 km
Perioda rotace	4 s
Perioda oběhu	57 hodin

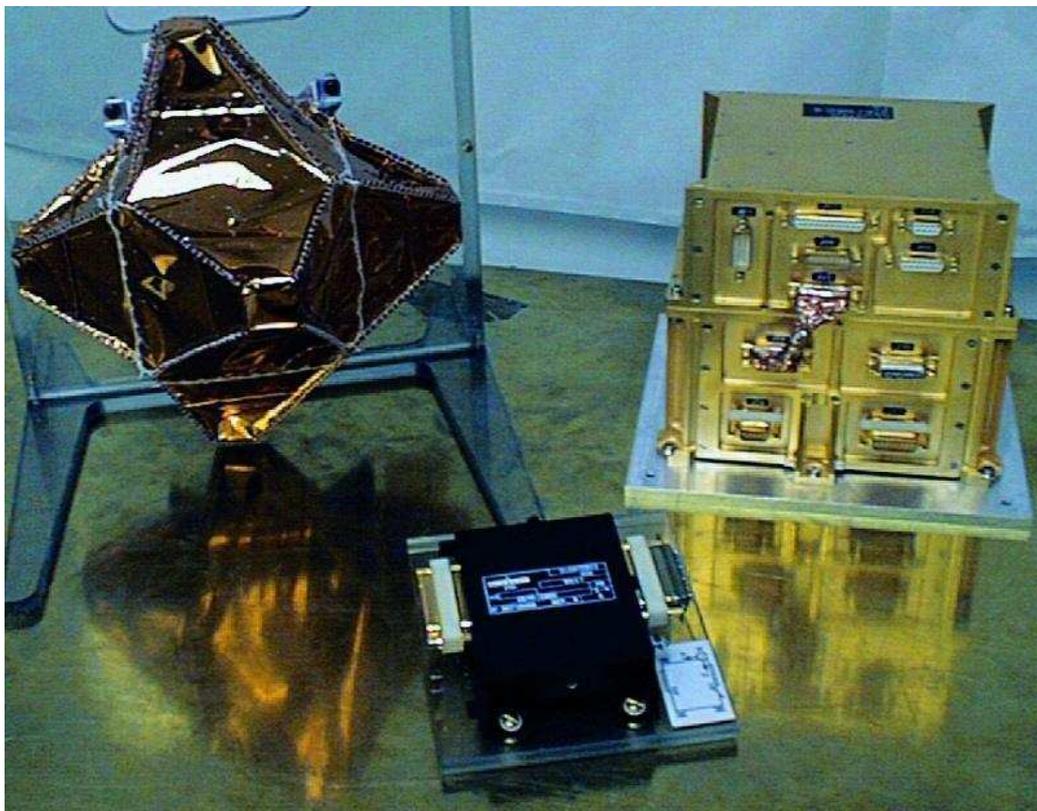
Tabulka 4.1: Základní parametry družic CLUSTER (převzato z <http://sci.esa.int/cluster/>).

4.2 Přístroj STAFF

Spatio Temporal Analysis Field Fluctuations (STAFF) je součástí souboru vlnových přístrojů Wave Experiment Consortium (*Cornilleau-Wehrlin a kol.* [2003]). STAFF (viz obrázek 4.2) se skládá z tříosého pulzačního cívkového magnetometru určeného k měření magnetických fluktuací od 0.1 Hz až 4 kHz, výkonnostního předzesilovače a ze schránky, v níž se nachází samotné dva vyhodnocující přístroje: spektrální analyzátor (SA) a analyzátor vlnových forem (SC). Ve své práci jsem používal data z přístroje STAFF-SA, proto jej popíší zevrubněji v následující kapitole.

4.3 Přístroj STAFF-SA

Francouzský přístroj STAFF-SA zpracovává signál z pulzačního cívkového magnetometru (tři komponenty magnetického pole) a ze dvou antén experimentu EFW (dvě komponenty elektrického pole). V normálním režimu se



Obrázek 4.2: Přístroj STAFF (převzato *Cornilleau-Wehrlin a kol. [2003]*).

vezme přibližně čtyř sekundový interval (v burst režimu pouze jedno vteřinový) a na těchto pět komponent se provádí přímo na palubě vícerozměrná spektrální analýza. Data se následně zpracovávají ve třech frekvenční pásmech:

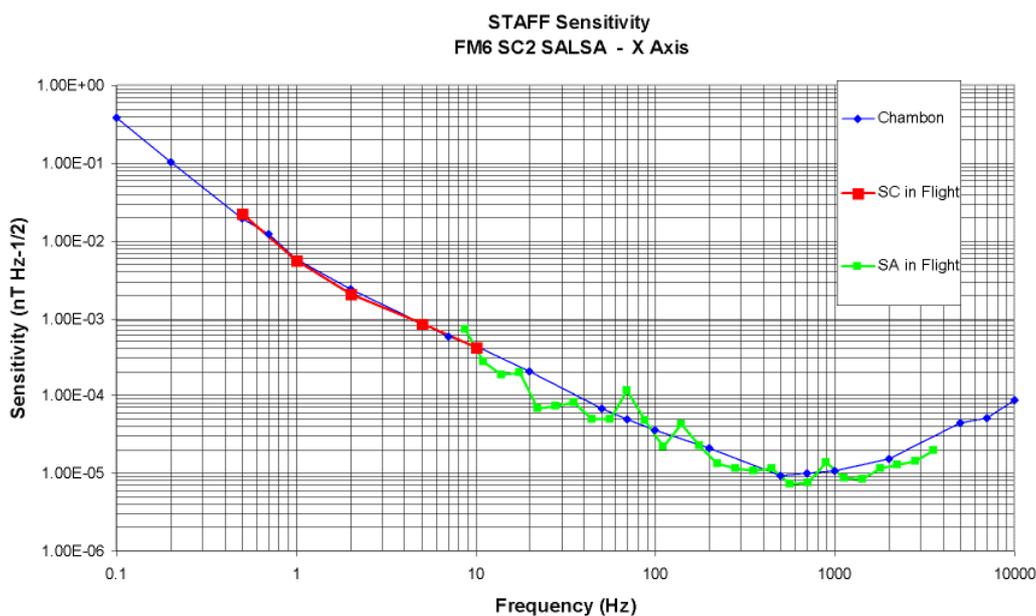
- pásmo A: 8 Hz - 164 Hz
- pásmo B: 64 Hz - 512 Hz
- pásmo C: 512 Hz - 4048 Hz

Každé frekvenční pásmo je rozděleno na devět podpásem. Celkem se tedy generuje každé čtyři vteřiny v normálním režimu (resp. jednu vteřinu v burst

módu) 27 spektrálních hermitovských matic, jež mají následující tvar:

$$A = \begin{pmatrix} B_x^2 & B_x \cdot B_y^* & B_x \cdot B_z^* & B_x \cdot E_x^* & B_x \cdot E_y^* \\ B_y \cdot B_x^* & B_y^2 & B_y \cdot B_z^* & B_y \cdot E_x^* & B_y \cdot E_y^* \\ B_z \cdot B_x^* & B_z \cdot B_y^* & B_z^2 & B_z \cdot E_x^* & B_z \cdot E_y^* \\ E_x \cdot B_x^* & E_x \cdot B_y^* & E_x \cdot B_z^* & E_x^2 & E_x \cdot E_y^* \\ E_y \cdot B_x^* & E_y \cdot B_y^* & E_y \cdot B_z^* & E_y \cdot E_x^* & E_y^2 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Diagonální členy spektrální matice nám udávají intenzitu pozorované vlny. Z těchto dat můžeme pomocí pokročilých technik získat informaci například o polarizaci, planaritě, koherenci, směru šíření apod. Kromě spektrálních matic přístroj STAFF-SA generuje ještě data obsahující pouze diagonální členy spektrálních matic avšak se čtyřikrát vyšším časovým rozlišením. Citlivost přístroje v používaném frekvenčním rozsahu se pohybovala mezi 10^{-4} až 10^{-5} nT²/Hz (viz obrázek 4.3).



Obrázek 4.3: Citlivost přístroje STAFF na Cluster-2 (převzato z *Cornilleau-Wehrlin a kol. [2003]*).

4.4 Přístroj WBD

WideBand Data instrument (viz obrázek 4.4) nám poskytuje měření s vysokým rozlišením elektrických i magnetických fluktuací ve vybraných frekvenč-



Obrázek 4.4: Přístroj WBD (převzato z *Gurnett a kol.* [1997]).

ních pásmech od 100 Hz až do 577 kHz (*Gurnett a kol.* [1997]). Vlnové formy z přístroje WBD jsou přímo na palubě digitalizovány a přenášeny na Zem v reálném čase (ostatní přístroje projektu Cluster používají mezipaměť). Až na Zemi se na data provádí rychlá Fourierova transformace, která určí frekvenční a časové rozlišení. Základní vlastnosti přístroje WBD jsou shrnuty v tabulce 4.2

Senzory	2 elektrické složky (E_y a E_z) 2 magnetické složky (B_x a B_y)
Převodní frekvence	0, 125 kHz, 250 kHz, 500 kHz
Pásmové filtry	1 kHz až 77 kHz 50 Hz až 19 kHz 25 Hz až 9.5 kHz
Frekvenční rozlišení	určené Fourierovou analýzou
Časové rozlišení	10-20 msec (na každé FFT spektrum)
Výběr zisku	5 dB krok, 16 úrovní, dynamický rozsah 75 dB, automatické nebo řízené škálování
A/D převodník	1-bit, 4-bit, nebo 8-bit rozlišení pro zvolený vzorkovací poměr
Hmotnost	1.67 kg
Příkon	1.57 W

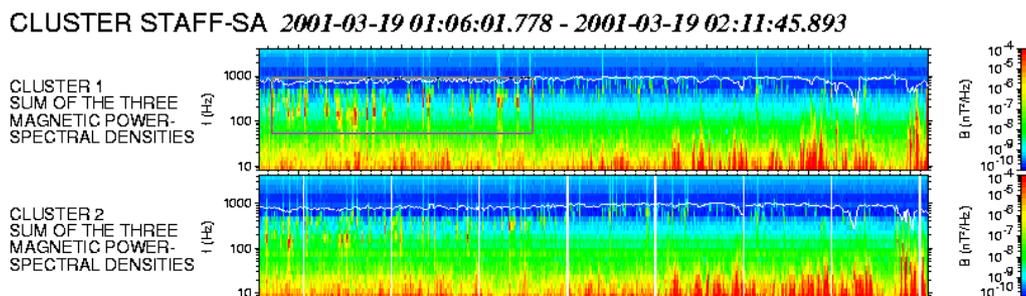
Tabulka 4.2: Základní vlastnosti přístroje WBD (převzato z *Gurnett a kol.* [1997]).

Kapitola 5

Metody analýzy

5.1 Program INTERVAL

Výsledky předkládané diplomové práce jsou převážně založeny na statistické studii vlastností lvích řevů. Abych zefektivnil výběr intervalů obsahujících lví řevy z velkého množství naměřených dat, napsal jsem si k tomu to účelu speciální program INTERVAL ve vývojovém prostředí IDL (Interactive Data Language). Jeho pomocí snadno mohu procházet tisíce spektrogramů a metodou výběrového rámečku označovat emise typu lví řev jak v čase tak i ve frekvenci (viz obrázek 5.1). Program INTERVAL ihned vytváří seznam rozsahů časů a frekvencí.



Obrázek 5.1: Příklad výběru emisí typu lví řev programem INTERVAL.

5.2 Program PRASSADCO

PRASSADCO (PRopagation Analysis of STAFF-SA Data with COherency tests) je speciální program určený pro kvalitativní analýzu dat z přístroje STAFF-SA (*Santolík* [2003]). Vstupními soubory jsou družicová data (spetrální matice SM, PSD soubory a AUX soubory obsahující informace o poloze družice a lokálním magnetickým poli) a kontrolní soubor obsahující instrukce co se s nimi má dělat. Jeho výstupem jsou jak grafické soubory (např. PS, PNG, apod.), tak i speciální datový formát prostředí IDL, který byl použit v této práci. Popis metod v programu PRASSADCO a jejich použití naleznete například v *Santolík a kol.* [2001], *Santolík a kol.* [2002] nebo *Santolík a kol.* [2003]. Pro určení vlastností vlnového vektoru jsem používal metodu singular value decomposition (SVD) podobně popsanou v *Santolík a kol.* [2003] nebo *Santolík a kol.* [2006].

5.3 Program wbd2psd

Při vyhodnocování měření z přístroje WBD jsem používal program wbd2psd. S jeho pomocí jsem mohl jednoduše načítat data ze vzdáleného serveru v Iowa city, kde byl přístroj vyroben. Dále mi pak poskytoval možnost převodu do formátu PSD, který jsem mohl přímo zpracovat pomocí programu PRASSADCO (*Santolík* [2003]). Užitečnou funkcí byla i tvorba zvukových souborů ve formátu wav (*Santolík a kol.* [2004]).

Kapitola 6

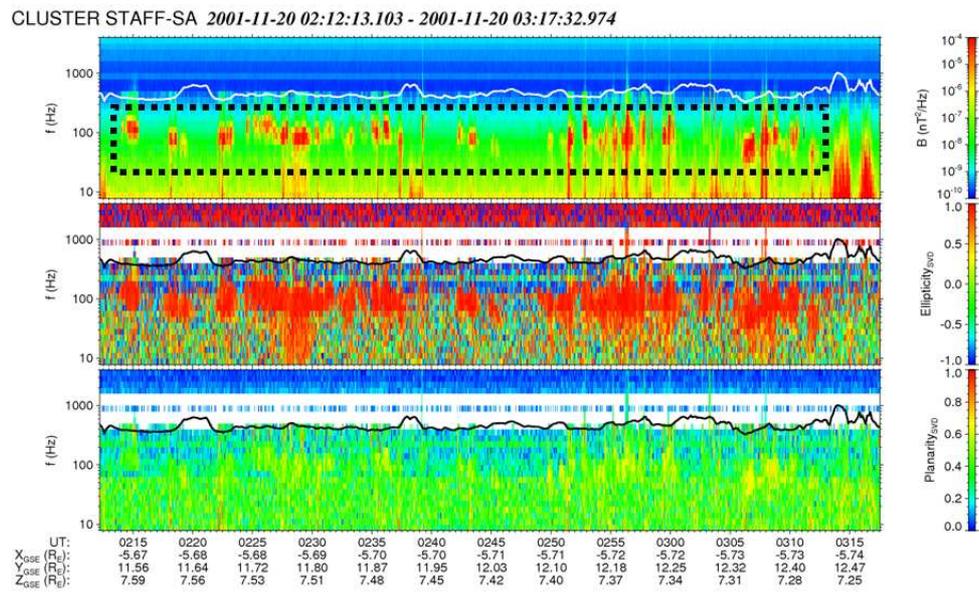
Vlastní výsledky a jejich diskuze

6.1 Získání datového souboru

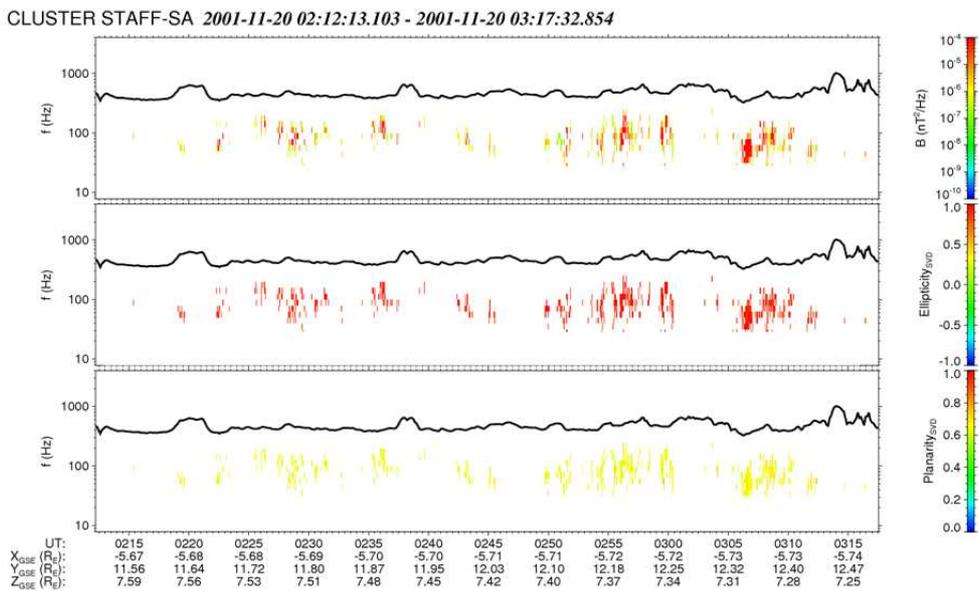
Na začátku jsem zpracoval první dostupný rok dat z družic Cluster. I když Cluster byl vypuštěn už v červenci a srpnu 2000, přístroj STAFF-SA (viz kapitola 4.3) začal kontinuálně měřit až v únoru 2001. Prošel jsem tedy časový úsek 2001-02 až 2002-02 a našel jsem 2908 intervalů, kdy družice pozorovaly lví řevy. Celkový zpracovávaný čas je 1178 hodin. Pro vytvoření seznamu intervalů jsem použil program INTERVAL (viz kapitola 5.1). Získané intervaly jsem zpracoval programem PRASSADCO (viz kapitola 5.2). Použil jsem tři kritéria pro prahování:

- Fluktuace magnetického pole $B_{\text{SUM}} > 10^{-7} \text{ nT}^2/\text{Hz}$
- Elipticita vlnové emise počítaná metodou SVD > 0.8
- Planarita vlnové emise počítaná metodou SVD > 0.6

Porovnání původního a oprahovaného spektrogramu můžete vidět na obrázku 6.1 a 6.2. Každý bod na obrázku 6.2 reprezentuje jednu spektrální matici (viz rovnice 4.1) a zároveň jeden bod ve zpracovávaném datovém souboru. Takto jsem obdržel 578752 spektrálních matic pro statistickou studii.



Obrázek 6.1: Příklad výběru emisí typu lví řev programem INTERVAL (nepřahovaný).

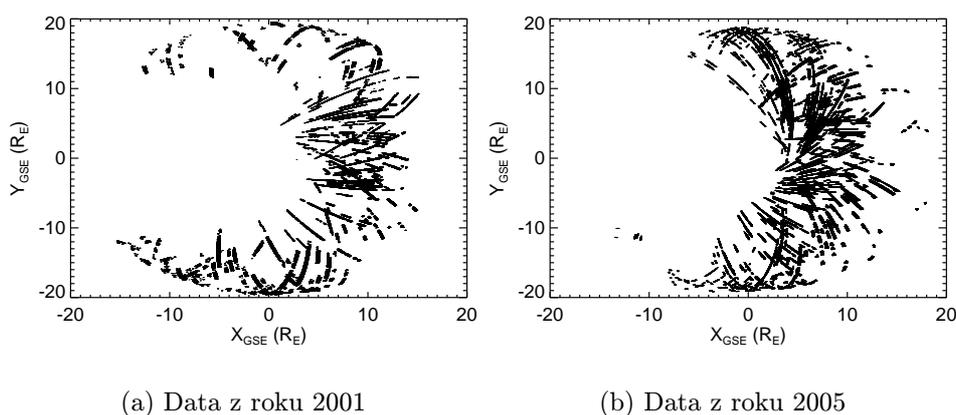


Obrázek 6.2: Příklad výběru emisí typu lví řev programem INTERVAL (oprahovaný).

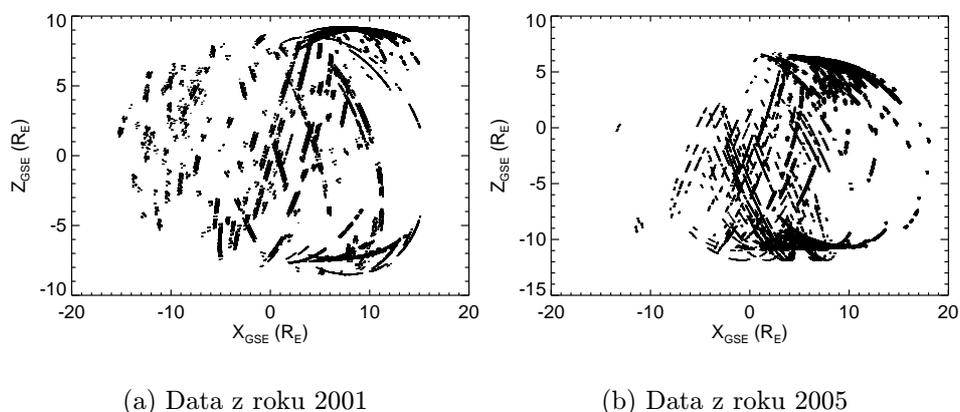
Pro srovnání jsem přesně stejným způsobem zpracoval data za rok 2005, kdy bylo období nízké sluneční aktivity. Nalezl jsem 2216 časově-frekvenčních intervalů obsahující lví řevy s celkovou délkou 499 hodin. Při použití prahů jsem získal dalších 574470 datových bodů ke zpracování. Rok 2005 jsem zpracovával s velkým časovým odstupem od procházení roku 2001 a proto zkušeněji. Ačkoli jsem vybíral přibližně poloviční časové intervaly oproti roku 2001, po použití stejných prahů jsem obdržel podobný počet datových bodů.

6.2 Prostorové rozdělení pozorovaných lvích řevů

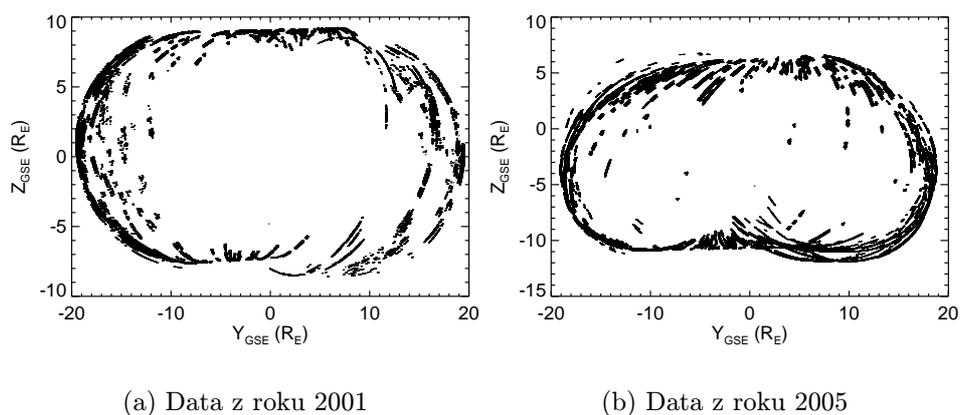
Na začátku jsem se zajímal především o to, kde všude jsou lví řevy pozorovány. Obrázky 6.3(a) a 6.3(b) ukazují kde všude družice měřily lví řevy v rovině XY při použití souřadnic GSE (viz příloha A). Je vidět že lví řevy pokrývají celou magnetoobálku a to především její subsolární část. Na obrázcích 6.4(a) a 6.4(b) vidíme rozložení v rovině XZ. Zatímco dráha družic Cluster byla v roce 2001 v komponentě Z zhruba rovnoměrná (Z_{GSE} se pohybovalo mezi -10 a 10 Zemskými poloměry), v roce 2005 letály družice spíše na jižní straně ($-12 < Z_{\text{GSE}} < 7$). To jistě ovlivnilo naše statistické zpracování. Díky specifické dráze družic Cluster nám bohužel chybí pokrytí čelní části Zemské magnetoobálky (nosu), jak to můžeme vidět na obrázku 6.5(a) a 6.5(b).



Obrázek 6.3: Polohy kde družice měřily emise typu lví řev (rovina XY v GSE souřadnicích).



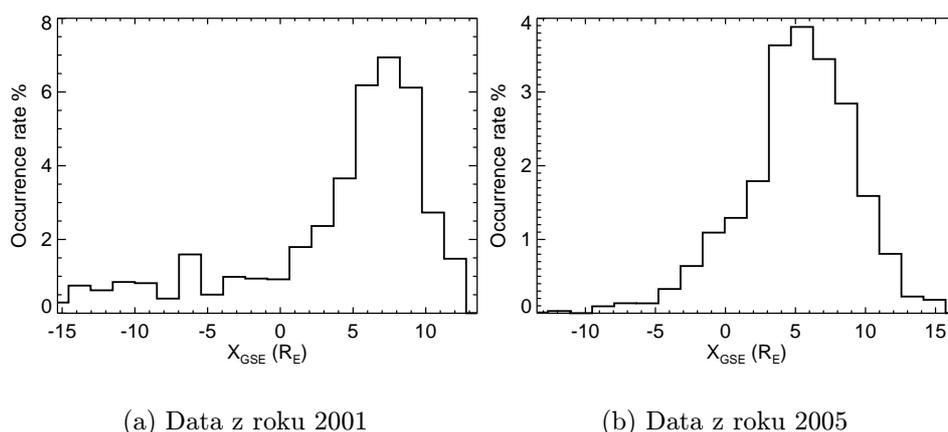
Obrázek 6.4: Polohy kde družice měřily emise typu lví řev (rovina XZ v GSE souřadnicích).



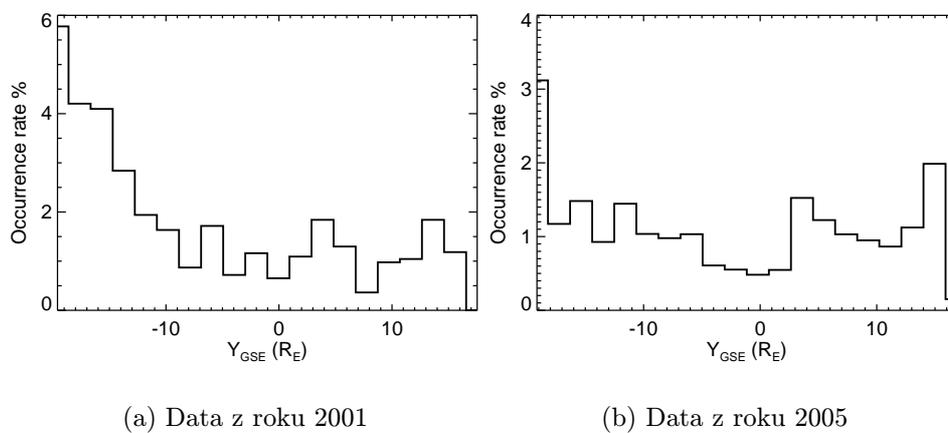
Obrázek 6.5: Polohy kde družice měřily emise typu lví řev (rovina YZ v GSE souřadnicích).

Díky Keplerovým zákonům se Cluster pohybuje různě rychle podle toho jak je daleko od středu Země. Aby sme odstranili tato zkreslení našeho datového souboru, normalizovali jsme naměřené polohy na dráhu družice za celý konkrétní rok následujícím způsobem. Nejdříve jsme si spočítali nenormalizovaný histogram poloh družic kdy byly pozorovány lví řevy. Poté jsme si spočítali histogram poloh družic kdy měřily během celého roku v mezích daných nenormalizovaným histogramem. Získané histogramy jsme mezi sebou

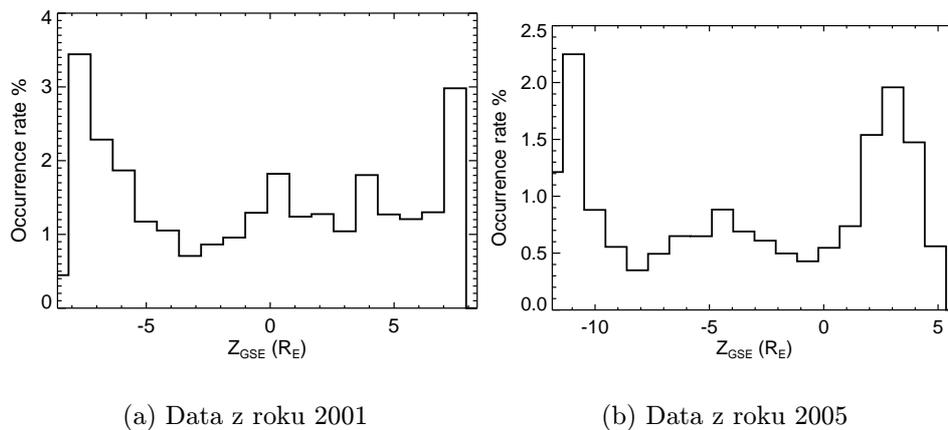
vydělili. Tím jsme získali spodní odhad četnosti výskytu (occurrence rate) ve sledované komponentě. Pro zpřesnění výsledků bychom potřebovali normalizovat histogram na dráhu družic pouze v magnetoobálce. K tomu bychom mohli použít model polohy rázové vlny a magnetopauzy, anebo ještě lépe seznamy reálných průchodu družic Cluster rázovou vlnou a magnetopauzou ve sledovaném období v letech 2001 a 2005. Obrázky 6.6 až 6.8 jsou normalizované histogramy poloh v GSE souřadnicích vztahované na dráhu družice v konkrétním roce. Na obrázcích 6.6(a) a 6.6(b) je vidět, že družice Cluster pozorovaly lví řevy opravdu více v subsolární části magnetoobálky. Zatímco na obrázku 6.7(a) z roku 2001 můžeme vidět poměrně silnou závislost mezi Y_{GSE} a pozorováním lvích řevů, výsledky zpracování z roku 2005 to již neukazují (viz obrázek 6.7(b)). Obrázky 6.8(a) a 6.8(b) vypovídají o spíš o dráze družice, jelikož se Cluster pohyboval v Z_{GSE} složce nerovnoměrně.



Obrázek 6.6: Normalizovaný histogram X-ové souřadnice kdy družice měřily emise typu lví řev (v GSE souřadnicích).



Obrázek 6.7: Normalizovaný histogram Y-ové souřadnice kdy družice měřily emise typu lví řev (v GSE souřadnicích).



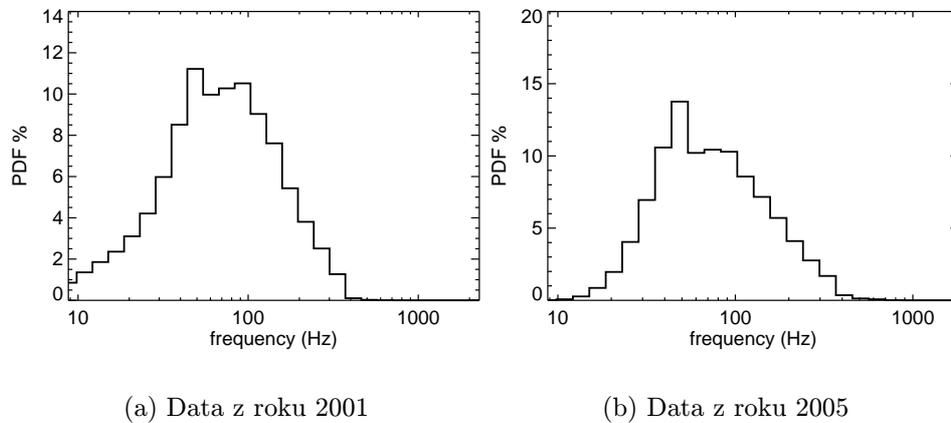
Obrázek 6.8: Normalizovaný histogram Z-ové souřadnice kdy družice měřily emise typu lví řev (v GSE souřadnicích).

6.3 Frekvenční rozdělení pozorovaných lvích řevů

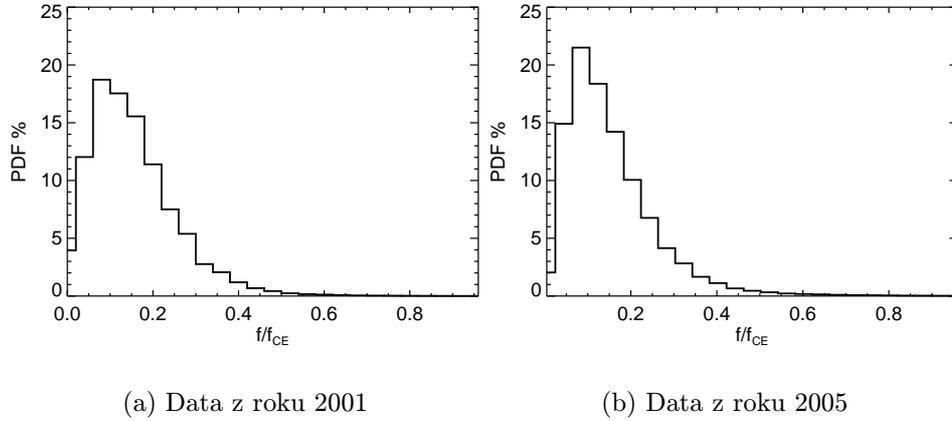
Rok	2001	2005
\bar{f} (Hz)	107	114
\tilde{f} (Hz)	88	88
$\bar{f}/\bar{f}_{\text{CE}}$	0.18	0.18
$\tilde{f}/\tilde{f}_{\text{CE}}$	0.16	0.15

Tabulka 6.1: Shrnutí frekvenčních vlastností pozorovaných lvích řevů.

V tabulce 6.1 jsou shrnuty průměry a mediany frekvencí a normalizovaných frekvencí vzhledem k lokální elektronové cyklotronové frekvenci. Mezi zpracovanými lety 2001 a 2005 není větší rozdíl. Mediany frekvencí jsou dokonce identické. Naše výsledky se obecně shodují s dosavadním pozorováním (např. *Smith a Tsurutani* [1976], *Zhang a kol.* [1998] nebo *Yearby a kol.* [2005]). Na obrázcích 6.9 a 6.10 jsou příslušné histogramy.



Obrázek 6.9: Histogram frekvencí pozorovaných lvích řevů.



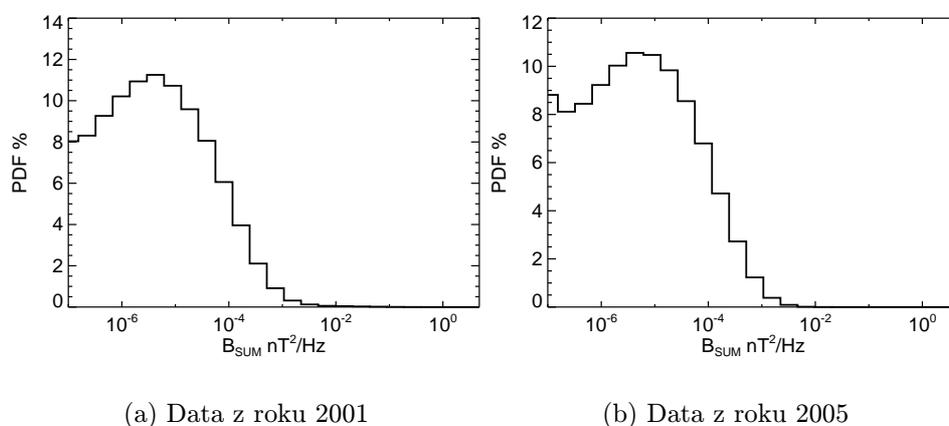
Obrázek 6.10: Histogram frekvencí pozorovaných lvích řevů normovaných na lokální elektronovou cyklotronovou frekvenci.

6.4 Rozdělení intenzit pozorovaných lvích řevů

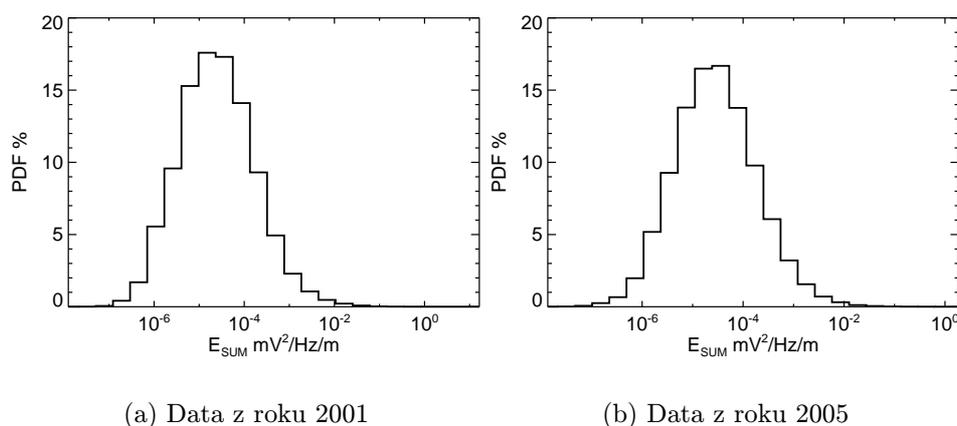
Rok	2001	2005
$\overline{B}_{\text{SUM}}$ (nT ² /Hz)	1.80×10^{-4}	9.12×10^{-5}
\tilde{B}_{SUM} (nT ² /Hz)	5.78×10^{-6}	6.87×10^{-6}
$\overline{E}_{\text{SUM}}$ (mV ² /m ² /Hz)	7.69×10^{-4}	5.94×10^{-4}
\tilde{E}_{SUM} (mV ² /m ² /Hz)	4.51×10^{-5}	5.12×10^{-5}

Tabulka 6.2: Shrnutí vlastností intenzit pozorovaných lvích řevů.

Tabulka 6.2 obsahuje přehled průměrů a medianů intenzit lvích řevů. $\overline{B}_{\text{SUM}}$ značí spektrální výkonovou hustotu fluktuací magnetického pole. $\overline{E}_{\text{SUM}}$ je spektrální výkonová hustota fluktuací elektrického pole. Výsledky zpracování z let 2001 a 2005 jsou si dost podobné. Zatímco *Rodriguez* [1985b] pozoroval lví řevy s řádově nižší spektrální výkonovou hustotu fluktuací magnetického pole (viz obrázek 2.23), *Yearby a kol.* [2005] mají výsledky hodně podobné těm našim. Na obrázcích 6.11 a 6.12 můžete vidět příslušné histogramy. Připomínám, že měření se spektrální výkonovou hustotu fluktuací magnetického pole nižší než 10^{-7} nT²/Hz byly vyřazeny z analýzy.



Obrázek 6.11: Histogram spektrální výkonové hustoty fluktuací magnetického pole pozorovaných lvích řevů.

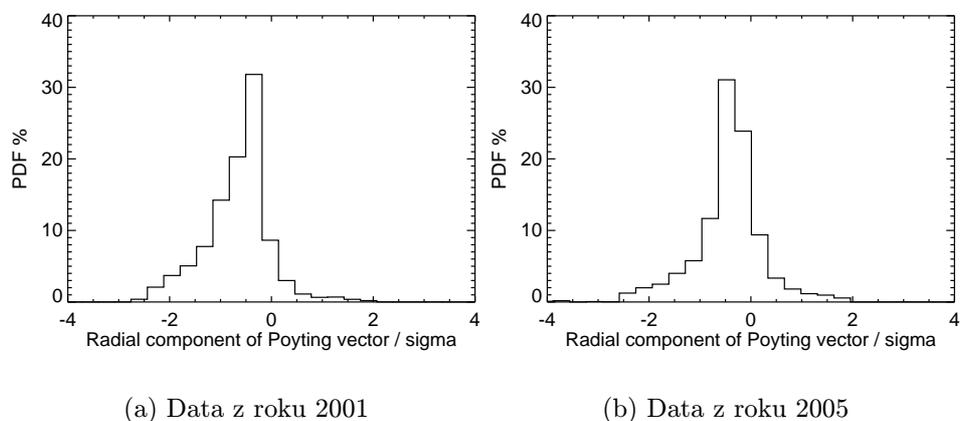


Obrázek 6.12: Histogram spektrální výkonové hustoty fluktuací elektrického pole pozorovaných lvích řevů.

6.5 Vlastnosti šíření pozorovaných lvích řevů

Přístroj STAFF-SA nám poskytuje měření tří komponent magnetického pole a dvou elektrického současně (*Cornilleau-Wehrlin a kol.* [2003]). Díky tomu můžeme vypočítat Z_{MFA} (rovnoběžnou s magnetickým polem) komponentu Poytingova vektoru normalizovanou jeho standardní odchylkou (*Santolík*

[2003]). Ta nám říká jestli se vlnová emise šíří paralelně nebo antiparalelně vzhledem k magnetickému poli. Zajímali jsme se o to, jestli se lví řevy obecně šíří směrem k Zemi, od Země, a nebo oběma směry jak našli *Zhang a kol.* [1998]. Proto jsme určili jestli má magnetické pole význačnou radiální složku. Všechna měření, při nichž radiální komponenta vzhledem k Zemi byla menší než 30% celkového magnetické pole jsem neuvažovali. Poté jsme znaménkem této radiální komponenty vynásobili Z_{MFA} . Naše výsledky ukazují, že drtivá většina pozorovaných lvích řevů se šířila směrem k Zemi (viz obrázky 6.13(a) a 6.13(b)). To může svědčit o možném zdroji lvích řevů v blízkosti Zemské rázové vlny.

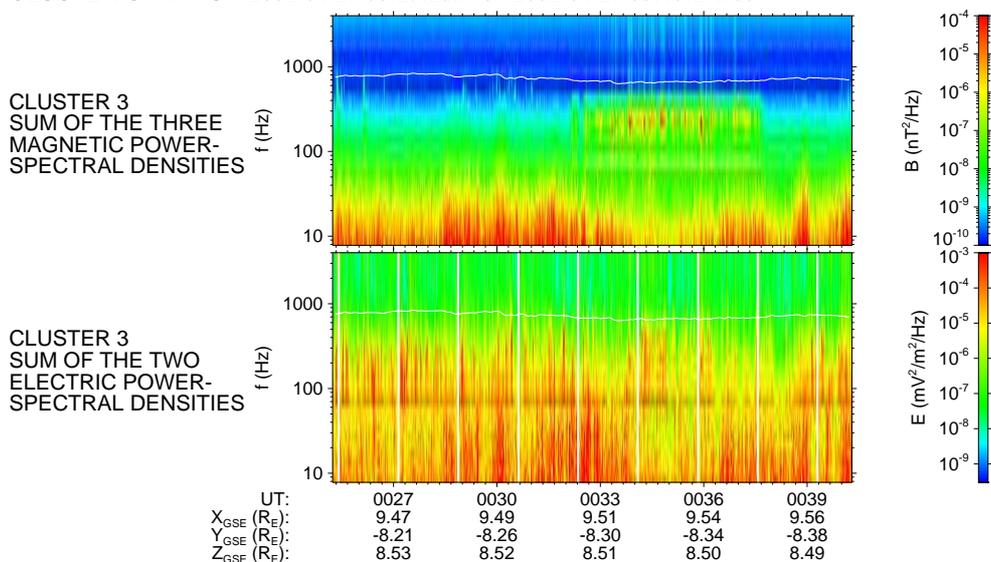


Obrázek 6.13: Histogram radiální komponenty Poyntingova vektoru normalizovaný jeho standardní odchylkou pozorovaných lvích řevů.

6.6 Pozorování lvích řevů z přístroje WBD

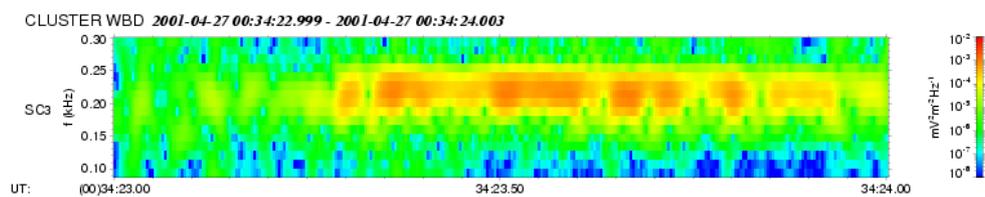
6.6.1 Jemná struktura

CLUSTER STAFF-SA 2001-04-27 00:25:13.978 - 2001-04-27 00:40:17.933

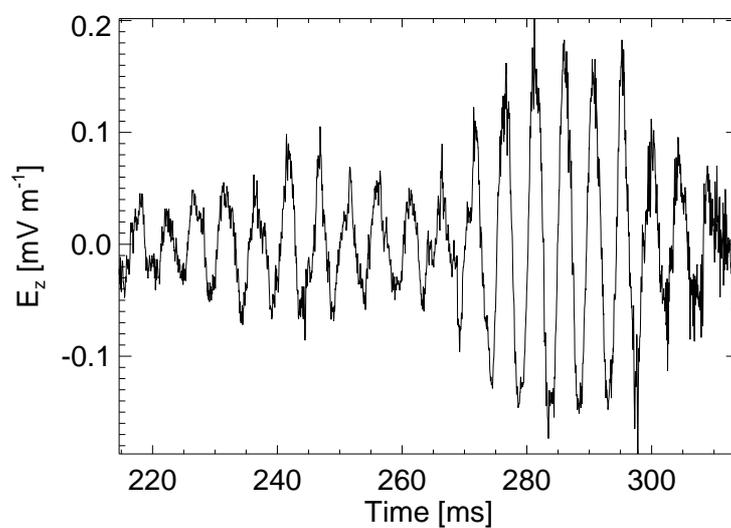


Obrázek 6.14: Příklad série vlnových emisí typu lví řev z měření přístroje STAFF-SA na družici Cluster 3.

Přístroj WBD nám díky vysokému časovému rozlišení umožňuje studium jemné struktury emisí typu lví řev. Pro zpracování dat z WBD jsem použil program wbd2psd (viz kapitola 5.3). Abych našel vhodný interval pozorování lvích řevů, prošel jsem si nejříve data z přístroje STAFF-SA s nižším časovým rozlišením. Na obrázku 6.14 můžete vidět výkonový spektrogram magnetické i elektrické složky zhruba pětiminutové série lvích řevů z přístroje STAFF-SA. Na dalším obrázku (6.15) je jednosekundový výřez z přístroje WBD, na kterém je již vidět jemná uzko-pásmová struktura lvích řevů. Příslušná vlnová forma je zachycena na obrázku 6.16, kde můžeme rozpoznat dva vlnové balíky. Naše pozorované lví řevy mají diskrétní strukturu.

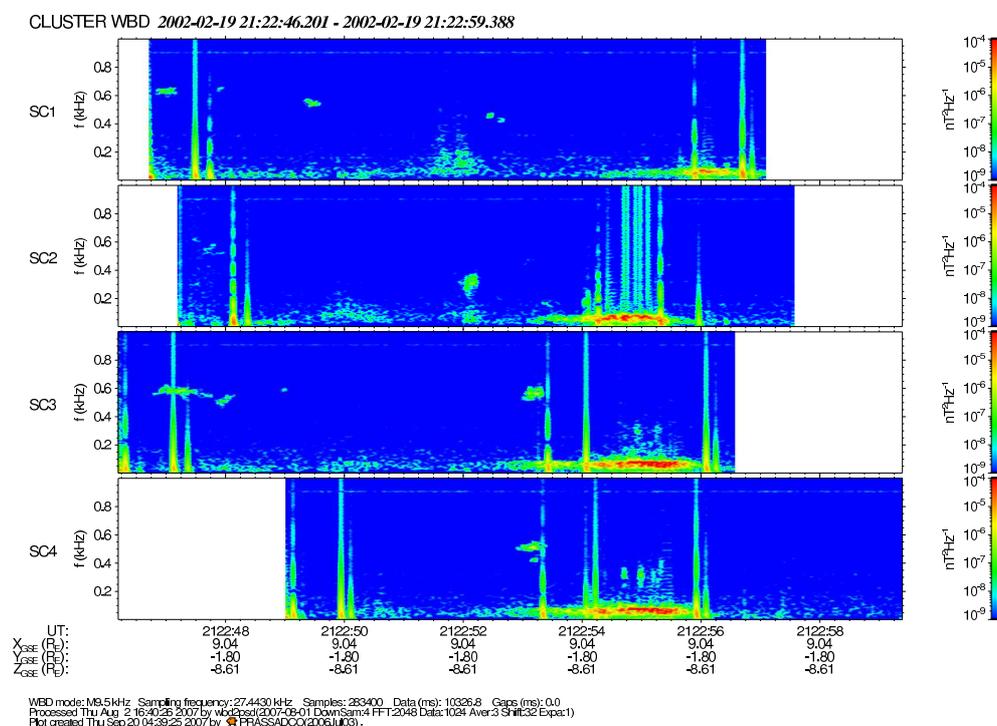


Obrázek 6.15: Spektrogram několika vlnových balíčků emisí typů lví řev



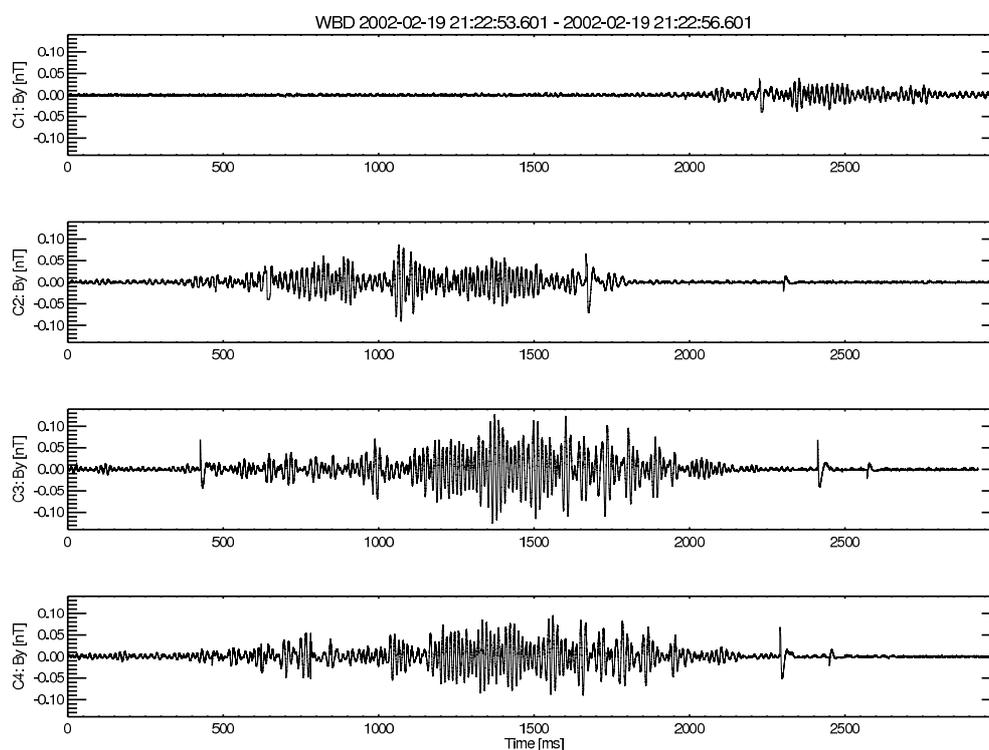
Obrázek 6.16: Příklad vlnové formy emise typu lví řev.

6.6.2 Časová zpoždění mezi družicemi



Obrázek 6.17: Spektrogram emise typu lví řev pozorované na několika družicích najednou.

Abychom využili vícebodového pozorování družicemi Cluster, zajímali jsme se o zpoždění mezi satelity jedné konkrétní vlnové emise. Na obrázku 6.17 je spektrogram zkoumaného lvího řevu z přístroje WBD. Příslušná vlnová forma je na obrázku 6.18. Jelikož se lví řevy šíří podél magnetického pole zajímá nás v jaké konstalaci se družice Cluster nacházely. To můžeme vyčíst z tabulky 6.3. Nejvhodnější podmínky byly mezi C-3 a C-4, kdy vektor magnetického pole svíral se spojnicí mezi satelity 4.2° . Lokální elektronová cyklotronová frekvence byla 530 Hz a plazmová frekvence 27 kHz. Z toho jsme mohli určit při použití teorie šíření vln ve studeném plazmatu (viz kapitola 2.2) grupový index lomu pro vlny šířící se ve hvizdovém módu: ~ 80 . Při vzdálenosti družic 101.9 km by mělo být zpoždění 27 ms. My jsme však pozorovali téměř dvojnásobné.



Obrázek 6.18: Příklad vlnových forem emise typu lví řev pozorované na několika družicích najednou.

s/n	1	2	3	4
1	*	98.4 km (89.7°)	98.4 km (58.4°)	96.2 km (58.3°)
2	98.4 km (89.7°)	*	105.1 km (63.1°)	104.6 km (58.6°)
3	98.4 km (58.4°)	105.1 km (63.1°)	*	101.9 km (4.2°)
4	96.2 km (58.3°)	104.6 km (58.6°)	101.9 km (4.2°)	*

Tabulka 6.3: Uspořádání družic Cluster vzhledem k lokálnímu magnetickému poli.

Stejným způsobem jsme tedy prošli sedm jiných případů. Shrnutí našich výsledků je v tabulce 6.4. Pozorovaná zpoždění jsou obecně dvojnásobné než ty vypočítané. Ve dvou případech dokonce desetinasobné. Vysvětlení zatím neznáme. Možnou příčinou je neznámá příčná struktura lvích řevů nebo změny intenzity lvích řevů během šíření mezi družicemi.

Událost	s/n	Separace (km, stupně)	Pozorované zpoždění (ms)	Vypočítané zpoždění (ms)
19.2.2002 21:22:55	3 a 4	101.9 km (4.2°)	50	27
19.2.2002 21:26:22	2 a 4	103.8 km (8.5°)	40	18
19.2.2002 21:36:45	2 a 4	101.5 km (18.9°)	50	20
19.2.2002 22:38:15	3 a 4	94.8 km (21.5°)	200	16
19.2.2002 22:44:59	2 a 4	85.8 km (12.9°)	20	13
19.2.2002 23:05:57	2 a 4	80.6 km (22.5°)	200	19
19.2.2002 23:23:20	1 a 4	107.2 km (4.9°)	50	30
19.2.2002 23:24:17	1 a 4	107.2 km (17.7°)	80	23

Tabulka 6.4: Porovnání zpoždění lvích řevů mezi jednotlivými družicemi.

Kapitola 7

Závěr

V této diplomové práci představujeme pozorování vlnových emisí typu "lví řev" na družicích Cluster. Statisticky jsme zpracovali a porovnali dva roky měření z přístroje STAFF-SA (2001 – vysoká sluneční aktivita; 2005 – nízká sluneční aktivita). Nalezli jsme celkem 5124 časově-frekvenčních intervalů obsahujících lví řevy. Na získaný datový soubor jsme aplikovali experimentálně určené prahy (intenzity, elipticity a planarity fluktuací magnetického pole), abychom odstranili ostatní vlnové emise. Tímto způsobem jsme obdrželi celkem 1153222 spektrálních matic, které jsme dále zpracovali.

Naše výsledky ukazují, že:

- Lví řevy pokrývají celou magnetoobálku Země. Častěji se vyskytují v její subsolární části. V roce 2001 jsme je pozorovali spíše na ranní straně magnetoobálky.
- Průměrná frekvence lvích řevů je 110 Hz, což odpovídá dosavadním výsledkům (*Smith a Tsurutani* [1976], *Rodriguez* [1985b] nebo *Yearby a kol.* [2005]). Median frekvence je 88 Hz.
- Průměrná frekvence normalizovaná lokální elektronovou cyklotronovou frekvencí je 0.18. Median normalizované frekvence je 0.16, což je opět v dobré shodě s již publikovanými pracemi (*Rodriguez* [1985a], *Zhang a kol.* [1998] nebo *Yearby a kol.* [2005]).
- Zkoumali jsme spektrální výkonovou hustotu fluktuací magnetického a elektrického pole. *Yearby a kol.* [2005] dospěli k podobným hodnotám jako my, narozdíl od *Rodriguez* [1985b] který pozoroval lví řevy na družici IMP6 s řádově nižší intenzitou.
- Porovnávali jsme Z_{MFA} (rovnobežnou s magnetickým polem) komponentu Poytingova vektoru normalizovanou jeho standardní odchylkou

s lokálním magnetickým polem. Naše výsledky ukazují, že se lví řevy šíří obecně směrem k Zemi (rozdíl oproti *Zhang a kol.* [1998]).

- Nenalezli jsme význačný rozdíl mezi daty z období větší sluneční aktivity (2001) a období menší sluneční aktivity (2005).

Dále jsme zkoumali jemnou strukturu lvích řevů z vlnového analyzátoru WBD taktéž na palubách družic Cluster:

- Ověřili jsme si úzkopásmovou diskrétní strukturu emisí typu lví řev.
- Pozorované zpoždění jednotlivých lvích řevů mezi družicemi byly dvojnásobné až desetinásobné oproti hodnotám vypočítaným z teorie šíření vln ve studeném plazmatu. Vysvětlení zatím neznáme. Příčinou může být neznámá příčná struktura lvích řevů nebo změny intenzity lvích řevů během šíření mezi družicemi.

Získané výsledky dávají dobrý základ pro další zkoumání vlastností vlnových emisí typu lví řev. Bylo by jistě užitečné porovnat pozorované lví řevy s dalšími parametry plazmatu (např. hustotou, teplotou, teplotní anizotropií, apod.).

Příloha A

Souřadnicový systém GSE

Pod zkratkou GSE se skrývá anglické slovní spojení Geocentric Solar Ecliptic, nebo-li česky geocentricky slunečně ekliptikální. Tato souřadnicová soustava má počátek ve středu Země. Kladná část osy X je definovaná jako polopřímka směřující na Slunce. Osa Z je kolmá k rovině oběhu Země okolo Slunce, čili k rovině ekliptiky, a její kladný směr míří na sever. Osa Y je ortogonální doplněk osy X a osy Z. Jednotkou souřadné soustavy GSE je Zemský poloměr R_E . Ten lze definovat 6378 km. Používají se však i mírně odlišné hodnoty, protože tvar Země není přesně kulový.

Literatura

- Baumjohann, W., R. A. Treumann, E. Georgescu, G. Haerendel, K.-H. Fornacon, a U. Auster (1999), Waveform and packet structure of lion roars, *Annales Geophysicae*, *17*, 1528–1534.
- Cornilleau-Wehrlin, N., a kol. (2003), First results obtained by the Cluster STAFF experiment, *Ann. Geophys.*, *21*, 437–456.
- Gurnett, D. A., R. L. Huff, a D. L. Kirchner (1997), The Wide-Band Plasma Wave Investigation, *Space Science Reviews*, *79*, 195–208.
- Kallenrode, M.-B. (1998), *Space physics : an introduction to plasmas and particles in the heliosphere and magnetospheres*, Springer, New York.
- Kennel, C. F., a H. E. Petscheck (1966), Limit on stably trapped particle fluxes, *J. Geophys. Res.*, *71*, 1–28.
- Kivelson, M. G., a C. T. Russell (1995), *Introduction to space physics*, Cambridge University Press, New York.
- Lee, L. C., C. S. Wu, a C. P. Price (1987), On the generation of magnetosheath lion roars, *J. Geophys. Res.*, *92*, 2343–2348.
- Maksimovic, M., a kol. (2001), Polarisation and propagation of lion roars in the dusk side magnetosheath, *Annales Geophysicae*, *19*, 1429–1438.
- Parker, E. N. (1958), Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields., *"Astrophysical Journal"*, *128*, 664–+.
- Rodriguez, P. (1985a), Long duration lion roars associated with quasi-perpendicular bow shocks, *J. Geophys. Res.*, *90*, 241–248.
- Rodriguez, P. (1985b), Magnetosheath whistler turbulence, *J. Geophys. Res.*, *90*, 6337–6342.

- Santolik, O. (2003), Propagation analysis of staff-sa data with coherency tests (a user's guide to prasadco), *LPCE/CNRS*.
- Santolik, O., F. Lefeuvre, M. Parrot, a J. L. Rauch (2001), Complete wave-vector directions of electromagnetic emissions: Application to INTERBALL-2 measurements in the nightside auroral zone, *J. Geophys. Res.*, *106*, 13,191–13,202, doi:10.1029/2000JA000275.
- Santolik, O., J. S. Pickett, D. A. Gurnett, M. Maksimovic, a N. Cornilleau-Wehrin (2002), Spatiotemporal variability and propagation of equatorial noise observed by Cluster, *J. Geophys. Res.*, *107*, 1495–+, doi: 10.1029/2001JA009159.
- Santolik, O., M. Parrot, a F. Lefeuvre (2003), Singular value decomposition methods for wave propagation analysis, *Radio Sci.*, *38*(1), 1010, doi: 10.1029/2000RS002523.
- Santolik, O., D. Gurnett, J. Pickett, M. Parrot, a N. Cornilleau-Wehrin (2004), A microscopic and nanoscopic view of storm-time chorus on 31 march 2001, *Geophys. Res. Lett.*, *31*(2), L02801, doi: 10.1029/2003GL018757.
- Santolik, O., F. Nemeč, M. Parrot, D. Lagoutte, L. Madrias, a J. Berthelier (2006), Analysis methods for multi-component wave measurements on board the demeter spacecraft, *Planet Space Sci.*, *54*(5), 512–527, doi: 10.1016/j.pss.2005.10.020.
- Smith, E. J., a B. T. Tsurutani (1976), Magnetosheath lion roars, *J. Geophys. Res.*, *81*, 2261–2266.
- Smith, E. J., R. E. Holzer, a C. T. Russell (1969), Magnetic Emissions in the Magnetosheath at Frequencies near 100 Hz, *J. Geophys. Res.*, *74*, 3027–+.
- Stix, T. H. (1992), *Waves in Plasmas*, Am. Inst. of Phys., New York.
- Thorne, R. M., a B. T. Tsurutani (1981), The generation mechanism for magnetosheath lion roars, *Nature*, *293*, 384–386.
- Tsurutani, B. T., E. J. Smith, R. R. Anderson, K. W. Ogilvie, J. D. Scudder, D. N. Baker, a S. J. Bame (1982), Lion roars and nonoscillatory drift mirror waves in the magnetosheath, *J. Geophys. Res.*, *87*, 6060–6072.
- Yearby, K. H., H. S. C. K. Alleyne, N. Cornilleau-Wehrin, O. Santolik, M. A. Balikhin, S. N. Walker, A. Fazakerley, a A. Lahiff (2005), Observations of

lion roars in the magnetosheath by the STAFF/DWP experiment on the Double Star TC-1 spacecraft, *Annales Geophysicae*, *23*, 2861–2866.

Zhang, Y., H. Matsumoto, a H. Kojima (1998), Lion roars in the magnetosheath: The Geotail observations, *J. Geophys. Res.*, *103*, 4615–4626, doi: 10.1029/97JA02519.