

Radiová diagnostika plazmatu ve sluneční erupci

M. Bárta, *Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov, barta @wave.asu.cas.cz*

M. Karlický, *Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov, karlicky @asu.cas.cz*

Abstrakt

Sluneční radiová vzplanutí jsou projevem erupční aktivity v širokém pásmu vlnových délek od milimetrových až po dekametrové vlny. Multifrekvenční pozorování s vysokým časovým rozlišením těchto vzplanutí poskytuje cenné informace o stavu koronálního plazmatu. Prvním krokem k využití těchto informací je interpretace pozorovaného jevu, t.j. vytvoření modelu, který úplně a bezrozporně vysvětlí všechny zjištěné skutečnosti. Volnými parametry tohoto modelu jsou pak fyzikální veličiny popisující stav plazmatu v místě radiového zdroje. Nastavením těchto parametrů tak, aby co nejlépe odpovídaly měřeným datům jsou pak tyto stavové veličiny plazmatu určeny. Zvláště významné se v tomto ohledu ukazují být úzkopásmová vzplanutí v oboru decimetrových vln, která mají podle posledních rozborů původ v místě primárního uvolnění erupční energie (v blízkosti rekonexe). V příspěvku bude ukázáno použití výše uvedeného postupu na decimetrová vzplanutí typu "spike" a především na dm vzplanutí typu "lace" nedávno nově rozpoznané na Astronomickém ústavu v Ondřejově.

1. SLUNEČNÍ RADIOVÁ VZPLANUTÍ

V radiovém záření Slunce lze z hlediska časových škál rozlišit několik složek. Nejstálejší je tzv. radiová emise klidného Slunce. Je v měřeném radiovém toku přítomna vždy, neboť vzniká jako důsledek elektron-iontových srážek ve sluneční koróně. Tyto srážky jsou však v koronálních podmínkách nepříliš časté, proto ani tato složka není právě intenzivní - na vlnové délce $\lambda = 10$ cm dosahuje radiový tok hodnoty ≈ 70 s.f.u. (Solar Flux Unit, $1 \text{ s.f.u.} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$). Druhá, tzv. pomalu proměnná složka s charakteristickou periodou danou rotací Slunce je způsobena gyromagnetickým zářením částic zachycených v magnetických polích nad aktivními oblastmi. Konečně třetí, nejproměnlivější a nejintenzivnější složku slunečního radiového záření představují radiová vzplanutí.

Během slunečních radiových vzplanutí může hodnota radiového toku na určité frekvenci stoupnout až o několik řádů oproti klidovému stavu. Vzplanutí jsou těsně svázána s projevy sluneční aktivity, zvláště se slunečními erupcemi a výrony koronální hmoty (CME) a proto jejich studium je velkým přínosem pro poznání právě těchto jevů. Dřívější radiová pozorování pomocí radiometru na jediné vlnové délce sice odhalilo tyto intenzivní záblesky i jejich spojitost se sluneční aktivitou, ale zkoumat jejich strukturu v plné šíři a souvislostech umožnilo až nasazení dynamických radiových spektrografů. Výsledkem jejich měření je časový vývoj spektra v určitém frekvenčním pásmu - tedy hodnota radiového toku je

zde vyjádřena funkcí dvou proměnných - frekvence a času (Jiříčka et al.1993). Pozorování s tímto typem přístroje ukázala, že časový vývoj spektra, reprezentovaný charakteristickou stopou na výsledném dvourozměrném záznamu radiového toku, lze zařadit do některé z poměrně mála tříd, zvaných nyní typy radiových vzplanutí. Navíc, každý typ nepředstavuje jen morfologickou kategorii, ale je úzce svázán s fyzikální podstatou vzniku daného vzplanutí. Interpretace radiového vzplanutí určitého typu představuje právě nalezení takových procesů ve sluneční koróně jejichž výsledkem je daný typ vzplanutí.

Ačkoli značná část radiových vzplanutí byla takto alespoň kvalitativně vysvětlena, u mnohých zbývá ještě mnoho nejasností. Navíc, zvláště pak v pásmu decimetrových vln, bylo poslední dobou - spolu s tím jak rostla rozlišovací schopnost spektrografu - rozpoznáno několik nových typů, mezi nimi na AsÚ AV ČR v Ondřejově nalezené vzplanutí typu "lace". Model tohoto vzplanutí poskytuje silný diagnostický nástroj pro určení parametru erupčního plazmatu v blízkosti magnetické rekonexe, jak bude ukázáno dále.

2. MODEL VZPLANUTÍ TYPU "LACE" A "SPIKES"

Nyní bude stručně popsán unifikovaný model vzplanutí "lace" a již dříve pozorovaných decimetrových záblesků "spike" s důrazem na verifikaci modelu porovnáním pozorovaných a modelovaných dat. Podrobnosti lze nalézt v pracích (Karlický et al.2001) a (Bárta & Karlický 2001). **Lace bursts - pozorování a analýza dat** Vzplanutí "lace" bylo radiovým spektrografem na observatoři Ondřejov

pozorováno celkem třikrát v průběhu let 1998-2000. Pozorování ze 17. srpna 1999 je uvedeno na obrázku 1. Na spektru (horní část) je patrné několik emisních linií posouvajících se v čase chaoticky po frekvenční ose. Zatímco vysokofrekvenční okraj emisní čáry je dobře zřetelný, nízkofrekvenční křídlo je značně široké.

Pro další zpracování byla vybrána jedna z linií jejíž polohu definovanou ostrým vysokofrekvenčním okrajem znázorňuje spodní část obr.1. Chaotické změny frekvence byly pak analyzovány metodou Fourierovy transformace. Získaná výkonová spektra tohoto a dalších třech zpracovaných časových úseků vzplanutí "lace" jsou patrna na obr.2.

Model vzplanutí Vzplanutí „lace“ se svým charakterem (záření na několika poměrně úzkých čarách) poněkud podobá jinému typu pozorovanému na decimetrových vlnách a to vzplanutí typu „zebra“. Model tohoto vzplanutí byl vypracován Zeleznyakovem a Zlotnikovou již v roce 1975 (Zheleznyakov & Zlotnik 1975) a patří do širší třídy modelu založených na tzv. plazmové emisi. Plazmová emise je zářivý proces, při němž nerovnovážná (odlišná od maxwellovské) rozdělovací funkce částic způsobuje nestabilitu plazmatu, jsou generovány rostoucí elektrostatické plazmové mody a ty jsou nakonec mechanismy nelineární interakce vln konvertovány do radiového záření. V případě vzplanutí "zebra" se jedná o nestabilitu horně-hybridních vln. Inkrement této nestability pro případ maxwellovské rozdělovací funkce narušené svazkem elektronů s teplotní anizotropií je dán vztahem (Mikhailovskiy 1975):

(1)
kde je tepelná rychlost elektronů podél magnetického pole, \mathbf{k} je vlnový vektor, α poměr hustot svazku a okolního plazmatu, $I_s(k_{\perp}v_{\perp}/\omega_{Be})$ je modifikovaná Besselova funkce, $z_{\perp} = k_{\perp}^2 k_B T_{\perp} / m_e \omega_{Be}^2$, m_e hmotnost elektronu, k_{\perp} příčná složka vlnového vektoru, a

(2)
je reálná část (komplexní) frekvence horně-hybridních vln. Protože inkrement je nepřímo úměrný podélné složce vlnového vektoru, neefektivněji jsou generovány vlny s $k_{\parallel} \ll k_{\perp}$. Inkrement nestability je tedy dostatečně vysoký pouze v okolí míst, kde je splněna rezonanční podmínka

(3)
 ω_{UH} , ω_{pe} a ω_{Be} jsou horní hybridní frekvence, elektronová plazmová a cyklotronová frekvence. Přírodním důsledkem je pak úzkopásmové záření na několika harmonických frekvencích $s = 2, 3, 4, \dots$

Jestliže se parametry plazmatu v koróně mění s časem jen zvolna, výsledkem je vzplanutí typu "zebra".

Během vzplanutí typu „lace“ naopak emisní čára rapidně mění svoji frekvenci s časem. Tyto náhlé změny nemají typickou časovou škálu - naopak, jak ukazuje obr.2 jejich fourierovská spektra mají mocninný průběh, což je typické pro rozvinutou turbulenci. Pro vzplanutí "lace" byl proto navržen následující model:

- elementární zářivý proces je stejný jako u vzplanutí "zebra", jak naznačuje čárový charakter okamžitého spektra v obou případech
- tento zářivý proces probíhá na pozadí turbulentního plazmatu

Jako nejpravděpodobnější zdroj vzplanutí se jeví výtrysky plazmatu z místa rekonexe magnetických siločar během sluneční erupce - viz obr.3. V těchto výtryscích lze očekávat plazma ve stavu silné magneto-hydrodynamické turbulence a zároveň nestabilní rozdělovací funkci generující horně-hybridní vlny.

1-D model tohoto zdroje je popsán pomocí dvou parametrů - elektronové hustoty n a magnetické indukce B , jejichž střední hodnoty se mění podle vztahů:

Přes tyto střední hodnoty je přeložena magneto-hydrodynamická turbulence se spektrálním indexem $\sigma = -2$ zjištěným z analýzy dat. Zdroj je pak rozdělen na elementy příčné délky a v každém elementu jsou spočteny změny amplitud vlnových módů na základě vztahu (1). Jak již bylo naznačeno, přítomnost MHD turbulence způsobuje rychlou časovou změnu rezonanční podmínky (3) a tím i vyzářované frekvence. Má ale i vedlejší efekt - když v daném elementu zdroje rychlost změny lokálních frekvencí ω_{pe} , ω_{Be} bude srovnatelná s inkrementem nestability, růst horně-hybridních vln bude potlačen. Tento efekt se týká zvláště krátkovlnné části turbulentního spektra a je při výpočtu zohledněn. Radiový tok z elementu zdroje je předpokládán pro jednoduchost úměrný energii horně-hybridních vln v elementu obsazené a jeho celková hodnota v daném čase je součtem příspěvku od jednotlivých elementů zdroje. S postupujícím časem je takto zkonstruováno celé dynamické spektrum. Schema nastíněného algoritmu ukazuje obr.4.

Jak bylo uvedeno výše, krátkovlnná část spektra MHD turbulence způsobuje tak rychlé změny lokálních parametrů ve zdroji, že může občas dojít k úplnému potlačení nestability horně-hybridních vln a tím i radiového záření. Jak ukazují výsledky na obr.5, pozorovaný typ vzplanutí za přítomnosti krátkovlnné MHD turbulence se mění z typu "lace" na decimetrové "spikes". Prezentovaný model tedy přirozeně sjednocuje tři typy decimetrových vzplanutí (zebra, lace, dm-spikes), přičemž pozorované rozdíly připisuje rozdílným parametrům v radiovém zdroji.

Ověření modelu Modelovaná dynamická spektra mohou být přímo porovnána se spektry pozorovanými. Srovnání obrázků 5a), c) a 1 ukazuje dobrou kvalitativní shodu. Rovněž obr.5d) by po započtení více harmonických

vykazoval podobu s pozorovaným vzplanutím "spikes" z obr.6 .

Kromě těchto globálních vlastností spekter byly v literatuře ([Güdel & Benz1990]) zkoumány rovněž charakteristiky jednotlivých dílčích píku, které na dynamickém spektru vytváří oblak vzplanutí "spikes". Bylo zjištěno, že jednotlivé píky vykazují zpočátku gaussovský profil následovaný posléze exponenciálním dohasínáním. Za tímto účelem byly průběhy analyzovány pomocí logaritmické derivace. Ta v místě gaussovského profilu vykazuje lineárně klesající chod, v místě exponenciálního dohasnutí pak konstantní průběh. Porovnání této analýzy pro pozorované a modelované vzplanutí "spikes" ukazuje obr.7 . Jak je z obrázku patrné, rovněž individuální vlastnosti píku "spikes" vykazují dobrou úroveň shody mezi modelovanými a pozorovanými daty. Tato celkově dobrá shoda mezi pozorovanými a modelovanými daty nás utvrzuje ve správnosti modelu a umožňuje jeho použití pro diagnostiku erupčního plazmatu.

3. POUŽITÍ PRO DIAGNOSTIKU

Jestliže model vzplanutí "lace" je správný, je to poprvé, co máme možnost přímo diagnostikovat erupční plazma v rekonním výtrysku ve stavu MHD turbulence. Velice užitečným nástrojem pro takovou analýzu je Fourierova transformace. Její aplikací na data získáme výkonová spektra jako na obr.2 . Derivováním rezonanční podmínky (3) získáme mezi změnou frekvence vyzářených vln a odpovídající změnou elektronové hustoty vztah

Protože pro vyšší harmonické $s \geq 3$ zlomek $s^2/(s^2 - 1) \approx 1$, lze ze spekter z obr.2 vypočítat výkonová spektra elektronové hustoty prostým vynásobením faktorem 4 ($=2^2$).

Z výkonových spekter může být získáno několik informací:

1. Úroveň turbulence lze odhadnout, jestliže máme daty pokrytou podstatnou část turbulentního spektra. Odhad můžeme provést dvěma způsoby:

(a) podle Parsevalovy rovnosti pro střední kvadratickou odchylku platí:

tedy střední kv. odchylku lze spočítat přímo integrací výkonového spektra přes frekvence.

(b) jinou možností představuje fitování modelovaného spektra na pozorovaná data. Tento způsob byl skutečně

použit a vede k odhadu střední kv. odchylky ≈ 0.1 .

2. Další informace, kterou lze získat z Fourierovy analýzy dat se týká typických délek v rekonním výtrysku. Za tímto účelem

je nejprve nutné přepočítat časová výkonová spektra na délková. Nejjednodušší aproximací, která byla rovněž použita při výpočtu modelovaných dynamických spekter vzplanutí "lace" a "spikes" je přiblížení, ve kterém se chaotická struktura "zamrzlá" ve výtrysku pohybuje spolu s tímto výtryskem. Potom lze spektrum z frekvencí přepočítat do vlnových délek na základě zřejmého vztahu

Nyní použijeme analogii s dobře známým případem hydrodynamické turbulence v kapalinách a plynech. Typické výkonové spektrum HD turbulence ukazuje obr.8 . Vlnová délka odpovídající nejsilnější komponentě spektra odpovídá rovněž škále na níž energie vstupuje do systému a v hydrodynamice je řádově rovna charakteristickému průměru trubice v níž tekutina proudí. Podle této analogie by vlnová délka odpovídající maximu spektra na obr.2 byla určena charakteristickým příčným rozměrem výtrysku.

3. Následujícím způsobem lze studovat energetickou rovnováhu ve výtrysku: od maxima směrem ke kratším

vlnovým délkám se v turbulentním spektru nalézá tzv. inerciální pásmo, ve kterém platí zákony vnitřní podobnosti a proto příslušný průběh je mocninný (na obr.8 přímkou v log-log souřadnicích). Toto inerciální pásmo je ukončeno poměrně prudkým poklesem, který odpovídá vlnové délce disipačního procesu

Zde ϵ je rychlost disipace energie vztažená na jednotku hmoty, ν je kinematická viskozita. V případě MHD turbulence je disipace energie realizována spíše elektrickým odporem než viskózními silami a proto ν by mělo být nahrazeno magnetickou difuzivitou $\kappa = \eta/\mu_0$, kde η je (anomální) odpor plazmatu a μ_0 permeabilita vakua. Jestliže tedy odhadneme nezávislým způsobem odpor plazmatu a ze spektra (obr.2) určíme vlnovou délku disipace, můžeme určit rychlost disipace energie ve výtrysku. Ve stavu dynamické rovnováhy je disipovaný a uvolněný výkon stejný. Máme-li tedy k dispozici odhad velikosti výtrysku a výše určená rychlost disipace může být považována za charakteristickou hodnotu pro celý výtrysk, lze dovodit celkový výkon dodaný během rekonexe do výtrysku.

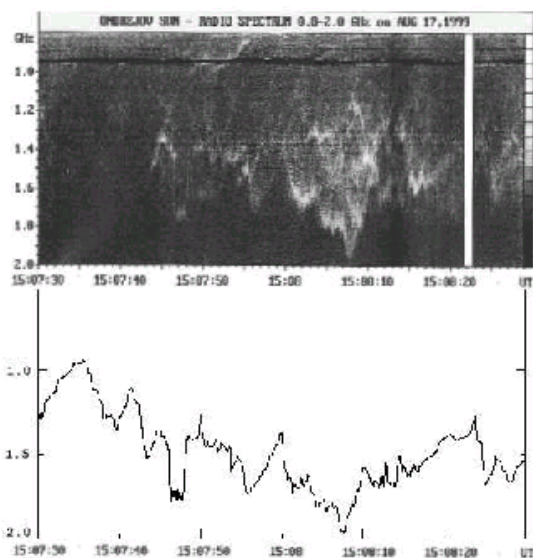
Na těchto několika příkladech bylo ukázáno, jak mocné diagnostické nástroje poskytuje věrohodná interpretace radiových spekter. Lze se oprávněně domnívat, že ani u tohoto modelu nebyly všechny potenciální možnosti ještě vyčerpány.

PODĚKOVÁNÍ

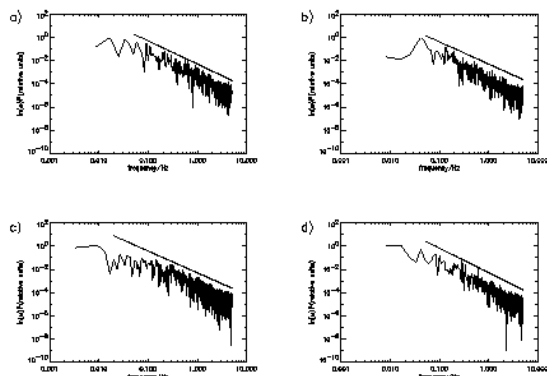
Tato práce byla vytvořena s podporou grantu A3003 202 GA AVČR.

LITERATÚRA

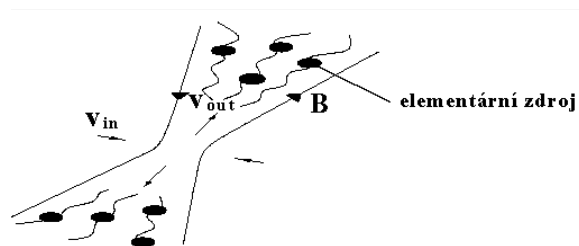
Jiřicka, K., Karlický, M., Kepka, O., Tlamicha A. 1993, Solar Phys. 147, 203.
 Karlický, M., Bárta, M., Jiřicka, K., Mészárosová, H., Sawant, H.S., Fernandes, F.C.R., Cecatto, J.R. 2001, A&A 375, 638
 Bárta, M., Karlický, M. 2001, A&A 379, 1045
 Zheleznyakov, V.V., & Zlotnik, E. Ya. 1975, Sol. Phys. 44, 461
 Mikhailovsky, A.B. 1975, Theory of Plasma Instabilities Vol. I, (Nauka, Moscow), 149 (in Russian)
 Güdel, M., & Benz, A.O. 1990, A&A 231, 202
 INAF Trieste website: <http://radiusun.ts.astro.it>



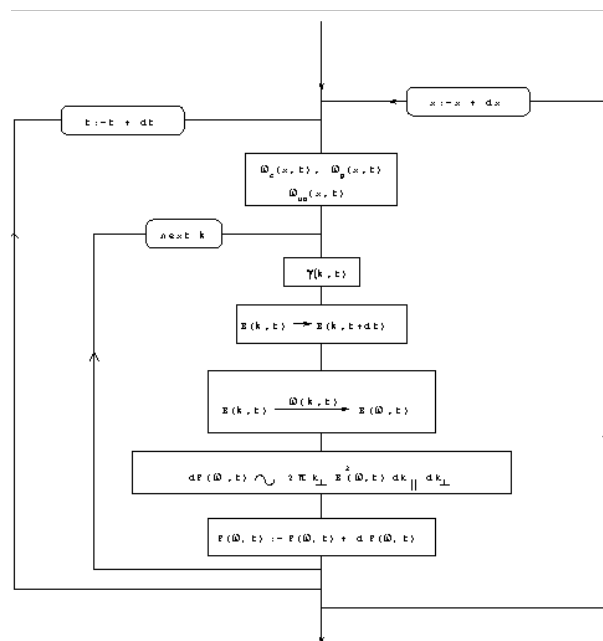
Obrázek 1. Vzplanutí "lace" pozorované 17. srpna 1999 v době 15:07 - 15:09 UT ondřejevským spektrografem v pásmu 0,8 - 2,0 GHz. Dolní obrázek ukazuje průběh vysokofrekvenčního (dobře definovaného) okraje vyzářované čáry.



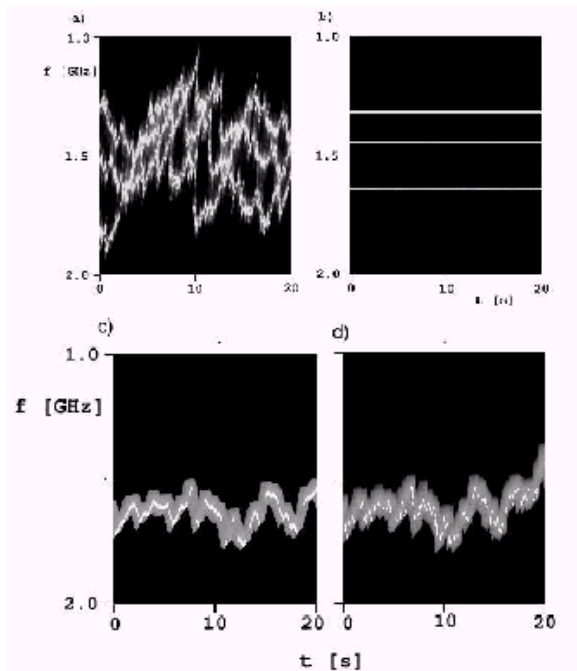
Obrázek 2. Výkonová Fourierovská spektra čtyř zpracovaných časových úseků tří vzplanutí typu „lace“. Spektra patrně ve své velké části mají mocninný průběh - přímky naznačují nejlépe odpovídající exponent (spektrální index)



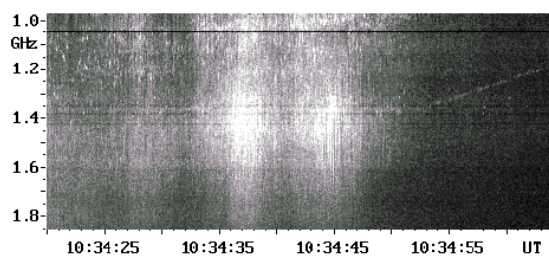
Obrázek 3. Předpokládaný zdroj vzplanutí typu "lace" a decimetrových "spikes" v rekonexním výtrysku plazmatu během sluneční erupce.



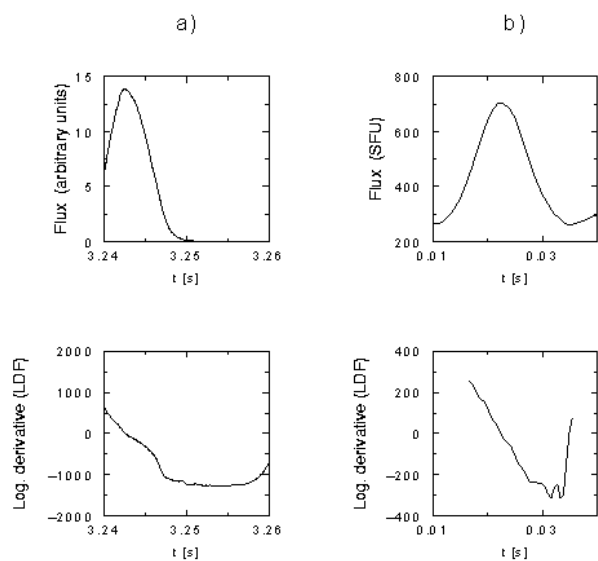
Obrázek 4. Schema algoritmu užitého pro výpočet radiového toku z 1-D modelu rekonexního výtrysku.



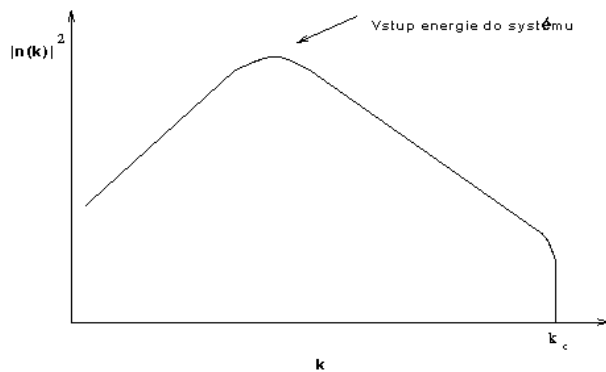
Obrázek 5. Srovnání modelovaných spekter různých typů decimetrových radiových vzplanutí získaných změnou parametrů jediného modelu. a) vzplanutí typu "lace". Záření je počítáno simultánně na třech harmonických frekvencích, relativní střední kvadratická odchylka elektronové hustoty popisující míru turbulence je 0,1, nejkratší škála v MHD turbulenci je 100 km. b) vzplanutí typu zebra. Byly použity stejné parametry kromě hodnoty střední kvadratické odchylky. Ta je v tomto případě nulová (statický případ). c) vzplanutí "lace", parametry stejné jako v případě a), záření pouze na jedné harmonické. d) vzplanutí "spikes". Rozdíl oproti případu c) spočívá v rozšíření spektra MHD turbulence do oblasti krátkých škál - nejkratší vlnová délka obsazená ve spektru je 100 m.



Obrázek 6. Vzplanutí "spikes" pozorované radiospektrografem na AsÚ AV ČR Ondřejov



Obrázek 7. Porovnání mezi modelovaným a pozorovaným časovým profilem vzplanutí typu "spike" s použitím logaritmické časové derivace radiového toku (LDF). a) časový profil na frekvenci 1670 MHz a jeho logaritmická derivace - modelovaný případ. Začátek profilu byl odstraněn kvůli vysokému numerickému šumu v log. derivaci. b) časový profil a jeho log. derivace pro vzplanutí "spike" měřené na frekvenci 1420 MHz na observatoři Terst, Itálie ([INAF Trieste website]). Homogenní pozadí o hodnotě 215 s.f.u bylo před analýzou odečteno.



Obrázek 8. Schema výkonového spektra hydrodynamické (HD) turbulence.