

Teorie a interpretace slunečních decimetrových radiových vzplanutí

(doktorská disertace)

Miroslav Bárta
2002

Abstrakt

Radiové záření Slunce představuje významný zdroj přímých informací o mnoha fyzikálních procesech spojených s urychlováním částic ve sluneční atmosféře. Zejména radiová vzplanutí - intenzivní a velmi proměnlivá složka slunečního radiového záření - v sobě nese otisk fyzikálních vlastností zdroje a procesů spjatých s prvotním uvolněním energie ve slunečních erupcích. Decimetrová (dm) radiová vzplanutí a jejich studium pak nepochybně poskytují nejvíce bezprostřední pozorovatelský vhled do oblasti magnetické rekonexe a oblastí urychlování částic. Na druhou stranu, vyzařovací mechanismy slunečních dm vzplanutí jsou typicky netermální a zahrnují mnoho mikroskopických (kinetických) plazmových nestabilit a transformací plazmových vlnových modů. Nelinearita procesů plazmové radiové emise pak přináší zvýšené nároky na správnou interpretaci pozorovaných vzplanutí a na nalezení vztahů mezi pozorovanými veličinami (např. radiový tok, frekvenční emisní profil a jeho časový vývoj) a fyzikálními vlastnostmi a procesy ve zdroji. Tato disertace cílí na dva specifické okruhy ve výzkumu slunečních radiových vzplanutí a jejich aplikace na diagnostiku erupčního plazmatu: (1) Fyzikální interpretaci dvou specifických typů radiových vzplanutí spojených se slunečními erupcemi a (2) Příspěvek k teorii a modelování transformace plazmových vlnových modů jakožto podstatné součásti fyziky plazmové radiové emise. Tyto příspěvky vlastního výzkumu autora následují po krátké úvodní části zasvěcující čtenáře do základů fyziky slunečních erupcí a pokročilé teorie vln v plazmatu.

Interpretační část se týká dvou specifických typů slunečních radiových vzplanutí: tzv. *lace bursts* (objevených skupinou sluneční radioastronomie na Astronomickém ústavu AV ČR v Ondřejově v roce 2001) a *decimetric spikes* (pozn.: jde o velmi specifický a poměrně mladý vědní obor, jehož česká terminologie se dosud neustálila). Interpretace je založena na plazmové nestabilitě horně-hybridních (*upper hybrid* - UH) plazmových vln působící v turbulentním prostředí, jak ho můžeme důvodně očekávat např. ve výtryscích plazmatu z oblasti rekonexe magnetického pole ve sluneční erupci. Na tomto předpokladu je postupně vystavěn celý vícestupňový model, jehož konečným výsledkem jsou modelovaná dynamická spektra přímo porovnatelná s pozorováními. V modelu je nejprve počítána prostorová hustota nasycené energie UH vln v prostředí turbulentního rekonekčního výtrysku. Následně - z důvodu zjednodušení - se předpokládá, že konstantní část energie těchto tzv. *double-resonance* nestabilitou vzniklých UH vln se procesy transformace vlnových modů přemění v unikající radiové záření. Jeho intenzita je pak spočtena pro mnoho frekvenčních kanálů v závislosti na čase. Takto zkonstruované dynamické radiové spektrum je pak přímo porovnáno s pozorováními. Zjistili jsme, že působení turbulentního prostředí na probíhající zesilování (v důsledku *double-resonance* nestability) UH vln má dvojitý účinek: (i) Turbulence prudce mění prostorovou pozici rezonančních povrchů, u kterých je splněna podmínka *double-resonance*. To vede k charakteristickému „chaotickému“ časovému průběhu změny frekvence emisní „čáry“ ve vzplanutí typu *lace*. Toto ovšem, naopak, může být diagnosticky využito pro odvození vlastností MHD turbulence ve zdroji (jako např. spektrum turbulentních variací, intenzita turbulence daná střední kvadratickou odchylkou hustoty plazmatu od její střední hodnoty, atd.) z časových variací emisní frekvence *lace burst*. (ii) Přítomnost nejmenších struktur v turbulentním spektru spojená s nejrychlejšími změnami (v modelu byla řízena pomocí volného parametru horně-frekvenčního ohraničení spektra turbulentních variací) může efektivně potlačit probíhající nestabilitu UH vln, což v důsledku vede k velmi intermitentnímu radiovému vyzařování s charakterem velmi krátkých špiček intenzivní radiové emise přerušovaných delšími časovými úseky s žádnou nebo slabou radiovou aktivitou. Výsledné záření zpracované do podoby dynamického spektra pak silně připomíná pozorování vzplanutí typu *dm spikes*. Tato podoba mezi modelovaným a pozorovaným spektrem se neomezuje jen na první dojem z celkového dynamického spektra, ale i časové a frekvenční profily jednotlivých spikes/špiček jsou modelem reprodukovány velmi věrně. Tento model tedy na základní rovině emisního mechanismu sjednocuje dva morfologicky rozdílné typy vzplanutí - *lace bursts* a *dm spikes*. Pouze hodnota horního frekvenčního limitu turbulentních variací hustoty plazmatu a magnetické indukce v rekonekčním výtrysku (tedy přítomnost nebo absence velmi malých struktur) řídí, jaký typ vzplanutí budeme pozorovat. Tento jednotící model přirozeně vysvětluje - vedle již zmíněných vlastností individuálních

špiček v „hejnu“ *dm spikes* – také jejich v radiových spektrech často pozorovanou organizaci do řetízků nebo driftujících linií. Krom toho, relativní malá četnost pozorování vzplanutí typu *lace* ve srovnání s *dm spikes* má v rámci modelu přirozené vysvětlení – *lace bursts* pochází ze zdrojů s jen částečně rozvinutou turbulencí. Tento přechodný stav mezi nástupem turbulence a situací, kdy je v turbulentní kaskádě už dosaženo disipační škály, ale pravděpodobně trvá jen po velmi omezenou dobu. To ovšem z druhé strany zvyšuje diagnostický potenciál vzácně pozorovaných *lace bursts*, nebo dokonce jejich přechodu do *dm spikes*, pro studium vlastností MHD turbulence v erupčních výtryscích. Poznamenejme, že předložený unifikovaný model pro *lace bursts* a *dm spikes* založený na nestabilitě UH vln potenciálně vztahuje tyto dva typy vzplanutí k dalšímu typu – ke známé *zebra struktuře*. Mechanismus *double-resonance* uvažovaný ve stratifikované hladce se měnící sluneční atmosféře je mnoha autory navrhován právě jako vysvětlení „mnoha-čárové“ emise typu zebra. V tomto smyslu podobné mnoha-čárové efekty typu *lace* představují rozšíření modelu vzplanutí zebra pro použití v turbulentním prostředí.

Poslední část disertace je věnována důležité součásti mechanismu plazmové radiové emise – transformaci vlnových modů z nestabilitám podléhajících elektrostatických vln, vázaných na dané prostředí ve zdroji, do unikajícího elektromagnetického záření. Vzájemná interakce Langmuirových (L), ionto-zvukových (S) a elektromagnetických (příčných, transversálních – T) je v práci popsána soustavou zobecněných Zacharovových rovnic. S pomocí jejich Greenových funkcí jsme našli nelineární disperzní rovnice pro soustavu vzájemně interagujících vln. Použití rozdělovacích funkcí Lorentzova typu pro rychlosti částic umožnilo díky analytické integraci v komplexní rovině nalezení přesných řešení těchto disperzních rovnic. Poznamenejme, že použití distribučních funkcí Lorentzova typu, které mají oproti standardní maxwellovské statistice zvýšený podíl vysoko-energetických částic v konci rozdělení, byl motivován nejen možností analytické integrace s pomocí reziduové věty ale také z pozorovacích důvodů: Vysokoenergetické konce rychlostního rozdělení částic jsou běžně pozorovány ve slunečním větru (a nepřímé důkazy o jejich přítomnosti v erupční koróně a přechodové oblasti máme z UV a EUV spektrální diagnostiky). Přesná řešení nelineárních disperzních rovnic nejsou jediným inovativním aspektem tohoto jinak často studovaného problému fyziky (kosmického) plazmatu zavedeným v naší práci – poprvé jsme také nezůstali pouze u výpočtů vlnových vektorů a frekvencí dceřinných vln vzniklých transformací procesem parametrických a modulačních nestabilit. S použitím Greenových funkcí Zacharovových rovnic a do nich dosazených řešení nelineární disperzní rovnice jsme našli fázovou hustotu energie (v prostoru vlnových vektorů) jednotlivých dceřinných vln, což je veličina mnohem bližší pro aplikaci této teorie pro kvantitativní diagnostiku založenou na pozorovaných *radiových tocích*. Explicitní výpočet fázové hustoty energie ionto-zvukových vln dále ukázal, že často používané plazmatické přiblížení $n_e = n_i$ je pro některé režimy vlnových nestabilit nedostatečné a musí být nahrazeno přesným řešením soustavy zobecněných Zacharovových rovnic.

Závěr disertace pokračuje ve výzkumu transformace vlnových modů a rozvíjí teorii konverze Langmuirových vln do elektromagnetického modu v turbulentním prostředí, jaké může být očekáváno např. v rekonekčních výtryscích ve slunečních erupcích. Autor k popisu interakce Langmuirova vlnového balíku s turbulentními variacemi hustoty plazmatu používá vlastní adaptaci kvantové teorie rozptylu (do prvního řádu rozvoje). Výsledky modelu ukazují, že přítomnost takovýchto turbulentních oblastí v prostoru, kde se šíří Langmuirovské vlny, může vést ke zvýšené radiové emisi typu *šumové bouře*.

Výzkumná část práce je založena na třech odborných článcích v mezinárodních impaktovaných časopisech, jichž je kandidát prvním (2x) a druhým (1x) autorem.