

Radiová diagnostika rekonexe magnetického pole ve slunečních erupcích

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

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

Abstrakt

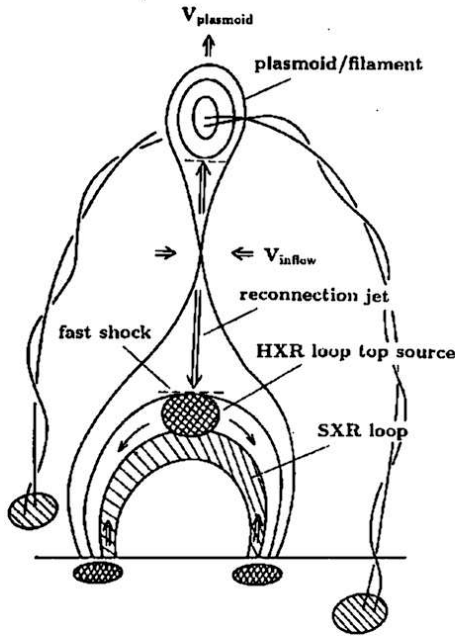
Rekonexe magnetického pole je v současné době považována za hlavní rámcový mechanismus uvolnění magnetické energie ve slunečních erupcích. Na druhou stranu je velmi obtížné tento proces v erupci přímo pozorovat a tak se spoléháme na nepřímé informace získané pozorováním jevů, které jsou až důsledkem rekonexe v oblastech poněkud odlehlých od primárního místa uvolnění energie (např. ohřev chromosféry bombardované svazky částic urychlených rekonexí probíhající ve skutečnosti v koróně). Tento přístup přináší samozřejmě pouze omezené údaje o struktuře magnetického pole a dalších parametrech plazmatu v samotném místě rekonexe a proto je každá metoda poskytující přímější diagnostiku zmiňovaného procesu cenná. V příspěvku bude představen kombinovaný model výpočtu radiového záření z oblasti rekonexe magnetického pole, porovnání jeho výsledků s pozorováními ondřejovských radiových spektrografů a důsledky pro možné použití radiových spekter k diagnostice některých parametrů plazmatu v místě rekonexe. Model používá magnetohydrodynamický přístup k numerické simulaci rekonexe a kombinuje ho s kinetickým popisem plazmových oscilací, jejichž důsledkem je radiové záření (tzv. mechanismus plazmové emise). Bude ukázán vliv dynamiky plazmatu v rekonexi na časovou evoluci radiového spektra, který v principu může být inverzně použit pro diagnostiku tohoto procesu.

1. ÚVOD

Kvalitativně nová pozorovací data získaná v posledních dvou desetiletích za pomoci kosmických přístrojů zásadně změnila náš pohled na mnoho projevů sluneční aktivity, především na sluneční erupce. Emise z chromosférických vláken viditelná v čáře $H\alpha$ (výjimečně i v bílém světle) – ještě nedávno považovaná za podstatu slunečních erupcí – je dnes vnímána jako víceméně podružný důsledek procesů uvolnění energie odehrávajících se primárně v magnetickém poli v koróně. Syntéza různých pozorování postupně vedla k vytvoření rámcového scénáře založeného na uvolnění nahromaděné energie magnetického pole procesem rekonexe (např. Shibata & Tanuma, 2001).

Ačkoli navržený scénář (Obr. 1) rámcově souhlasí s hlavními jevy pozorovanými během sluneční erupce (postupně rostoucí arkáda magnetických smyček, vzdalující se emisní chromosférická vlákna, vyvržení plazmoidu), mnoho podstatných detailů nebylo do-

sud objasněno. K jejich studiu je nutné tuto rámcovou představu vtělit do konkrétního matematického modelu. Z druhé strany, výsledkem takového modelování jsou fyzikální veličiny nemající přímý vztah k pozorování (zprostředkovaného výlučně elektromagnetickým zářením), jako struktura magnetického a rychlostního pole, rozložení hustoty a teploty atd. K přímé konfrontaci modelu se skutečností je tedy ještě třeba odvodit ze spočtených hodnot fyzikálních polí přímo pozorovatelné veličiny, jako jsou prostorové struktury zdrojů záření pro různé vlnové délky, spektra záření, případně i jejich časový vývoj. Protože je známo, že během tzv. impulsové fáze erupce dochází ke vzplanutí především v oblasti radiového a rentgenového záření, modelování radiové emise z oblasti rekonexe a porovnání jeho výsledků s pozorováními přináší nejen přímý vhled do místa primárního uvolnění energie, ale zároveň funguje i jako test standardního rámcového modelu sluneční erupce.

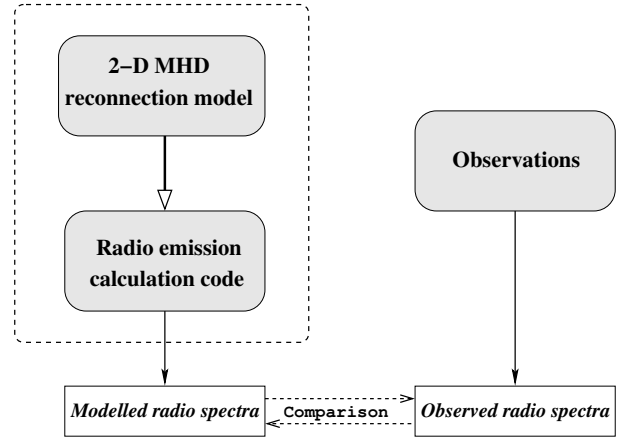


Obr. 1. Rámcový scénář sluneční erupce založený na rekonexi magnetického pole (Shibata & Tanuma, 2001).

2. MODEL

Jak již bylo řečeno v úvodu, naším cílem je spočítat jaké radiové záření (struktura zdroje, spektrum a časový vývoj obého) by bylo pozorováno v hypotetické sluneční erupci odpovídající modelu založenému na standardním scénáři z Obr. 1 a porovnání této modelované emise s radiovémi vzplanutími skutečně pozorovanými během erupce. Výchozím bodem tedy je implementace standardního scénáře do konkrétního matematického modelu – v našem případě se jedná o dvourozměrný (2D) magneto-hydrodynamický (MHD) model celého objemu erupce. Jeho výsledky (časový vývoj struktury magnetických a rychlostních polí, hustoty, teploty atd.) jsou v dalším kroku použity pro výpočet radiového záření (spektra, prostorová struktura zdrojů) z prostoru erupce. Modelovanou radiovou emisi lze přímo porovnat s pozorováním. Schematicky je tento postup znázorněn na Obr. 2

2D MHD model rekonexe ve sluneční erupci
Dynamika plazmatu a magnetického pole je v rámci zvoleného modelu popsána soustavou magneto-hydrodynamických rovnic v jednotekutinovém přiblížení:



Obr. 2. Schema kombinovaného modelu pro výpočet radiového záření z oblasti rekonexe ve sluneční erupci. Spočtená emise může být přímo porovnána s pozorováním.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) &= 0 \\ \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} &= -\nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \rho \mathbf{g} \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) - \nabla \times (\eta \mathbf{j}) \\ \frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{S} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

kde tok energie $\mathbf{S}$ a pomocné veličiny (tlak plazmatu p a hustota elektrického proudu $\mathbf{j}$) jsou vyjádřeny pomocí standardních vztahů (např. Kliem et al., 2000). Odpor plazmatu η se dynamicky mění – roste kdykoli se vzájemná rychlost elektronů a iontů blíží kritické hodnotě, čímž fenomenologicky simulujeme nástup plazmových mikro-nestabilit, jež nemůžeme v rámci MHD modelu adekvátně popsat.

Analytické řešení soustavy (1) je bohužel možné jen pro velmi jednoduché případy a proto se musíme uchýlit k numerické integraci. V našem případě bylo použito Lax-Wendroffovo numerické schéma implementované do paralelního (MPI) kódu. K řešení byl využit nový ondřejovský počítačový cluster *OCAS* (<http://wave.asu.cas.cz/ocas>). Detaily prováděné simulace, zejména počáteční a okrajové podmínky jsou uvedeny v práci Bárta & Karlický (2005).

Modelování radiové emise z oblasti rekonexe
V uvedeném modelu předpokládáme v souladu s jemnou strukturou pozorovaných radiových spekter vznik radiového záření mechanismem plazmové emise. Podstatou tohoto mechanismu jsou mikro-nestability vedoucí k růstu různých typů plazmových oscilací. Energie těchto oscilací je pak částečně

konvertována do pozorovaného elektromagnetického záření.

V tomto případě předpokládáme růst horně-hybridních (upper-hybrid, UH) plazmových vln v důsledku teplotní anizotropie elektronů pohybujících se v měnícím se magnetickém poli v oblasti rekonexe. Dynamika UH vlnového modu s vlnovým vektorem $\mathbf{k}$ je v kvazi-lineárním kinetickém přiblížení dána vztahem

$$E(\mathbf{k}, t + \Delta t) = E(\mathbf{k}, t) \cdot \exp[(\gamma(\mathbf{k}) - \nu) \cdot \Delta t] \quad (2)$$

kde γ a ν představují po řadě inkrement nestability a útlumovou konstantu danou srážkami částic plazmatu. Inkrement pro uvažovaný případ svazku s teplotní anizotropií $T_{\perp} > T_{\parallel}$ a poměrnou hustotou $\alpha = n_{\text{beam}}/n_0$ je (Michajlovskij, 1975):

$$\gamma(\mathbf{k}) = -\frac{\sqrt{\pi}\alpha\omega^3(\mathbf{k})}{v_{Te\parallel}^3 k_{\parallel}^2 |k_{\parallel}|} \sum_{s=-\infty}^{\infty} \left\{ I_s \exp(-z_{\perp}) \times \exp\left(-\frac{\Delta\omega^2}{k_{\parallel}^2 v_{Te\parallel}^2}\right) \left(\Delta\omega + s\omega_{Be} \frac{T_{\parallel}}{T_{\perp}}\right) \right\}, \quad (3)$$

kde frekvenční posuv

$$\Delta\omega \equiv \omega(\mathbf{k}) - k_{\parallel}v_{\parallel} - s\omega_{Be}. \quad (4)$$

Reálná část disperzního vztahu pro UH vlny je pak dána vztahem

$$\omega(\mathbf{k}) = \sqrt{\omega_{UH}^2 - \frac{\omega_{Be}^2 \omega_{pe}^2}{\omega_{UH}^2} \frac{k_{\parallel}^2}{k^2}}. \quad (5)$$

Pro vysvětlení významu jednotlivých veličin, případně další detaily odkazujeme zájemce na již citovanou práci Bárta & Karlický (2005).

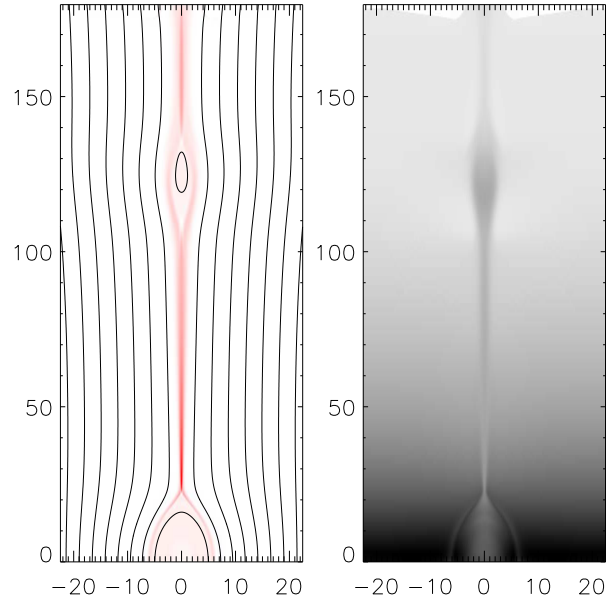
Přímým důsledkem vztahů (3), (4) a (5) je, že UH vlny jsou generovány pouze v blízkosti povrchů popsaných rezonanční podmínkou

$$\Delta\omega \approx \omega_{UH}(\mathbf{r}) - s\omega_{Be}(\mathbf{r}) = 0. \quad (6)$$

Zbývá poznamenat, jak dynamika rekonexe ve sluneční erupci modelovaná sadou MHD rovnic (1) ovlivňuje radiovou emisi: děje se tak prostřednictvím závislosti frekvencí ω_{pe} a ω_{Be} obsažených implicitně ve vztahu (3) na makroskopických parametrech plazmatu (hustota a magnetické pole).

3. VÝSLEDKY

Ukázka výsledků 2D MHD modelování je na Obr. 3. Obrázek znázorňuje časový snímek modelované dynamiky magnetické rekonexe v erupci. Výsledky kvalitativně správně reprodukuje některé jevy pozorované v erupcích, jako je narůstající arkáda magnetických smyček a vyvržení plazmoidu

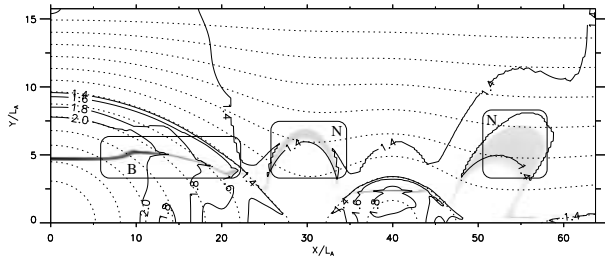


Obr. 3. Snímek rekonexe magnetického pole v 2D MHD modelu sluneční erupce. Vlevo: magnetické siločáry (křivky) a proudová hustota (červeno-modrá škála). Vpravo: hustota plazmatu v úrovních šedi. Na pozadí hustotně stratifikované atmosféry nad fotosférou (dolní hranice obrázku) je dobře patrná narůstající arkáda magnetických smyček, výtrysk hmoty z prostoru rekonexe a vyvržení plazmoidu.

i procesy předpokládané analytickou teorií magnetické rekonexe – vertikální výtrysk plazmatu z místa přepojování siločar. Celá dynamika modelu erupce je zachycena na přiložené animaci *rekonexe.mpg*.

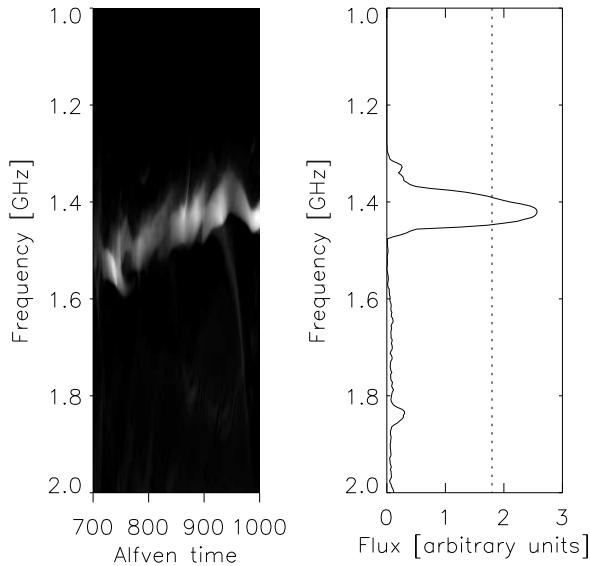
Jak již bylo řečeno, na výsledky MHD modelování erupce přímo navazuje výpočet radiové emise z modelovaného prostoru rekonexe. Obrázek 4 ukazuje časový snímek rozložení radiového jasu integrovaného přes všechny frekvence v prostoru rekonexe. Vlákniatá struktura radiového zdroje sleduje povrch daný rezonanční podmínkou (6) a jak je patrné, leží v blízkosti plazmového výtrysku, jenž je pravděpodobným zdrojem turbulence v tomto prostoru. Zkoumáním spektra (viz níže) modelovaného radiového záření bylo zjištěno, že se v zásadě skládá ze dvou komponent – intenzivní úzkopásmové složky a difuzního širokopásmového pozadí. Zdroje těchto komponent byly rovněž identifikovány a jsou vyznačeny v Obr. 4.

Vzhledem k tomu, že dosud neexistuje přístroj schopný pozorovat na mnoha kanálech v GHz pásmu radiové mapy podobné Obr. 4, má největší význam z hlediska přímého porovnání s pozorováními konstrukce modelovaných radiových spekter a především jejich časového vývoje (dynamická radiová spektra). Výsledky modelování radiových spekter záření z prostoru rekonexe ukazuje Obr. 5. Hlavním rysem dynamického radiového spektra (vlevo) je úzkopás-

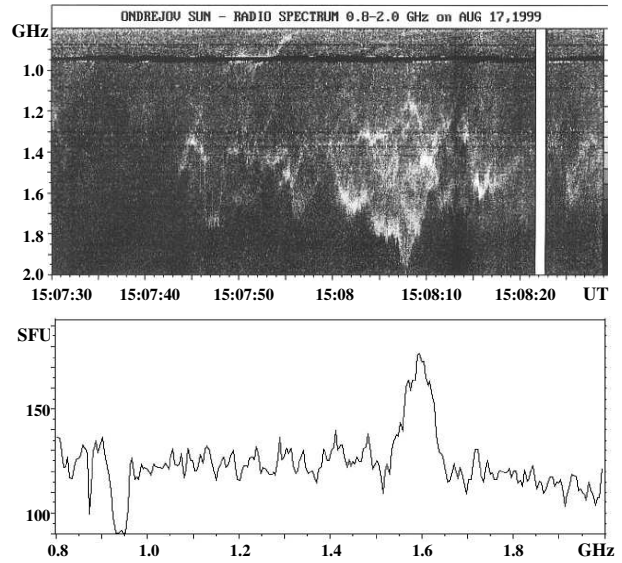


Obr. 4. Snímek struktury radiového zdroje v rámci prostoru rekonexe integrovaný přes všechny frekvence (takto by zdroj viděl hypotetický radio-heliograf s nekonečnou šířkou pásma). Z důvodů úspory místa byla oproti Obr. 3 použita jen levá z obou souměrných polovin simulačního obdélníka a navíc otočena o 90° . V obrázku jsou identifikovány zdroje úzkopásmové (N, narrowband) a širokopásmové pozad'ové (B, background) radiové emise.

mová emise s časem prudce měnící svoji pozici ve frekvenci. Tato úzkopásmová emise je doprovázena difuzním slabým pozadím, jak je lépe patrné na okamžitém spektru na obrázku vpravo. Dalším studiem bylo zjištěno, že tyto složky pocházejí z různých zdrojů (viz Obr. 4).



Obr. 5. Modelované dynamické radiové spektrum záření z prostoru rekonexe v 2D MHD modelu erupce (vlevo) a jeden jeho časový řez (okamžité spektrum; vpravo). Hlavním rysem spektra je úzkopásmová emise („čára“) měnící chaoticky frekvenci maxima radiového toku doprovázená širokopásmovým pozad'ovým šumem mnohem nižší intenzity.



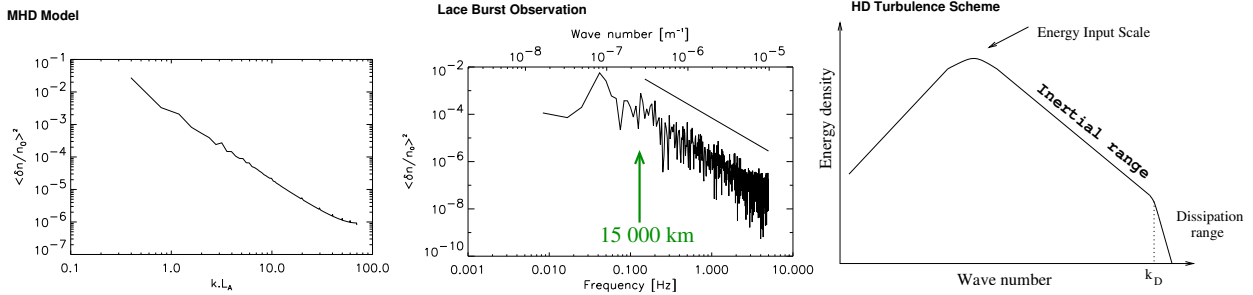
Obr. 6. Pozorované dynamické radiové spektrum vzplanutí „lace“ (nahore) a jeden jeho časový řez (okamžité spektrum; dole). Typickým rysem je opět kombinace úzkopásmových emisních „čar“ měnících svoji pozici ve spektru a difuzního pozadí (srovnej s Obr. 5).

4. DISKUSE

Modelovaná spektra radiového záření z oblasti rekonexe (Obr. 5) velmi silně připomínají spektra radiových vzplanutí typu „lace“, skutečně pozorovaných během slunečních erupcí – viz Obr. 6. Kromě shodných rysů v okamžitých spektrech (úzkopásmová emise doprovázená difuzním pozadím) a podobného charakteru dynamiky spekter (rychlý pohyb emisní linie po frekvencích) byla nalezena i hlubší souvislost. Karlický et al. (2001) analyzovali dynamiku frekvenční polohy maxima radiového toku pro vybranou emisní linii metodou Fourierovy transformace a zjistili, že výkonové spektrum časových variací frekvence středu emisní „čáry“ vykazuje mocninnou závislost se spektrálním indexem $s \approx -2$. Protože frekvence vyzařování f je v uvažovaném mechanismu plazmové emise svázána s částicovou hustotou n plazmatu vztahem

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{ne^2}{m_e \epsilon_0}}, \quad (7)$$

zjištěná mocninná závislost naznačuje, že radiová emise je ovlivněna turbulencí v oblasti zdroje – nejpravděpodobněji v oblasti výtrysku z rekonexe nebo jeho okolí. Předpokládáme-li za hlavní zdroj časových variací hustoty ve zdroji unášení hustotních nehomogenit (zhruba Alfvénovou rychlostí) plazmovým výtryskem přes oblast zdroje, lze ze spektra časových variací odvodit i prostorové spektrum hustotních nehomogenit. Výsledky této analýzy



Obr. 7. Porovnání Fourierových výkonových spekter fluktuací elektronové hustoty v 2D MHD modelu rekonexe v erupci (vlevo), a odvozených analýzou časových změn frekvence maxima vybrané emisní „čáry“ pozorované během vzplanutí „lace“ (uprostřed) se schematickým obrazem výkonového spektra hydrodynamické turbulence (vpravo). Ztotožněním maxima na spektru odvozeném z pozorování (uprostřed) se škálou vstupu energie do systému (vpravo) můžeme odhadnout příčný rozměr výtrysku z rekonexe na 15000 km.

ukazuje prostřední panel na Obr. 7 – časové variace frekvence byly přepočítány na fluktuace hustoty podle vztahu (7), horní vodorovná osa ukazuje prostorové frekvence hustotních nehomogenit přepočítané z časových (dolní osa) za uvedeného předpokladu advekce Alfvénovou rychlostí. Porovnáním s výkonovým spektrem hustotních nehomogenit v MHD modelu rekonexe (levý panel na Obr. 7) zjistíme zajímavou shodu – i toto spektrum jeví mocninnou závislost se spektrálním indexem $s \approx -2$.

Na základě těchto souvislostí věříme, že pozorované radiové vzplanutí typu „lace“ můžeme identifikovat s modelovaným zářením z oblasti rekonexe. Znalost detailního modelu vzplanutí typu „lace“ z druhé strany umožňuje jeho využití pro diagnostiku parametrů prostředí v radiovém zdroji. Vůbec poprvé takto můžeme ze spektra hustotních variací odvozených analýzou pozorovaných emisních linií ve vzplanutí „lace“ (prostřední panel) odhadnout úroveň turbulence v radiovém zdroji. Přímou integrací spektra byla odhadnuta střední kvadratická odchylka hustotních fluktuací na *r.m.s.* ≈ 0.1 . Další možnosti naznačuje porovnání se schematickým výkonovým spektrem hydrodynamické turbulence (Obr. 7, pravý panel). Nalezením zlomových bodů na spektru odvozeném z pozorování bychom byli schopni odvodit škálu vstupu energie do systému (výtrysku z rekonexe) i charakteristický rozměr konce turbulentní kaskády, na kterém probíhá disipace energie a z kterého lze odvodit další parametry plazmatu. Zatímco vysokofrekvenční konec spektra je patrně mimo možnosti časového rozlišení současných radiových spektrografů, zlom v závislosti na opačné straně spektra odpovídající škále vstupu energie do systému může být, byť s jistým otazníkem, na spektru odvozeném z pozorování (prostřední panel) nalezen. S jistou dávkou opatrnosti lze tvrdit, že škála vstupu energie do výtrysku – tedy přibližný největší příčný rozměr výtrysku je ≈ 15000 km.

5. ZÁVĚR

Přestože existuje rámcová představa mechanismu slunečních erupcí, která je v souladu s hlavními pozorovanými jevy, mnoho podstatných detailů mechanismu slunečních erupcí není dosud známo. Z druhé strany, naše jediné relevantní informace o procesech v erupcích přicházejí prostřednictvím elektromagnetického záření. Pro přímou konfrontaci teorie se skutečností je tedy nutné budovat modely, jejichž finální výstupy jsou přímo srovnatelné s pozorováními. V této práci je popsána snaha o vytvoření takového modelu – vycházející z obecných předpokladů magneto-hydrodynamiky je simulován průběh magnetické rekonexe ve sluneční erupci, a ten je dále sledován prostřednictvím specifické radiové emise z oblasti rekonexe. Emise v radiové oblasti byla zvolena především proto, že (spolu s tvrdým rentgenovým zářením) je produkována již během impulsové fáze erupcí a přináší tak vzhled do místa primárního uvolnění energie.

Spočtené radiové spektrum, jeho dynamika i hlubší souvislosti zjištěné Fourierovou analýzou hustotních nehomogenit umožňují identifikovat toto modelované záření se vzplanutím typu „lace“ pozorovaném ondřejovským spektrografem během slunečních erupcí. Naopak, znalost modelu pro tento typ vzplanutí přináší možnost jeho diagnostického využití. Vůbec poprvé tak byly odhadnuty parametry plazmové turbulence v oblasti radiového zdroje.

Na závěr poznamenejme, že kromě interpretace vzplanutí typu „lace“ a její aplikace pro diagnostiku přináší shoda modelovaných a pozorovaných dat i další ověření globálního modelu sluneční erupce založeného na procesu rekonexe magnetického pole.

Poděkování

Výzkum je prováděn za podpory Centra pro teoretickou astrofyziku a grantů IAA3003202 a

LITERATURA

- Bárta, M., Karlický, M. 2005 ApJ 631, 612
Karlický, M.; Bárta, M., Jiříčka, K., Mészárosová, H.,
Sawant, H.S., Fernandes, F.C.R., Cecatto, J.R. 2001,
A&A 375,638
Kliem, B., Karlický, M., Benz, A.O. 2000, A&A 360, 715
Michajlovskij, A.B. 1975 Theory of Plasma Instabilities,
Consultants Bureau, New York
Shibata, K., Tanuma, S. 2001, Earth, Planets & Space
53, 473