

Hana Mészárosová; Michal Sobotka; Jana Kašparová; Marian Karlický
Aktivita ve spodních vrstvách sluneční atmosféry

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 50 (2005), No. 4, 286--293

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141282>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2005

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Aktivita ve spodních vrstvách sluneční atmosféry

Hana Mészárosová, Michal Sobotka, Jana Kašparová a Marian Karlický, Ondřejov

1. Úvod

Během několika posledních desetiletí prošla sluneční fyzika významným vývojem. Je to dáno pokrokem jak v přístrojovém pozorování Slunce, tak i v rozvoji teoretických modelů. Současný rozvoj technologií a observačních technik umožňuje pozorovat sluneční aktivitu prakticky v celém rozsahu elektromagnetického spektra. Taková pozorování nám dávají nový a podrobnější pohled na Slunce, zvláště na jeho atmosféru. Přehled o novinkách v nejnižší atmosférické vrstvě, fotosféře, podává následující kapitola. O nejnovějších výsledcích ve výzkumu chromosféry, přechodové oblasti a spodní části koróny pojednávají třetí a čtvrtá kapitola.

2. Sluneční fotosféra

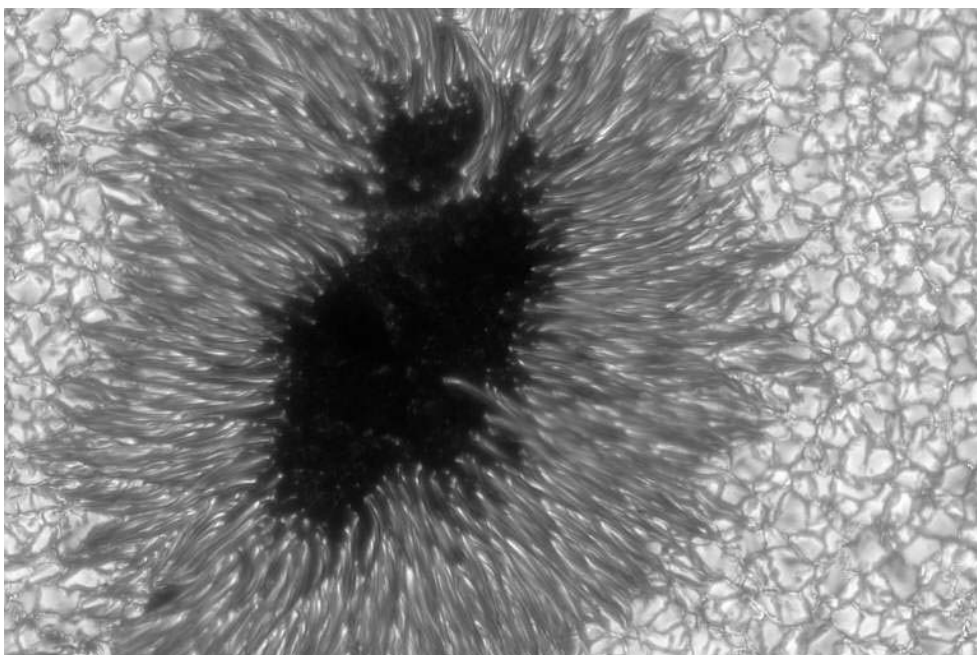
Slunce stejně jako všechny ostatní hvězdy nemá pevný povrch. Rozlišujeme sluneční atmosféru, ze které k nám přichází záření a jež je dostupná přímému pozorování, a nitro, kde je prostředí natolik neprůhledné, že nemůžeme vidět dovnitř.

Nejvyšší vrstvou slunečního nitra je konvektivní zóna, asi 190 000 km silná, sahající až k viditelnému povrchu Slunce, tedy ke spodní hranici sluneční atmosféry. Energie se zde přenáší prouděním plazmatu, konvekcí. Plazma tu cirkuluje v mohutných buněkách. V jejich středních částech stoupá ohřáté nahoru a na okrajích buněk klesá ochlazené do hlubin. Existuje několik hierarchických stupňů konvektivních buněk. Buňky nižších stupňů se jako celek účastní pohybu vyšších stupňů. Proudění nejnižšího stupně se na viditelném povrchu Slunce projevuje jako zrnitá struktura, granule.

Viditelným povrchem Slunce je nejnižší vrstva sluneční atmosféry, fotosféra, silná jen 500 km. V ní velmi rychle klesá hustota a roste průzračnost plazmatu, takže skoro všechna tepelná energie přivedená konvekcí se může vyzářit do okolního prostoru. Teplota fotosféry je přibližně 5800 K, a proto záření, které k nám přichází, odpovídá převážně viditelnému světlu. Zdrojem spojitého spektra fotosféry jsou záporné ionty vodíku (H^-), které vznikají zachycováním volných elektronů vodíkovými atomy.

Ing. HANA MÉSZÁROSOVÁ, PhD. (1959), RNDr. MICHAL SOBOTKA, CSc. (1954), Mgr. JANA KAŠPAROVÁ, PhD. (1976), a RNDr. MARIAN KARLICKÝ, DrSc. (1949), pracují v Astronomickém ústavu AV ČR, Fričova 298, 251 65 Ondřejov; e-mail: (hana, msobotka, kasparov, karlicky)@asu.cas.cz

Nejvýraznější strukturou v klidné fotosféře je granulace. Tvoří ji jasné objekty nepravidelného tvaru, granule, oddělené temnými a úzkými mezigranulárními prostory. V granulích proudí horké plazma nahoru a rozlévá se do stran, v mezigranulárních prostorech klesá dolů. Velikosti granulí se pohybují v širokém rozmezí od 150 do 2000 km, přičemž malých granulí je více než velkých. Největší část slunečního povrchu pokrývají granule o průměru 1000 km. Asi 60 % granulí vzniká fragmentací starých granulí, některé naopak jejich slučováním a menší část se objevuje spontánně v mezigranulárních prostorech. Po svém vzniku granule rostou, až se zhruba po pěti až osmi minutách rozpadnou, sloučí s jinými granulemi, nebo se zmenší a zmizí.



Obr. 1. Sluneční skvrna pozorovaná 18. června 2004 švédským slunečním dalekohledem o průměru 1 m, La Palma (pozorovatelé M. Sobotka, K. Puschmann a C. Möstl). Dobře je zde patrná struktura umbry, penumbry a okolní fotosférické granulace.

Velmi častým úkazem jsou explodující granule, kdy se fragmenty rozpadajících se granulí rozbíhají rychlostmi kolem 1 km/s. Exploze a fragmentace granulí se často opakují na stejných místech a vytvářejí tak síť oblastí s rozbíhavým rychlostním polem. Zároveň je většina granulí v těchto oblastech vývojově spřízněna, protože granule vzniklé fragmentací se po čase opět rozpadají a řetězec po sobě následujících rozpadů vede k vytvoření početných „rodin“ granulí. Tyto rodiny zvětšují svou plochu do doby, než jsou vytlačeny jinými rodinami (viz např. [15]). Stabilita míst výskytu explodujících granulí a existence rodin ukazují na možnou přítomnost konvektivních proudů o rozměrech větších než granulace. Toto proudění, nazvané mesogranulace, je stále předmětem diskusí.

Ještě větší konvektivní systém se nazývá supergranulace. Pozorujeme ji především v rozložení horizontálních rychlostí na slunečním povrchu. V buňkách rozměru 30 000 km a s životní dobou jeden až dva dny teče plazma od středu směrem k okrajům rychlostí přibližně 0,5 km/s. Horizontální proudění v supergranulích unáší malé rozptýlené magnetické elementy a koncentruje je na hranicích supergranulárních buněk. Tím se v určitých místech zvyšuje magnetický tok a průměr silotrubic roste. V důsledku toho se objevují tzv. fakule, které pozorujeme ve viditelném světle jako jasné struktury v blízkosti okraje slunečního disku. Fakule pozorované v infračerveném světle v oblasti kolem středu disku jsou naopak temnější než jejich okolí. Tento fakt se vysvětluje tak (např. [19]), že zatímco u okraje disku vidíme jasné stěny silotrubic, u středu disku se v infračerveném světle díváme kolmo do hlubších vrstev, které jsou chladnější v důsledku potlačení konvektivního přenosu tepla silným magnetickým polem. Je-li totiž magnetické pole koncentrováno natolik, že jeho energie je větší než kinetická energie konvektivních pohybů, forma konvekce se mění z cirkulace na pomalé kmity, které jsou méně účinné při šíření tepelné energie. Proto oblasti s vysokou hodnotou magnetického toku jsou ve fotosféře temné a chladné.

Nejvýraznějším projevem sluneční aktivity ve fotosféře jsou sluneční skvrny a póry. Póra je tvořena silnou magnetickou silotrubicí nebo svazkem mnoha tenkých silotrubic, protínajících zhruba kolmo fotosféru. Její průměr je mezi 1000 a 6000 km a magnetické pole v ní dosahuje 0,17 T. Jas pór ve viditelném světle je dvakrát až pětkrát slabší než jas okolní fotosféry. Pokud se magnetický tok v póře zvětší nad určitou mez, magnetická silotrubice nebo svazek silotrubic se začne ve fotosféře rozevírat a magnetické pole na okraji póry se sklání stále víc k vodorovné hladině. Dojde k vytvoření penumbry, vláknité struktury kolem temného středu — umbry (viz např. [12]). Tak vzniká sluneční skvrna.

Sluneční skvrny (obr. 1) mají většinou průměr 6000 až 40 000 km a magnetické pole v umbře dosahuje až 0,3 T. Umbra září přibližně desetkrát slaběji než okolní fotosféra a její teplota je asi o 2000 K nižší. Pozorujeme-li skvrny s dostatečně vysokým prostorovým rozlišením, vidíme velmi bohatou vnitřní jemnou strukturu umbry a penumbry. Mnoho skvrn má umbru složenou z více nezávislých částí, umbrálních jader. Umbrální jádra si většinou zachovávají svou identitu po celý vývoj skvrny. Jsou oddělena světelnými mosty, protáhlými jasnými útvary se zrnitou nebo vláknitou strukturou. Světelné mosty jsou místa se sníženou intenzitou magnetického pole, ve kterých je konvekce sice redukována, ale není potlačena. Tomu nasvědčuje jak jejich zvýšený jas, tak i vertikální pohyby měřené z Dopplerova posuvu spektrálních čar.

K pozorování fotosféry potřebujeme velmi vysoké prostorové rozlišení, v ideálním případě kolem 100 km na povrchu Slunce. Takové rozlišení mohou poskytnout jen dalekohledy s průměrem objektivu alespoň jeden metr na observatořích s vynikajícími pozorovacími podmínkami nebo v kosmu. Jedním z takových míst je Evropská severní observatoř na Kanárských ostrovech, kterou využívají i čeští astronomové. Na ostrově La Palma byl v roce 2002 uveden do provozu Švédský sluneční dalekohled, věžový refraktor o průměru jeden metr, vybavený adaptivní optikou. Hned první snímky slunečních skvrn a granulace pořízené tímto přístrojem ukázaly detaily, které jsme předtím nikdy neviděli [16]. Němečtí sluneční astronomové dokončují na ostrově Tene-

rife dalekohled GREGOR o průměru 1,5 metru s adaptivní optikou, na jehož stavbě se podílí i Astronomický ústav AV ČR. Američané plánují obří sluneční dalekohled s průměrem 4 metry. A v srpnu 2006 odstartuje japonská družice Solar-B s půlmetrovým optickým dalekohledem. Můžeme očekávat, že díky těmto novým přístrojům se podstatně rozšíří naše znalosti o fotosféře, která je „kuchyní“ sluneční aktivity.

3. Sluneční atmosféra v optické, UV a rentgenové emisi

Procesy ve vyšších vrstvách sluneční atmosféry, tj. v chromosféře, přechodové oblasti a koróně, lze studovat pomocí záření nejen v optickém oboru, ale i na kratších vlnových délkách. Chromosféra a protuberance se např. tradičně pozorují v čáře $H\alpha$ atomu vodíku, UV záření v čarách vysoce ionizovaných prvků vzniká především v přechodové oblasti, kde teplota prudce narůstá z chromosférických $\sim 2 \times 10^4$ K do koronálních hodnot $\sim 10^6$ K; ke generování emise v rentgenovém a gama oboru dochází zejména během slunečních erupcí. Pro studium procesů v těchto vrstvách atmosféry se často využívají pozorování z družic. Jedním z nejznámějších projektů je evropsko-americká družice SOHO s 12 přístroji na palubě, které od roku 1995 umožňují studium konvekční zóny, struktury a dynamiky fotosféry, přechodové oblasti, koróny a slunečního větru. Analýzou koronálních čar Mg X a Si XII [17] je např. možno zrekonstruovat 3D strukturu filamentu (oblak plazmatu držený magnetickým polem) a odhadnout tak jeho hmotnost, která je srovnatelná s typickou hmotností plazmatu vyvrženého z koróny při tzv. „coronal mass ejection“ (výrony koronální hmoty).

Dalším projevem sluneční aktivity, jímž se také zabýváme v Astronomickém ústavu AV ČR v Ondřejově, jsou sluneční erupce, při kterých dochází k náhlému uvolnění energie až 10^{25} J na škálách několika minut. V současné době se domníváme, že erupce jsou způsobeny přeměnou energie magnetického pole při tzv. rekonexi magnetického pole v koróně. Energie je uvolněna ve formě urychlených částic, ohřevu a pohybu plazmatu. Sluneční erupce produkují zvýšenou emisi prakticky v celém elektromagnetickém spektru, zejména pak v rentgenovém a gama oboru. Příčinou rentgenové emise je brzdné záření elektronů urychlených na energie desítek až stovek keV, respektive MeV pro protony, gama záření vzniká při srážkách energetických iontů s atomy okolního plazmatu. Analýzou této vysokoenergetické emise můžeme porozumět procesům náhlého uvolnění energie, urychlování částic a jejich šíření. Sluneční rentgenová emise byla během posledních deseti let detailně studována pomocí dat z japonské družice Yohkoh, v letech 2000–2002 se na detekci slunečního rentgenového toku podílel i český spektrometr HXRS. V roce 2002 byla vypuštěna americká družice RHESSI detekující s vysokým energetickým (až 1 keV), prostorovým (až 2 arcsec) a časovým rozlišením (až ms) rentgenovou a gama emisi v rozsahu 3 keV až 17 MeV. Její data již přispěla k řadě nových poznatků. RHESSI poskytla historicky první obrázek gama zdroje (2,223 MeV) ve sluneční erupci [6]. Zjištěný rozdíl v pozicích gama a rentgenových zdrojů, jež jsou indikátory urychlených iontů a elektronů, byl vysvětlen pomocí modelu stochastického urychlování v prostředí magnetohydrodynamické turbulence [3]. Družice RHESSI také poprvé pozorovala ve vrcholech magnetických smyček rentgenové

zdroje ~ 50 keV [21], které jsou typické spíše pro ukotvení smyček v chromosféře. Nově detekovaný rentgenový koronální zdroj byl ztotožněn s proudovou vrstvou nacházející se v oblasti rekonexe magnetického pole [20]. Princip vzniku těchto zdrojů může být ale také interpretován v rámci modelu kolabující magnetické pasti [10].

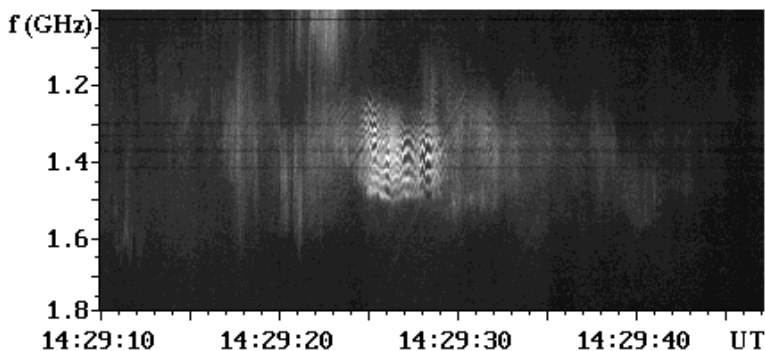
Při vniknutí svazku vysokoenergetických elektronů do plazmatu se vytváří tzv. zpětný proud, který neutralizuje náboj a proud generovaný svazkem. Zpětný proud způsobuje v chromosféře změnu polarizace spektrálních čar vodíku $H\alpha$ a $H\beta$ a využitím tohoto efektu byl také poprvé detekován [5]. Předpokládá se, že zpětný proud i vysokoenergetické elektrony ovlivňují srážkové přechody v atomech a následně i tvar a intenzity spektrálních čar [11]. Ke studiu chromosférické emise ve spektrálních čarách a kontinuích je nutno používat metodu tzv. non-LTE přenosu záření, jelikož obsazení hladin atomů nejsou dána lokální teplotou a hustotou, ale silně závisí na poli záření, jež nemá planckovský charakter a je ovlivněno vlastnostmi plazmatu v atmosféře. Tato metoda se např. využívá v komplexních zářivě hydrodynamických modelech slunečních erupcí [1].

4. Rádiové emise spodní části koróny

Ve výzkumu slunečních erupcí hrají důležitou úlohu též radioastronomická pozorování. Spolu s rentgenovými pozorováními nám poskytují informaci o jednotlivých fázích slunečních erupcí. Rádiové emise na konkrétních vlnových délkách přicházejí z oblastí odpovídajících příslušné hustotě elektronů nebo příslušnému magnetickému poli. Tyto dva parametry se mění s výškou ve sluneční atmosféře, a tak jednotlivé rádiové emise odpovídají zdrojům lokalizovaným v určité atmosférické vrstvě. Rádiové emise se dělí do dvou skupin: *mm-cm oblast* vlnových délek ($\gtrsim 3000$ MHz) je generována gyrosynchrotronním emisním mechanismem a *dm-m oblast* vlnových délek ($\lesssim 3000$ MHz) má původ v procesech plazmových emisí nadteplných částic [13]. Zatímco komponenta generovaná gyrosynchrotronním mechanismem je širokopásmová a relativně „hladká“, bez vnitřních struktur, druhá komponenta (plazmové emise) je charakterizována úzkopásmovými jemnými strukturami a rychlými časovými variacemi.

Hranice mezi oběma oblastmi není fixní, ale mění se pro jednotlivé erupce případ od případu. Nicméně radiospektrografická pozorování v Astronomickém ústavu v Ondřejově (frekvenční rozsah 0,8 až 4,5 GHz, časové rozlišení 0,1 s; viz <http://sunk1.asu.cas.cz/~radio/>) ukazují, že ve většině případů se tato hranice nalézá v oblasti 1 až 4 GHz. To je jeden z důvodů, proč se této oblasti decimetrických vlnových délek věnuje pozornost. Je to oblast odpovídající spodní části koróny, resp. přechodové oblasti, v případě největších erupcí. Výzkum v této oblasti je navíc nejméně prozkoumanou oblastí rádiových pozorování Slunce, což je dáno postupným rozvojem pozemské observační techniky, která tento výzkum umožnila teprve v posledních desetiletích.

V současnosti dělíme decimetrická vzplanutí do deseti morfologických skupin jemných struktur [7]: *pulzace*: série mnoha širokopásmových (≥ 200 MHz) pulzů, které



Obr. 2. Příklad rádiové emise, tzv. „zebray“, pozorované v Ondřejově 2. května 1998. Je zde patrný časový průběh zvlněných emisních čar s téměř pravidelnými vzájemnými odstupy, připomínajícími vzor zebry. Jedním z možných modelů tohoto vzplanutí je rezonanční proces v magnetické smyčce.

jako celek trvají více než 10 s; *izolované širokopásmové pulzy*: malá skupina individuálních pulzů, kde trvání jednoho pulzu nepřesahuje 10 s; *kontinua*: širokopásmová emise bez vnitřních struktur, trvající déle než 10 s; *rychle drifující záblesky*: širokopásmové individuální záblesky s měřitelným driftem alespoň $\pm 100 \text{ MHz} \cdot \text{s}^{-1}$; *pomalu drifující záblesky*: individuální záblesky s driftem menším než $\pm 100 \text{ MHz} \cdot \text{s}^{-1}$; *úzkopásmový typ III záblesků*: krátké ($\sim 1 \text{ s}$) úzkopásmové ($< 200 \text{ MHz}$) rychle drifující ($> 100 \text{ MHz} \cdot \text{s}^{-1}$) skupiny záblesků; tzv. *úzkopásmové „spikes“*: velká skupina extrémně krátkých ($\leq 0,1 \text{ s}$) a úzkopásmových ($\leq 50 \text{ MHz}$) záblesků; *„fibers“*: zpravidla velká skupina záblesků s téměř pravidelným opakováním a frekvenčním driftem okolo $100 \text{ MHz} \cdot \text{s}^{-1}$. V mnoha případech se vyznačují tím, že jednotlivé záblesky mění jednou i vícekrát svůj drift. Dále jsou to *zebray*: několik téměř pravidelných emisních čar se zvlněným vzhledem (obr. 2) a *„laces“ (krajky)*: zcela nový typ záblesků poprvé pozorovaný a popsán skupinou českých radioastronomů v Ondřejově (obr. 3). Pro tento typ jsou charakteristické velmi rychlé variace ve frekvencích, vytvářející ve spektrálním obrázku vizuální dojem krajky („lace“). Takovéto záblesky se vyskytují jen velmi vzácně. Nejběžnějšími typy rádiových vzplanutí jsou kontinua a izolované širokopásmové pulzy.

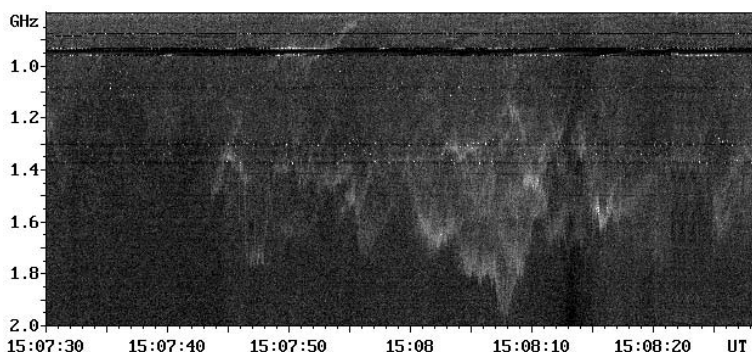
K určení bližších fyzikálních parametrů jednotlivých typů jemných struktur a k určení lineárního či nelineárního chování daného systému používáme speciální metody statistické analýzy. Tyto výsledky jsou často doplňovány výsledky z analýzy rentgenových dat (Yohkoh, RHESSI, HXRS). Zjištění skutečnosti z pozorování jsou pak využity při numerickém modelování jednotlivých projevů sluneční aktivity v atmosféře Slunce.

K určení periodicit pozorovaných rádiových vzplanutí a k odhadu jejich pravděpodobností používáme nejčastěji Fourierovu metodu. Výsledky diskrétní Fourierovy transformace [14] pak porovnáváme s výsledky jiných nezávislých metod, např. waveletovských analýz. Metody waveletovské analýzy, např. „triangle-like wavelet“ metoda [18], umožňují lokální dekompozici časových škál série také pro nestacionární

procesy. To je důležité rozšíření Fourierovy analýzy, která provádí pouze globální dekompozici stacionární časové série.

Nelineární analýza, založená na teorii deterministického chaosu, je důležitým prostředkem při studiu dynamiky složitých systémů. Např. metoda korelační dimenze [4] nám dovoluje určit, zda systém je či není nízkodimenzionální, zda je deterministický či stochastický. Tím se stanoví počet nezávislých proměnných potřebných k popisu systému. Tzv. metoda „surrogate data“ [22] umožňuje detekovat přítomnost možných nelinearit v časové sérii, a to i bez předpokladu existence determinismu.

K nejvíce studovaným jemným strukturám v současnosti patří „spikes“, vyznačující se nelineárním chováním a vysokou dimenzionalitou. Podle navrhovaného modelu [2] jsou spikes výsledkem rádiové emise ve výtryscích turbulentního plazmatu v průběhu rekonexe magnetického pole.



Obr. 3. Příklad rádiové emise, tzv. „laces“, pozorované v Ondřejově 17. srpna 1999. Vidíme zde časový průběh unikátních záblesků s velmi rychlými frekvenčními variacemi.

Dalším, v poslední době často studovaným typem jsou pulzace s pomalým globálním frekvenčním driftem, kvaziperiodickým chováním a korelací s rentgenovým zářením [9]. Tyto pulzace jsou spojovány s vyvržením plazmoidu do meziplanetárního prostoru. Plazmoid je útvar, představující část vyvrženého plazmatu s plně nebo částečně uzavřenou a izolovanou strukturou magnetického pole. Také plazmoid je produktem rekonexe magnetického pole.

Nově popsaným a studovaným typem jsou „laces“ — unikátní záblesky s velmi rychlými frekvenčními variacemi (0,01 až 3,0 Hz) trvajících i několik minut [8]. Přítomnost frekvenčních variací odráží rychlé změny parametrů turbulentního plazmatu příslušných rádiových zdrojů.

Zajímavé a vzácně se vyskytující vzplanutí jsou zebry. Ve studovaném období 1992–2000 jsme zaznamenali pouze 24 takovýchto případů [7] během radiospektrografických pozorování v Astronomickém ústavu v Ondřejově. Parametry jednotlivých zebber se mění případ od případu. Dále uvádíme průměrné hodnoty jevu: doba trvání je 7,1 sekund, počet zvlněných emisních čar je 9,7 pruhů a frekvenční odstup mezi jednotlivými pruhy činí 28,3 MHz. Tento typ vzplanutí není zatím zcela objasněn.

Rezonanční proces v magnetické smyčce, vyjádřený rezonanční podmínkou

$$\omega_{UH} = \sqrt{\omega_{pe}^2 + \omega_{Be}^2} \approx s\omega_{Be}, \quad (1)$$

kde ω_{UH} je horně-hybridní frekvence, ω_{pe} je plazmová frekvence, ω_{Be} je elektron-cyklotronová frekvence a s je celé číslo, je jedním z modelů, který vysvětluje pozorované zebry. Tyto a další typy jemných struktur a jejich souvislosti s pozorováními prováděnými v ostatních částech elektromagnetického spektra jsou předmětem současného výzkumu sluneční atmosféry.

5. Závěr

Proudý částic vyvržených během erupcí občas zasáhnou i Zemi, kde ovlivňují zemské magnetické pole, vyvolávají polární záře a mohou i přerušit spojení na krátkých vlnách. Proto nám studium sluneční aktivity, zejména erupcí, pomáhá porozumět dějům nejen v atmosféře Slunce a v meziplanetárním prostoru (kosmické počasí), ale i některým dějům zde na Zemi. Také z tohoto důvodu je třeba ve výzkumu sluneční atmosféry pokračovat.

L i t e r a t u r a

- [1] ABBETT, W. P., HAWLEY, S. L.: *Astrophys. J.* (1999), 521, 906.
- [2] BÁRTA, M., KARLICKÝ, M.: *Astron. Astrophys.* (2001), 379, 1045.
- [3] EMSLIE, A. G. a kol.: *Astrophys. J.* (2004), 302, L69.
- [4] GRASSBERGER, P., PROCACCIA, I.: *Phys. Rev. Lett.* (1983), 50, 346.
- [5] HÉNOUX, J.-C., KARLICKÝ, M.: *Astron. Astrophys.* (2003), 407, 1103.
- [6] HURFORD, G. J. a kol.: *Astrophys. J.* (2003), 595, L77.
- [7] JIŘIČKA, K. a kol.: *Astron. Astrophys.* (2001), 375, 243.
- [8] KARLICKÝ a kol.: *Astron. Astrophys.* (2001), 375, 638.
- [9] KARLICKÝ a kol.: *Astron. Astrophys.* (2002), 395, 677.
- [10] KARLICKÝ, M. KOSUGI, T.: *Astron. Astrophys.* (2004), 419, 1159.
- [11] KARLICKÝ, M. a kol.: *Astron. Astrophys.* (2004), 416, L16.
- [12] KEIL, S. L. a kol.: *Astrophys. J.* (1999), 510, 422.
- [13] KRÜGER, A.: *Intrudocition to Solar Radio Astronomy and Radio Physics*. D. Reidel Publ. Comp., Dordrecht, Holland 1979.
- [14] PRESS, W. H. a kol.: *Numerical Recipes*. Cambridge University Press 1986.
- [15] ROUDIER, TH., MULLER, R.: *Astron. Astrophys.* (2004), 419, 757.
- [16] SCHARMER, G. B. a kol.: *Nature* (2002), 420, 151.
- [17] SCHWARTZ, P. a kol.: *Astron. Astrophys.* (2004), 421, 323.
- [18] SCHWARZ, U. a kol.: *Astron. Astrophys. Suppl.* (1998), 127, 309.
- [19] SOBOTKA, M. a kol.: *Astrophys. J.* (2000), 544, 1155.
- [20] SUI, L. a kol.: *Astrophys. J.* (2004), 612, 546.
- [21] VERONIG, A. M., BROWN, J. C.: *Astrophys. J.* (2004), 603, L117.
- [22] THEILER, J. a kol.: *Physica D* (1992), 58, 77.