

Jemná štruktúra chromosféry a prechodovej vrstvy

Mgr. Július Koza, PhD.

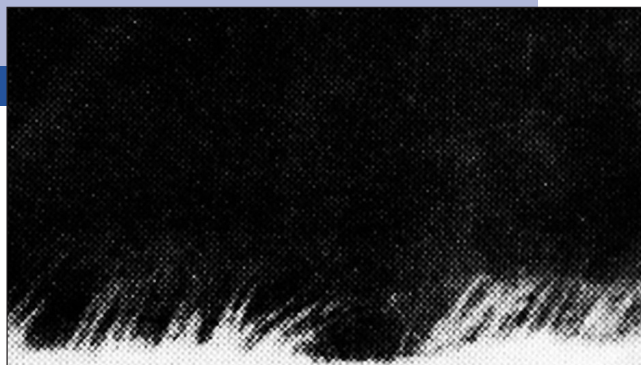
Úvod

Krátko po druhom kontakte a tesne pred tretím môžu pozorovatelia úplného zatmenia Slnka vidieť na niekoľko sekúnd slnečnú chromosféru – jasnočervený prstenec okolo mesačného okraja. Názov pochádza z gréckeho χρωμα (farba) a σφαира (guľa) a zaviedli ho v r. 1869 J. N. Lockyer (slnečný fyzik) a E. Frankland (chemik).

Červenkasté sfarbenie spôsobuje emisia neutrálneho vodíka v spektrálnej čiare H α . Na základe spektroskopických pozorovaní so štrbinou položenou tangenciálne k slnečnému okraju A. Secchi (jezuita) zistil, že chromosféra je pokrytá jasnými, ako vlas tenkými lúčmi, podstatne menšími ako protuberancie. Vo svojej monografii *Le soleil* z roku 1871 prirovnáva túto jemnú štruktúru k horiacemu poľu a detailnosť jeho kresieb (obrázok 1) svedčí o vysokej kvalite jeho prístrojov, ako aj o veľkej pozorovateľskej a kresliarskej zručnosti. Názov spikuly pre jemnú štruktúru chromosféry na slnečnom okraji zaviedol v r. 1945 W. O. Roberts. Skonstruovanie spektroheliografu G. E. Haleom v r. 1892 a laditeľného úzkopásmového filtra B. Lyotom v r. 1933, umožnilo pozorovať a fotografovať chromosféru na disku v najsilnejších čiarach Balmerovej série a v čiarach Ca II K a H. Tieto pozorovania odhalili ďalšie jemné štruktúry chromosféry ako fibrily, škvrnky a zrná (angl. mottles, grains), ktoré sú tmavé voči jasnejšiemu chromosférickému pozadiu a najčastejšie kopírujú hranice supergranúl, teda oblastí s vysokou koncentráciou magnetických elementov. Hoci v odborných kruhoch nevládne zhoda v tom, či sú fibrily, škvrnky a zrná v podstate tá istá štruktúra pozorovaná iba za rozličných podmienok, kvôli jednoduchosti a možno aj oprávnené budeme označovať tieto štruktúry spoločným názvom fibrily. Zo širšieho okruhu otázok, ktorými sa výskum spikúl a fibríl doposiaľ zaoberal, vyberáme pre ilustráciu nasledujúce.

Sú fibrily náprotivkom spikúl na disku?

Hľadanie odpovede narážalo na observačné ťažkosti. Zatiaľ čo spikuly na okraji Slnka vyžadujú dlhšie expozičné časy, kvalitné snímky fibríl na disku Slnka sú exponované veľmi krátkymi časmi. Až počítačovo spracované snímky publikované v rokoch 2000 a 2001 jasne ukázali, že fibrily blízko okraja Slnka pokračujú ďalej nad jeho okrajom ako spikuly.



Obrázok 1. Kresba spikúl z knihy A. Secchiho *Le soleil* z r. 1871.

Ako sa mení dĺžka spikúl a fibríl?

Otázka sa objavila pri analýze dlhých sérií snímok s veľkým uhlovým a časovým rozlíšením. Merania ukázali, že dĺžka spikúl a fibríl sa počas ich života, trvajúceho 3 – 15 minút, môže výrazne meniť. Ich stredná dĺžka je v rozmedzí od 5 000 do 10 000 km. Rýchlostné mapy v krídlach H α čiary ukázali, že predlžovanie a skracovanie fibríl je naozaj dôsledkom pohybu hmoty. Nebolo však jasné, či sa ich dĺžka mení s časom lineárne, alebo nejako ináč, lebo chýbali pozorovania s časovým rozlíšením lepším ako jeden snímok každých 30 sekúnd. Táto otázka úzko súvisí s nasledujúcou.

Aký mechanizmus katalpuje spikuly tak vysoko?

Merania dĺžok spikúl a fibríl s časom naznačili, že ich vrchol opisuje trajektóriu, ktorú je možné aproximovať parabolou. To viedlo k balistickej hypotéze pôvodu fibríl a spikúl. Nejaký neznámy mechanizmus vymršťujú chromosférickú hmotu istou počiatočnou rýchlosťou, podobne ako projek-

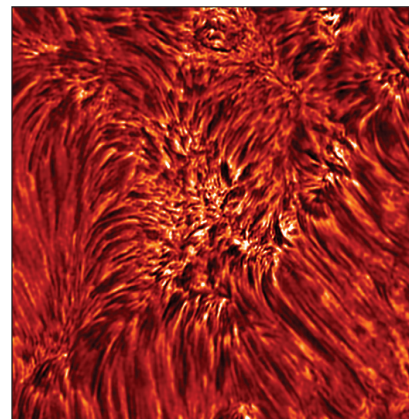
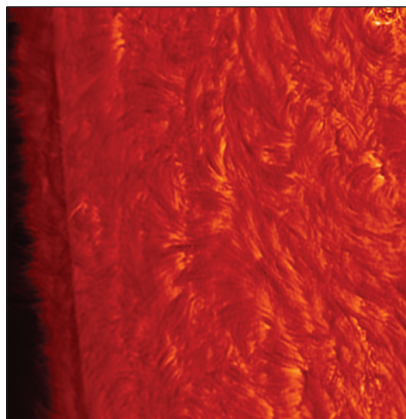
til vypálený zbraňou, a tá sa ďalej pohybuje v homogénnom gravitačnom poli. Už jednoduchý výpočet a porovnanie s pozorovaniami ukazujú neprijateľnosť balistickej hypotézy. Uvažujme zvislú spikulu, ktorá v pozorovaniach dosiahla maximálnu výšku 12 000 km po balistickej (parabolickej) trajektórii. Takáto spikula by mala mať vo výške 2 000 km (horná hranica chromosféry v klasických 1D modeloch) rýchlosť 74 km/s. Ak predpokladáme, že fibrily sú náprotivkom spikúl na disku, potom pozorovania v modrom krídle H α čiary by mali ukázať fibrily aj po preladení filtra do bodu 0,16 nm od centra čiary. Doterajšie pozorovania ukazujú, že fibrily sú pozorovateľné len do 0,12 nm od centra H α a sú pre ne typické rýchlosti 10 – 30 km/s, ktoré sú vyššie ako rýchlosť zvuku v chromosfére. Teda je potrebné nájsť mechanizmus katalpujúci spikuly/fibrily tak vysoko pri relatívne nízkych, no predsa pre chromosféru nadzvukových rýchlostiach.

Ako je udržiavaná rovnováha toku hmoty?

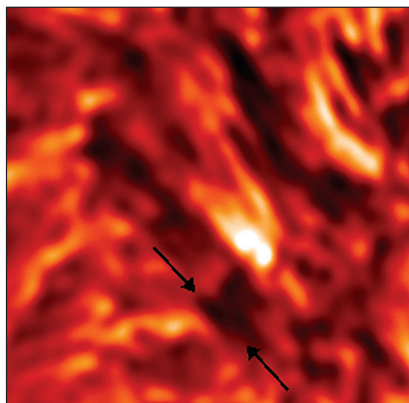
Odhady množstva hmoty prúdajúcej v spikulách ukázali, že toto množstvo je asi 100-krát väčšie ako množstvo hmoty opúšťajúcej Slnko v podobe slnečného vetra. Riešenie tohto paradoxu si vyžaduje mechanizmus udržiavajúci rovnováhu toku hmoty v slnečnej atmosfére. Problém prešahuje do oblasti fyziky prechodovej vrstvy a koróny.

Prečo sú fibrily relatívne tmavé?

Táto veľmi prirodzená otázka o pôvode kontrastu fibríl nie je doteraz uspokojivo zodpovedaná. Príčinou je relatívne vyššia hustota hmoty vo fibrilách voči okoliu, no chýba mechanizmus zodpovedný za zvýšenie hustoty. Vo výškach dosahovaných spikulami je už väčšina vodíka ionizovaná. Čo teda spôsobuje zvýšenie rekombináciu vodíka vo fibrilách? Alebo je to neutrálny vodík vymrštený z nižších vrstiev a udržiavaný počas doby života fibríl ako neutrálny? Najnovšie poznatky ukazujú, že vodík ionizuje a rekombinuje nerovnovážne. To robí celý problém veľmi obtiažnym.



Obrázok 2. Spikuly a fibrily v pokojnej chromosfére v centre H α čiary (vľavo) a na vlnovej dĺžke $-0,03$ nm od centra H α čiary neďaleko stredu disku (vpravo). Holandský otvorený teleskop DOT.



Obrázok 3. Zmeny dĺžky a orientácie vybranej dynamickej fibrily označenej šípkami počas 2,8 minút, v priebehu ktorých sa fibrila pootočila o 15 stupňov. Holandský otvorený teleskop DOT. H α čiara.

Aký je vzťah medzi fibrilami/spikulami a magnetizmom?

Celkové usporiadanie a koncentrácia fibríl na hraniciach supergranúl so zvýšenou koncentráciou magnetických elementov navodzuje myšlienku, že existuje súvis medzi slnečným magnetizmom a jemnou štruktúrou chromosféry. Z tohto predpokladu vychádzajú nedávne práce, ktoré publikovali dr. Bart De Pontieu (Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory) a dr. Vigo Hansteen (Institute of Theoretical Astrophysics, Oslo). Na základe doteraz najlepších pozorovaní chromosféry v H α čiare, získaných pomocou Švédskeho 1-m slnečného teleskopu 4. októbra 2005 (dĺžka série 78 minút s časovým rozlíšením 3 snímky za sekundu), autori ukázali, že podskupina takzvaných dynamických fibríl sa pohybuje presne po parabolických dráhach, a že existuje lineárna závislosť medzi ich počiatočnou rýchlosťou a zrýchlením. Na základe týchto pozorovaní a numerických magnetohydrodynamických simulácií vyslovili hypotézu, že dynamické fibrily sú dôsledkom nárazových vln (šokov), vyvolaných akustickými módmí fotosférických oscilácií, šíriacich sa pozdĺž naklonených magnetických silotrubíc do vyšších vrstiev slnečnej atmosféry. Predpoklad nárazovej vlny v tvare pílového zubu vysvetľuje parabolickú dráhu a lineárnu závislosť medzi počiatočnou rýchlosťou a zrýchlením. Peknou vlastnosťou tejto hypotézy je, že zjednocuje zdanlivo rôznorodé javy – oscilácie, magnetizmus a fibrily/spikuly.

Príspevok Oddelenia fyziky Slnka AsÚ SAV k výskumu jemnej štruktúry chromosféry a prechodovej vrstvy

Autor článku pracoval v rokoch 2005 – 7 v Astronomickom ústave Univerzity v Utrechte (AÚ UU) v tíme prof. Ruttena. Tento postdoktorandský pracovný pobyt bol zameraný na riešenie spoločného projektu Oddelenia fyziky Slnka AsÚ SAV a AÚ UU s názvom „Slnečné fibrily a spikuly vo veľkom rozlíšení“. Autor pri jeho realizácii analyzoval pozorovania chromosféry v H α čiare, získané pomocou Holandského otvoreného teleskopu (DOT) na La Palme (Kanárske ostrovy). Projekt bol zameraný na nasledujúce okruhy.

Kinematické vlastnosti dynamických fibríl

Dynamické fibrily (ďalej DF) pripomínajú relatívne tenké lúčovité výtrysky, prejavujúce sa výrazným predlžovaním a skracovaním, ktoré je merateľné už na časových škálach niekoľko sekúnd (obrázok 4). Autor článku vytvoril v jazyku IDL (Interactive Data Language) procedúru na meranie polohy, dĺžky a orientácie DF a použil ju pri analýze 10-minútovej sekvencie DOT H α snímok s časovým rozlíšením jedna snímka každých 12 sekúnd, získaných 24. apríla 2006. Analýza meraní ukázala, že:

- DF sa posúvajú priečne vzhľadom na ich pozdĺžnu os, čo je možné interpretovať ako

stáčanie sa fibríl z jednej krajnej polohy do druhej (obrázok 3);

- uhlová rýchlosť stáčania je rádovo 1 stupeň za minútu;
- kratšie DF sa stáčajú rýchlejšie ako dlhšie DF (obrázok 8).

Tieto zistenia sú nové. Hoci už skôr boli spektroskopicky zaznamenané priečne pohyby spikúl, dostupná literatúra neuvádzala správy opisujúce tento jav v prípade fibríl. V tejto fáze je možné iba špekulovať o jeho príčinách a následkoch. Stáčanie môže byť dôsledkom vírivých granulárnych pohybov v miestach ukotvenia magnetickej silotrubice hlbšie vo fotosfére. Vírivé pohyby sa môžu prenášať pozdĺž silotrubice do chromosféry a koróny, kde sú často pozorované na TRACE snímkach v EUV oblasti spektra ako stáčanie a prepletenie koronálnych slučiek. Iné vysvetlenia navrhol už skôr spomenutí dr. B. De Pontieu a prof. R. J. Rutten. Podľa nich môže ísť o rýchly mód magnetohydrodynamických vln, šíriacich sa kolmo k siločiarom, alebo excitačnú vlnu šíriacu sa okolo po povrchu expandujúcej silotrubice.

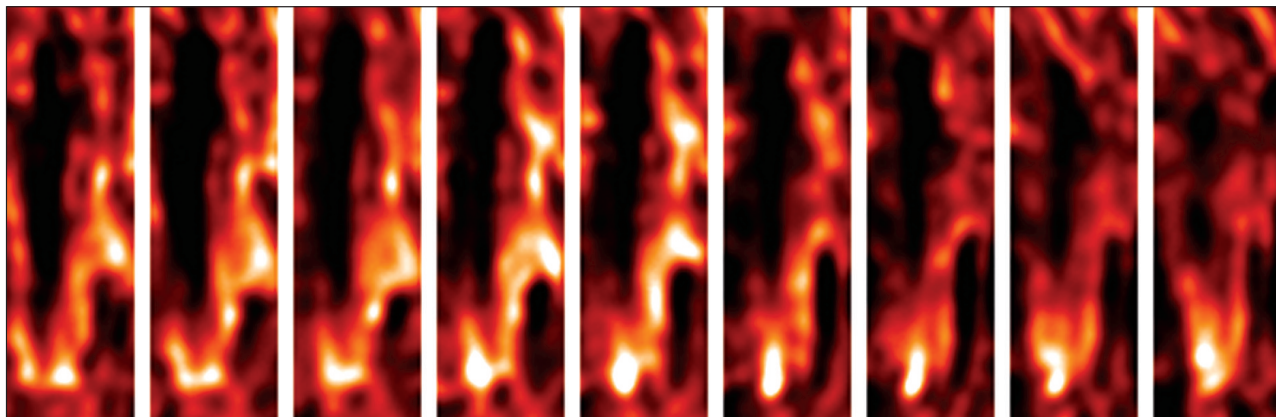
Analýza DOT H α snímok ďalej potvrdila, že:

- trajektórie vrcholov DF je možné aproximovať neúplnými parabolami so subbalistickými zrýchleniami (t. j. menšími ako gravitačné zrýchlenie Slnka) a nadvukovými počiatočnými rýchlosťami (obrázok 5);
- DF s väčšou počiatočnou rýchlosťou majú väčšie zrýchlenie (alebo prekonávajú väčšie spomalenie);
- medzi počiatočnými rýchlosťami a zrýchleniami existuje pravdepodobne lineárny vzťah (obrázok 8).

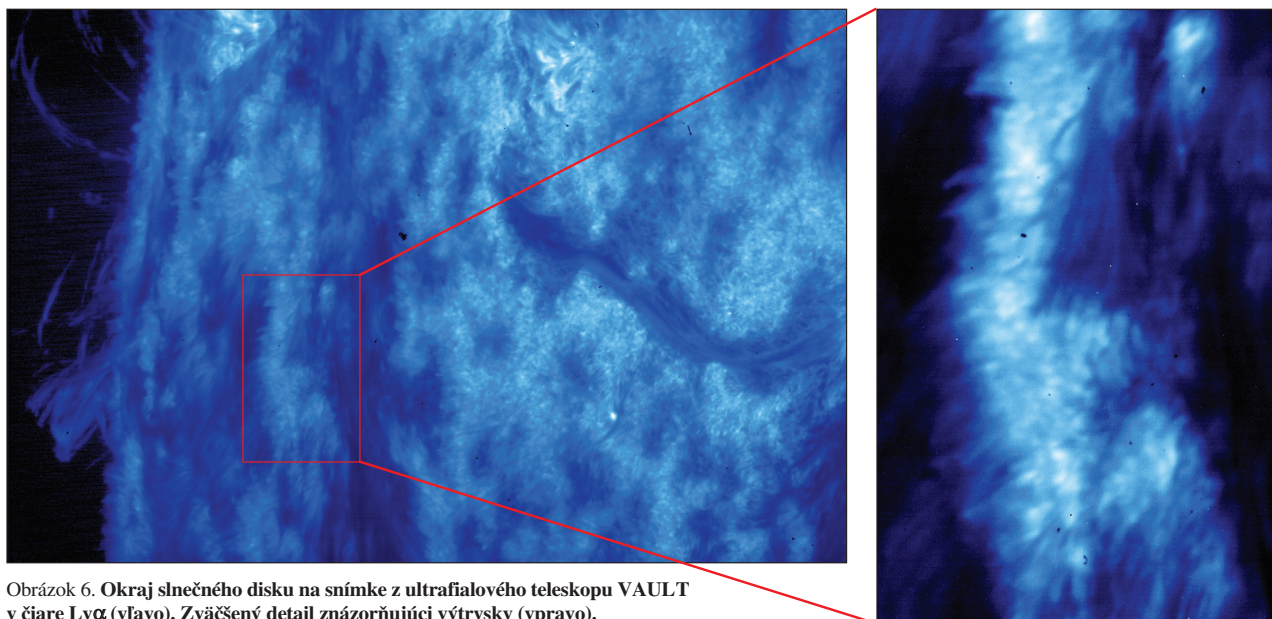
Tým bola potvrdená observačná časť prác týkajúcich sa šokovej hypotézy pôvodu fibríl/spikúl, ktoré nedávno publikovali De Pontieu a Hansteen.

Vzťah jemných štruktúr chromosféry a prechodovej vrstvy

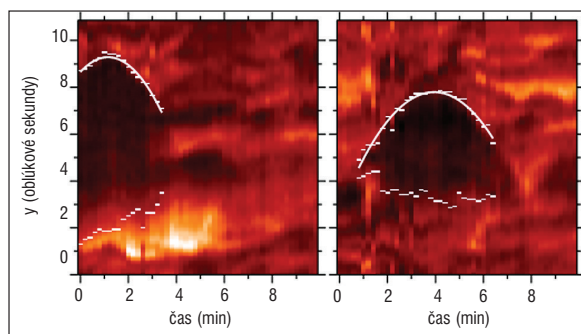
Pozorovania prechodovej vrstvy (PV) na okraji Slnka, uskutočnené v prvej polovici 70-tych rokov minulého storočia z orbitálnej stanice Skylab, naznačovali prítomnosť výtryskov, pripomínajúcich spikuly. Ich odhadovaná dĺžka 15 000 km sa dosť podobala na dĺžku spikúl. Neskôr Withbroe a Rutten uvažovali o tom, že výtrysky



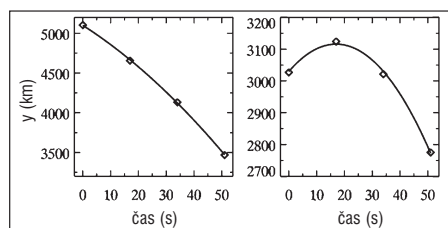
Obrázok 4. Predlžovanie a skracovanie dvoch dynamických fibríl, vyvíjajúcich sa takmer paralelne. Medzi obrázkami je časový interval 24 sekúnd. Holandský otvorený teleskop DOT. H α čiara.



Obrázok 6. Okraj slnečného disku na snímke z ultrafialového teleskopu VAULT v čiare Ly α (vľavo). Zväčšený detail znázorňujúci výtrysky (vpravo).



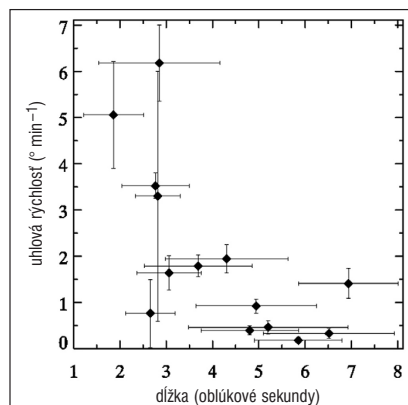
Obrázok 5. Vývoj dĺžky (na osi y) dvoch H α dynamických fibríl v čase. Obrázky vznikli zoradením stĺpcov pixelov vyčítaných pozdĺž fibríl. Biele pixely označujú začiatok a vrchol fibríl. Parabola preložená vrcholom fibríl zodpovedá kvadratickej funkcii, z ktorej boli určené počiatočné rýchlosti a zrýchlenia.



Obrázok 7. Vývoj dĺžky (na osi y) dvoch Ly α fibríl v čase. Štvorce zodpovedajú meraným dĺžkam a plná čiara zodpovedá parabolickému fitu, z ktorej boli určené maximálne rýchlosti a zrýchlenia.

v PV sú horúce obaly relatívne chladných chromosférických fibríl. Na overenie tejto hypotézy bolo potrebné získať série snímok PV s veľkým uhlovým a časovým rozlíšením. Také nedokázali poskytnúť ani kozmické observatória SoHO ani TRACE. Doteraz najlepšie rozlíšenie v EUV oblasti spektra dosiahol VAULT, čo je skratka pre Very high Angular resolution Ultraviolet Telescope (Ultrafialový teleskop s veľmi veľkým uhlovým rozlíšením) nesený sondážnou raketou. Takéto rakety sa používali v meteorológii a vo výskume vysokých vrstiev zemskej atmosféry. Po štarte vynesú svoj náklad do výšok medzi 50 a 160 km, kde už prakticky nie je nijaká atmosféra. Tam spustia svoj vedecký program. Aparatúra sa niekoľko minút po jeho skončení vracia na padáku späť na zem. Sondážna raketa a jej náklad tak predstavuje veľmi lacnú a viacsobne použiteľnú alternatívu k drahým kozmickým observatóriám. Počas svojho druhého letu, uskutočneného 14. júna 2002, získal VAULT celkovo 21 snímok PV v spektrálnej čiare neutrálneho vodíka Ly α s časovým rozlíšením 17 sekúnd. Štyri snímky zachytávali oblasť blízko slnečného okraja, s množstvom výtryskov jasne kopírujúcich hranice supergranúl (obrázok 6). Autor článku našiel 50 výtryskov, ktoré počas 1 minúty, pokrytej štyrmi snímkami okraja Slnka, vykazovali nápadné zmeny dĺžok. Analýzou meraní dospel k nasledujúcim záverom:

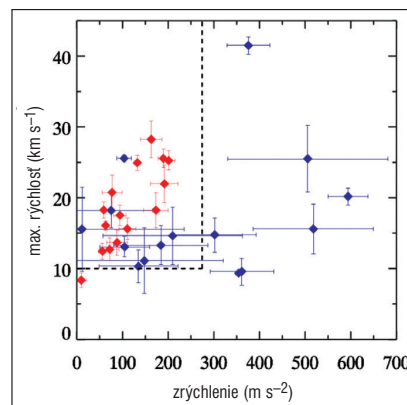
- výtrysky majú väčšinou nadzvukové počiatočné rýchlosti (obrázok 8);
- skúmaná vzorka výtryskov sa skladá zo subbalistickej a superbalistickej zložky (t. j. so zrýchlením menším a väčším ako gravitačné zrýchlenie Slnka);
- podobnosť kinematických vlastností naznačuje, že subbalistické výtrysky môžu byť horúcimi obalmi chladnejších chromosférických fibríl (obrázok 8).



Tieto nové zistenia naznačujú, po prvý raz v histórii na súvis medzi jemnými štruktúrami chromosféry a prechodovej vrstvy. Súčasne slnečná fyzika si však vyžaduje podporu takýchto tvrdení numerickými magnetohydrodynamickými simuláciami.

Webstránky

VAULT: <http://www.solar.nrl.navy.mil/rockets/vault/>



Obrázok 8. Uhlová rýchlosť zmien orientácie H α fibríl vo vzťahu k ich priemernej dĺžke vyjadrenej v oblúkových sekundách, pričom 1 oblúková sekunda = 725 km (vľavo). Maximálna rýchlosť dynamických fibríl vo vzťahu k ich zrýchleniu (vpravo). Červené štvorce zodpovedajú dynamickým H α fibrílám a modré štvorce Ly α výtryskom. Zvislé a vodorovné úsečky sú chybové intervaly. Pre-rušované čiary zodpovedajú typickej rýchlosti zvuku v chromosfére 10 km/s a gravitačnému zrýchleniu na Slnku 274 m/s².

- trajektórie opísané vrcholmi niektorých výtryskov je možné aproximovať neúplnými parabolami (obrázok 7);