

# Hmotnosť pokojných protuberancií určená z multispektrálnych pozorovaní

*P. Schwartz, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, [pschwartz.ta3.sk](mailto:pschwartz.ta3.sk),*

*Astronomický ústav AVČR, Ondřejov, ČR*

*P. Kotrč, Astronomický ústav AVČR, Ondřejov, ČR*

*F. Fárnik, Astronomický ústav AVČR, Ondřejov, ČR,*

*Yu. A. Kupryakov, Sternberg Astronomical Institute, Russia,*

*Astronomický ústav AVČR, Ondřejov, ČR*

*E. E. DeLuca, CfA, Cambridge, MA, USA*

## Abstrakt

**Celková hmotnosť piatich pokojných protuberancií bola určená z ich multispektrálnych pozorovaní v H $\alpha$ , CaII H spektrogrammi HSFA2 a MFS Ondřejovského observatória, v EUV spektrálnych čiarach HeI 304 Å, Fe XII 193 Å, Fe XIV 211 Å, FeXVI 335 Å prístrojom AIA na družici SDO a v mäkkej röntgenovskej oblasti pomocou teleskopu XRT na družici Hinode. Hmotnosti analyzovaných protuberancií sú v rozmedzí  $6.2 \times 10^{10}$  až  $1.9 \times 10^{12}$  kg, čo je v súlade s hodnotami uvádzanými inými autormi.**

## 1. ÚVOD

Možnosť pozorovať Slnko prístrojmi umiestnenými na družiciach rozšírili v posledných troch desaťročiach spektrálny rozsah, v ktorom môžu byť protuberancie a filameny a ich kavity resp. kanály skúmané, o blízku a ďalekú ultra-fialovú a röntgenovú oblasť. Ich štúdium môže byť založené na diagnostike ich plazmy simulovaním pozorovaných profilov spektrálnych čiar pomocou sofistikovaných non-LTE modelov, ako je to napr. v práci Gunára a kol. (2010) a prácach tam citovaných, kde boli porovnávané syntetické profily Lymanových čiar vodíka z pozorovaniami protuberancie, plazma filamentov bola diagnostikovaná pomocou non-LTE modelovania profilov Lymanových čiar vodíka a čiary H $\alpha$  napr. v prácach Fontenla a Rovira (1985), Schwartz a kol. (2006, 2012), a mnohých ďalších. Inou možnosťou sú spektroskopické analýzy založené na rôznych prejavoch protuberancií a filamentov a ich kavit, či EUV kanálov v rôznych spektrálnych oboroch, napr. spektroskopická metóda na

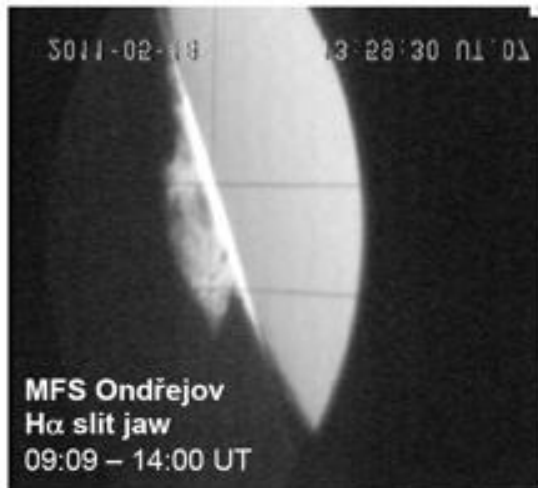
určovanie 3D štruktúry EUV kanálov filamentov vyvinutá Heinzelmom a kol. (2003) alebo metóda na určovanie optickej hrúbky a následne stĺpcovej hmoty vodíkovej a héliovej plazmy protuberancií publikovaná Heinzelmom a kol. (2008).

V tejto práci určujeme hmotnosť niekoľkých pokojných protuberancií pozorovaných počas pozorovacej kampane prebiehajúcej od začiatku apríla do konca júla v roku 2011 na niekoľkých družicových

a pozemných prístrojoch v ďalekej UV a röntgenovej oblasti spektra a v spektrálnych čiarach H $\alpha$  a CaII H. Hmotnosti boli určené pomocou vylepšenej verzie spektroskopickéj metódy Heinzela a kol. (2008). Článok je organizovaný nasledovne: v nasledujúcej kapitole popisujeme multi-spektrálne pozorovania protuberancií, v tretej stručne vysvetľujeme metódu, v štvrtej prezentujeme výsledky, a v kapitole 5 diskutujeme dosiahnuté výsledky a ich presnosť.

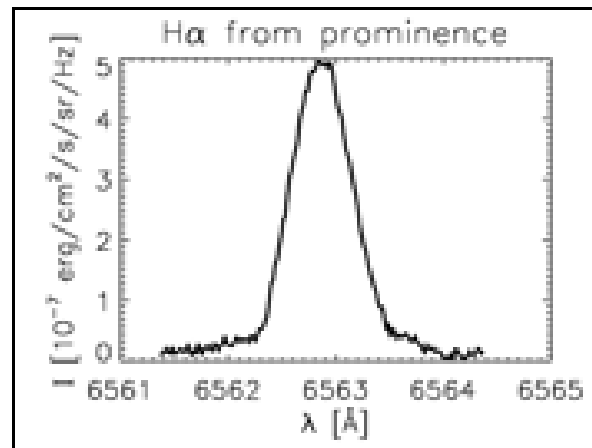
## 2. POZOROVANIA

Protuberancie boli pozorované v čiare H $\alpha$  dvoma Ondřejovskými mnohokamerovými spektrogrammi: MFS (Multi-camera Flare Spectrograph) a HSFA2 (Horizontal-Sonnen-Forschung-Anlage 2). Príklad H $\alpha$  slit-jaw pozorovania s vyznačením pozície štrbiny veľkej a jasnej protuberancie na juhovýchodnom limbe z 18. mája sú na Obr. č. 1. Na Obr. č. 2 je príklad Ha profilu z protuberancie z pozície štrbiny tak ako je to ukázané na Obr. č. 1. Bolo vykonaných vždy niekoľko H $\alpha$  pozorovaní z rozličnými pozíciami štrbiny pretínajúcimi protuberanciu v iných miestach, tak aby bola zmapovaná celá protuberancia. Protuberancie pozorované Ondřejovskými spektrogrammi boli identifikované v celodiskových EUV pozorovaniach prístroja AIA (Atmospheric Imaging Assembly) na družici SDO (Solar Dynamics Observatory) a röntgenovskej oblasti spektra teleskopom XRT (X-Ray Telescope) na družici Hinode. Tieto pozorovania boli použité na určenie optickej hrúbky protuberancie



Obr. č. 1 . Jeden z H $\alpha$  slit-jaw obrázkov pozorovania protuberancie 18. mája 2011 spektrografom MFS. Vertikálna čierna čiara pretínajúca protuberanciu označuje pozíciu štrbiny spektrografu počas konkrétneho pozorovania ukázaného na tomto obrázku.

plazmy v rezonančných kontinuách vodíka a hélia (metóda bude popísaná v nasledujúcej kapitole). Príklad EUV a röntgenovského pozorovania protuberancie z 18. Mája je na Obr. č. 3. Podľa obrázku pozorovania protuberancie v AIA kanáli HeII 304 Å sa vytvorí hranica jej oblasti. Pozorovania v EUV kanáloch Fe XII 193 Å, Fe XIV 211 Å, FeXVI 335 Å a v mäkkej röntgenovskej oblasti slúžia na určenie optickej hrúbky plazmy protuberancie v rezonančných kontinuách vodíka a hélia. V kanáli 304 Å pozorujeme protuberancie v emisii, ktorá vzniká rozptylom chromosférickej emisie na plazme protuberancie. V koronálnom EUV žiarení s vlnovou dĺžkou pod 912 Å (hrana Lymanovho kontinua vodíka), plazma protuberancie absorbuje emisiu koróny zpoza protuberancie v rezonančných kontinuách vodíka, popřípade neutrálneho a ionizovaného hélia. Okrem toho protuberancia zaberá určitý objem v koróne, z ktorého nie je emitované horúce koronálne EUV žiarenie. Toto tiež vedie k zníženiu EUV intenzity koronálnych čiar oproti pokojnej koróne v okolí protuberancie. Tento jav sa nazýva blokovanie koronálnej emisivity chladnou plazmou protuberancie. Pri prejave protuberancie ako tmavého útvaru v EUV koronálnych čiar, ako je to ukázané na Obr. č. 3, sa uplatňujú oba mechanizmy – absorpcia a blokovanie koronálnej emisie – súčasne. V riedkej kavite, kde sú teploty a hustoty asi o rád až dva nižšie, než v okolitej koróne, dochádza tiež k čiastočnému blokovaniu koronálnej emisie, čo sa prejavuje poklesom intenzity EUV koronálnych čiar, ale miernejším než v prípade protuberancie. Kavita je vyznačená na Obr. č. 3 v panely pozorovanie v AIA 193 Å kanáli. V röntgenovskej oblasti spektra nedochádza



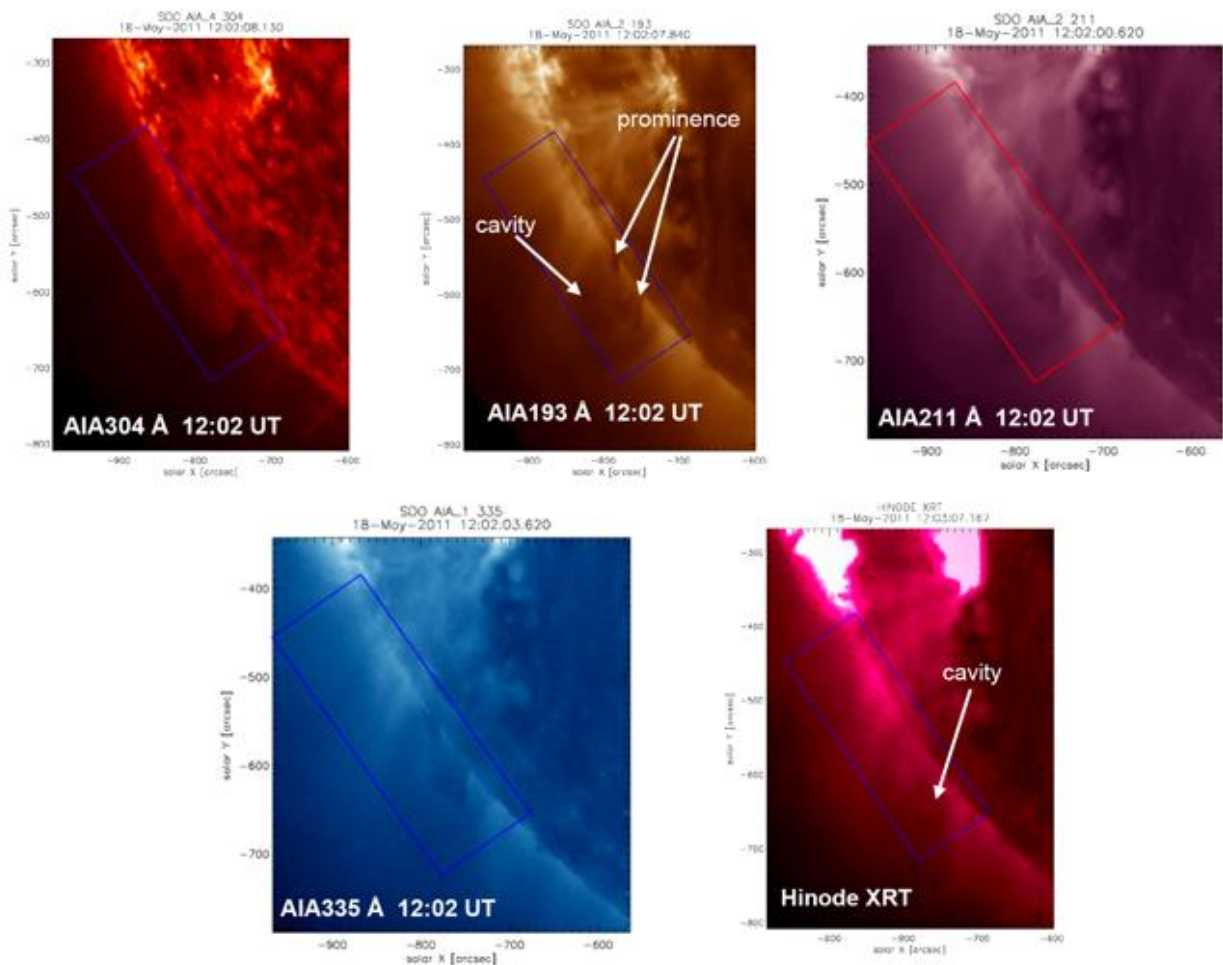
Obr. č. 2. Príklad zkalibrovaného H $\alpha$  profilu protuberancie z pozície štrbiny ako je ukázané na Obr. č. 1.

k absorpcii plazmou protuberancie, z čoho vyplýva, že za pokles intenzity tu môže len blokovanie koronálnej emisie protuberanciou a jej kavitou. Preto v pozorovaniach XRT nie je možné odlišiť protuberanciu od kavity, ako je to ukázané v pravom dolnom panely Obr. č. 3.

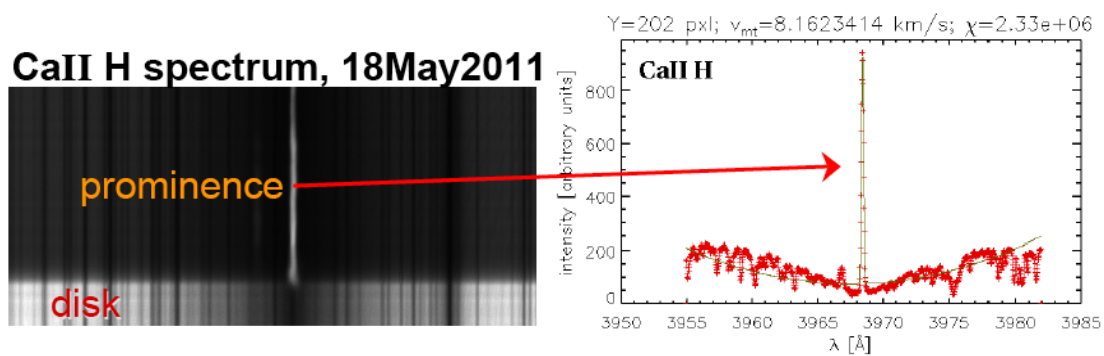
Protuberancie boli pozorované aj v spektrálnej čiare CaII H. Príklad spektra tejto čiary a vybraného profilu z protuberancie pozorovanej 18. mája 2011 je ukázaný na Obr. č 4.

### 3. METÓDA

Metóda určovania celkovej hmotnosti pokojnej protuberancie je založená na dvoch predpokladoch: Protuberancie pozorujeme v koronálnych EUV čiarach s vlnovou dĺžkou pod 912 Å ako tmavé útvary vďaka dvom mechanizmom, ktoré prispievajú súčasne k zníženiu intenzít týchto spektrálnych čiar — absorpcii v rezonančných kontinuách vodíka a neutrálneho a raz ionizovaného hélia a mechanizmu tzv. blokovaniu koronálnej emisie v objeme vyplneného chladnou plazmou protuberancie. Naproti tomu, v röntgenovom žiarení je za prejav protuberancie ako tmavý útvar zodpovedné len blokovanie koronálnej emisie, pretože v röntgenové žiarenie nie je pohlcované plazmou protuberancie Anzer a kol. (2007). Druhý predpoklad je, že v riedkej a relatívne teplej (oproti protuberancii) kavite obklopujúcej protuberanciu nedochádza k absorpcii, prejavuje sa teda len blokovanie koronálnej emisie aj v EUV koronálnych čiarach ako aj v röntgenovom žiarení. Keď teda urobíme tangenciálny rez protuberanciou, priebeh intenzít EUV koronálnych čiar a röntgenového žiarenia formujúcich sa pri rovnakej



Obr. č. 3. Pozorovania protuberancie z 18. mája 2011 v štyroch EUV kanáloch vykonané prístrojom AIA a v mäkkej röntgénovskej oblasti družicovým ďalekohľadom XRT. Viac informácií o obrázku sa nachádza v texte.



Obr. č. 4. Spektrum spektrálnej čiary CaII H na ľavom paneli a vybraný profil CaII H z protuberancie pozorovanej 18. mája 2011 na pravom paneli.

teplote okolo milión Kelvinov v kavite a okolitej koróne je až na multiplikatívnu konštantu rovnaký — ,pozri Obr. č. 5, kde sú zobrazené priebehy pozdĺž tangenciálneho rezu protuberanciou intenzity EUV dát prístroja SDO/AIA v kanáli 193 Å a röntgénového teleskopu XRT. Tento multiplikatívny faktor je možné zistiť metódou najmenších štvorcov. Po prenasobení

röntgénových dát z XRT týmto multiplikatívnym faktorom je nižšia intenzita EUV žiarenia než röntgénových dát spôsobená absorpciou, ako je to ukázané na Obr. č. 6. Keď pomer medzi intenzitou EUV žiarenia na vlnovej dĺžke  $\lambda$  a intenzitou röntgénového žiarenia prenasobenou multiplikatívnym faktorom označíme ako  $r'_\lambda$ , môžeme optickú hrúbku

plazmy  $\tau_\lambda$  na tejto vlnovej dĺžke vypočítať pomocou nasledujúcej formuly

$$\tau_\lambda = -\ln \left( 1 + \frac{r'_\lambda - 1}{\alpha} \right), \quad (1)$$

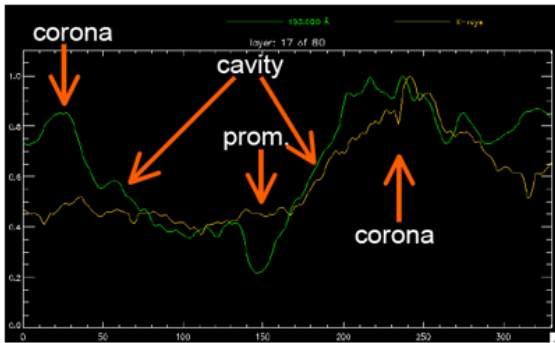
kde  $\alpha$  je faktor nesymetrického rozdelenia koronálnej emisivity na zornom lúči pred a za protuberanciou. Teda intenzita  $I_f$  žiarenia z pred protuberancie, intenzita  $I_b$  žiarenia z poza pruberancie má nasledovný vzťah k  $\alpha$ :

$$I_b = \alpha I \quad I_f = (1 - \alpha) I, \quad (2)$$

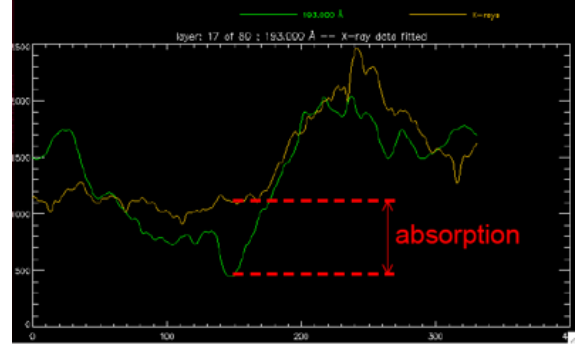
kde  $I$  je celková intenzita z celého zorného lúča bez absorpcie plazmou protuberancie. Keď urobíme tangenciálne rezy cez celú protuberanciu v EUV dátach na vlnovej dĺžke  $\lambda$ , pričom oblasť protuberancie je určená podľa jej pozorovania v AIA kanále 304 Å, môžeme vytvoriť mapu optickej hrúbky  $\tau_\lambda$ . Potom zo známej optickej hrúbky určenej pomocou vzťahu (1) a z teoretického vzťahu pre výpočet celkovej optickej hrúbky rezonančných kontínui vodíka a hélia, je možné vypočítať stĺpcovú hustotu vodíka  $N(H)$  (Anzer a Heinzel, 2005):

$$\tau_\lambda = N(H) \left\{ (1 - i) \sigma_H(\lambda) + r_{He} [(1 - j_1 - j_2) \sigma_{HeI}(\lambda) + j_1 \sigma_{HeII}(\lambda)] \right\}, \quad (3)$$

kde  $i, j_1, j_2$  sú stupne ionizácie vodíka a neutrálneho a raz jonizovaného hélia, a  $\sigma_H, \sigma_{HeI}$  a  $\sigma_{HeII}$  účinné prierezy ich fotoionizácie a  $r_{He}$  slnečná abundancia hélia voči vodíku — 0,1. Faktor  $\alpha$  nesymetrického rozdelenia koronálnej emisivity, potrebný pre výpočet



Obr. č. 5. Priebec intenzít EUV žiarenia AIA kanálu 193 Å (zelená krivka) a röntgénového žiarenia (žltá krivka) pozdĺž tangenciálneho rezu protuberanciou. Intenzity röntgénového žiarenia boli pre násobené konštantou tak, aby ich bolo možné zobrazit' spolu s EUV dátami v jednom grafe.



Obr. č. 6. Priebec pozdĺž rezu protuberanciou EUV žiarenia AIA kanálu 193 Å a röntgénového žiarenia nafiťovaného na priebec EUV intenzity v kavite a okolitej koróne. Potom za intenzitu EUV žiarenia nižšiu než intenzita röntgénového žiarenia v protuberancii je zodpovedná len absorpcia.

optickej hrúbky — vzťah (1), sme určovali porovnávaním pomeru optickej hrúbok na rôznych vlnových dĺžkach určených z pozorovania (vzťah (1)) pre rozličné hodnoty  $\alpha$  s pomerom vypočítaným použitím vzťahu (3). Pri správnej hodnote  $\alpha$  bola najlepšia zhoda medzi pozorovaným a teoretickým pomerom. Používali sme pomery určené z pozorovaní v AIA kanáloch 193 Å a 211 Å.

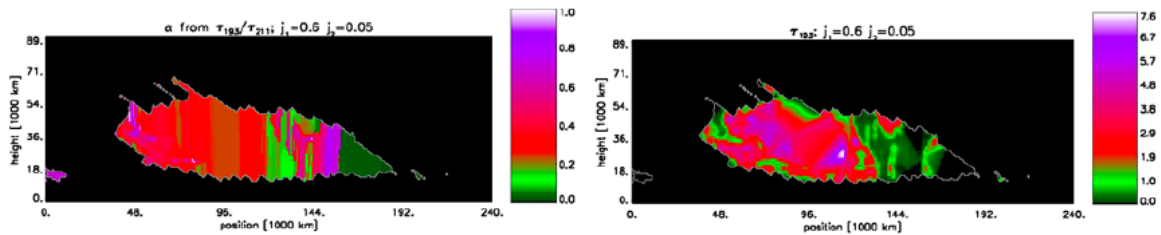
Stĺpcovú hmotu vodíkovo-héliovej plazmy protuberancie vypočítame zo známej stĺpcovej hustoty vodíka (vzťah (3)) použitím nasledovnej formuly:

$$m = N(H) (m_H + r_{He} m_{He}), \quad (4)$$

kde  $m_H$  a  $m_{He}$  sú hmotnosti vodíkového a héliového atómu. Nakoniec celkovú hmotnosť protuberancie  $M$  vypočítame integrovaním stĺpcovej hmoty cez celú plochu protuberancie PA určenú z pozorovaní AIA v kanáli 304 Å:

$$M = \int_{PA} m dS. \quad (5)$$

Vo vzťahu (3) vystupujú okrem účinných prierezov fotoionizácie, ktoré je možné nájsť v literatúre, stupne ionizácie vodíka a hélia. Stupeň ionizácie vodíka určíme nasledovne: Pomocou empirickej závislosti publikovanej Heinzelom a kol. (1994) určíme z mapy integrálnych intenzít čiary  $H\alpha$  v protuberancii mapu optickej hrúbok v centre  $H\alpha$ . Potom na základe non-LTE výpočtov Anzera a Heinzela (2005) určíme pri známej teplote stupeň ionizácie vodíka. Teplotu plazmy vo vnútri protuberancie je možné určiť fitovaním profilov  $H\alpha$  jednoduchým tzv. cloud modelom založeným na jednodimenzionálnej geometrii, rovnakej zdrojovej funkcii pozdĺž celého zorného lúča a kompletnej frekvenčnej redistribúci. Model s týmito zjednodušeniami je pre  $H\alpha$  postačujúci. Dopplerovská šírka spektrálnej čiary  $H\alpha$



Obr. č. 7. Mapa  $\alpha$  faktoru nesymetricity koronálnej emisivity na ľavom a mapa optickej hrúbky  $\tau_{193}$  na pravom paneli pre protuberanciu z 18. mája 2011.

dátum protuberancia	avg $i$	$j_1$	$j_2$	avg $T$ [K]	$M$ [kg]	rel. chyba. $M$ [%]	avg $\alpha$ z $\tau_{193}/\tau_{211}$	rel. chyba $\alpha$ [%]
19. apríla 2011	0,7	0,4	0	8000	$6,2 \times 10^{10}$	-71 — +60	0,17	-77 — +211
5. mája 2011 A	0,92	0,5	0,3	9900	$1,2 \times 10^{12}$	-25 — +48	0,17	-25 — +196
5. mája 2011 B	0,95	0,55	0,25	12000	$6,4 \times 10^{11}$	-4 — +5	0,45	-8 — +53
8. mája 2011	0,85	0,2	0,05	11200	$8,2 \times 10^{11}$	-60 — +31	0,32	-42 — +8
18. mája 2011	0,87	0,6	0	10000	$1,9 \times 10^{12}$	-8 — +9	0,28	-23 — +3

Tabuľka č. 1. Výsledky spektroskopickkej analýzy multi-spektrálnych pozorovaní piatich pokojných protuberancií získaných počas pozorovacej kampane. V prvom stĺpci je dátum pozorovania a poradové písmeno pozorovanej protuberancie (pokiaľ bolo pozorovaných v daný deň viacej protuberancií), v ďalších troch stĺpcoch sú stredné hodnoty stupňov ionizácie vodíka a neutrálneho a raz ionizovaného hélia, v piatom priemerná hodnota teploty, v šiestom celková hmotnosť protuberancie, v siedmom chyba jej určenia, v ôsmom priemerná hodnota  $\alpha$  faktora nesymetricity koronálnej emisie a v poslednom relatívna chyba priemerného  $\alpha$  faktora.

v protuberancii závisí najmä od teploty, ale aj vplyv mikroturbulencie nemusí byť zanedbateľný. Rýchlosť mikroturbulencie sme určovali fitovaním profilov čiary CaII H, ktorej Dopplerovská šírka závisí hlavne na rýchlosti mikroturbulencie. Stredné hodnoty z celej protuberancie stupňov ionizácie neutrálneho a raz ionizovaného hélia  $j_1$  a  $j_2$  sme určili porovnaním hmotností určených z pozorovaní AIA v kanáli 193 Å a 335 Å pre rôzne kombinácie  $j_1$  a  $j_2$ . Pri najmenšom rozdieli medzi hmotnosťami určenými z pozorovaní v týchto dvoch kanáloch sa jedná o správne stredné hodnoty  $j_1$  a  $j_2$ . Využívame tu hlavne fakt, že faktor  $\alpha$  hmotnosť určené z pozorovaní v kanáli 335 Å je citlivejšia na stupne ionizácie hélia než hodnoty určené z pozorovaní v kanáli 193 Å, lebo pomer  $\tau_{335}/\tau_{211}$  je oveľa citlivejší na stupne ionizácie hélia než  $\tau_{193}/\tau_{211}$ , kvôli tomu, že na vlnovej dĺžke 335 Å dochádza (okrem absorpcie v rezonančnom kontinuu vodíka) len k absorpcii neutrálnym héliom (posledný člen zo vzťahu (3) odpadá) na rozdiel od vlnových dĺžok 193 Å a 211 Å, kde je prítomná aj absorpcia raz ionizovaným héliom.

#### 4. VÝSLEDKY

Príklad výsledných máp a faktoru nesymetricity koronálnej emisivity a optickej hrúbky  $\tau_{193}$  na vlnovej dĺžke 193 Å pre protuberanciu z 18. mája 2011 (jej

pozorovania ukázané na Obr. č. 3 ) je na Obr. č. 7. Hmotnosti a ostatné výsledky získane pre päť z protuberancií pozorovaných počas pozorovacej kampane prebiehajúcej v apríli až júni 2011 sú uvedené v Tabuľke č.1. Relatívne chyby hmotnosti a  $\alpha$  faktora sú maximálne možné chyby pri aplikovaní Poissonovského šumu na pozorované dáta. Pre všetkých päť skúmaných protuberancií sme určili rýchlosť mikroturbulencie rádovo  $10 \text{ km s}^{-1}$ .

#### 5. DISKUSIA A ZÁVER

Bola určená celková hmotnosť piatich pokojných protuberancií pozorovaných v EUV, röntgénovej oblasti spektra a v čiarach H $\alpha$  a CaII H v rámci pozorovacej kampane, ktorá prebiehala v apríli až júni 2011, družicovými a pozemskými prístrojmi. Hmotnosti určené pre tieto päť protuberancií sú medzi hodnotami  $6,2 \times 10^{10}$  a  $6,2 \times 10^{12}$  kg. Tieto hodnoty sú blízke hmotnostiam určeným Gilbert a kol. (2005) pre iné protuberancie inou metódou. Priemerné teploty vnútra protuberancie 8000 až 12000 K sú realistické. Aj stupne ionizácie neutrálneho a raz ionizovaného hélia nadobúdajú realistické hodnoty — v rámci intervalu hodnôt určených z NLTE modelovania UV čiar hélia Labrosseom a kol. (2004). Priemerné hodnoty 0,7 až 0,95 stupňa ionizácie vodíka sú príliš veľké pre protuberancie. Určenie tak veľkých stupňov ionizácie bolo spôsobené používaním príliš

dátum protuberancia	avg $\alpha$	$\alpha$	$\Delta M_{193}$	$M_{335} - M_{193}$
	z $\tau_{193}/\tau_{211}$	zmerané	pri požití zmeraného $\alpha$ [%]	[% hmotnosti $M_{193}$ ]
19. apríla 2011	0,17	0,32	-65	+2
5. mája 2011 A	0,17	0,33	-31	-5
5. mája 2011 B	0,45	0,47	-30	+4
8. mája 2011	0,32	0,35	+6	-61
18. mája 2011	0,28	0,32	-7	+55

**Tabuľka č. 2. Porovnanie hodnôt  $\alpha$  faktora nesymetricity koronálnej emisie určeného z pomeru  $\tau_{193}/\tau_{211}$  a hodnoty „zmeranej“ použitím intenzít v AIA kanáli 193 Å nameraných tesne nad limbom a na disku blízko okraja. V štvrtom stĺpci tabuľky sú uvedené relatívne zmeny hmotností určenej z pozorovaní v kanáli 193 Å pri použití „zmeranej“  $\alpha$  oproti hmotnosti určenej pri použití  $\alpha$  určeného z pomocou  $\tau_{193}/\tau_{211}$ . V poslednom stĺpci tabuľky sú uvedené rozdiely hmotností určených z AIA pozorovaní v kanáloch 193 Å a 335 Å.**

jednoduchých — izotermických a izobarických jednodimenzionálnych NLTE modelov. V budúcnosti bude potrebné používať výsledky sofistikovanejších modelov s 2D geometriou a rozdielnou teplotou vo vnútri protuberancie a v tzv. prechodovej oblasti medzi protuberanciou a korónou. Pre niektoré zo skúmaných protuberancií možné chyby určenia hmotnosti a  $\alpha$  faktoru prekračujú až 60%. Môže to byť spôsobené metódou určovania chýb, keď sa k celej matici pozorovaných dát pričíta alebo odčíta Poissonovský šum. V budúcnosti plánujeme určovať možné chyby pričítaním/odčítaním náhodnej chyby z intervalu plus-minus Poissonovský šum pre každý pixel pozorovaných dát individuálne. Potom pre dostatočný počet (povedzme 100) takýchto realizácií vynesieme určené hodnoty hmotnosti a  $\alpha$  do histogramov a týmito histogramami preložíme Gaussián. Chybu potom určíme ako  $1\sigma$  preloženého Gaussiánu. Takáto metóda bude fyzikálne koreknejšia. V každom prípade je potrebné overiť určené hodnoty  $\alpha$  faktora aj inou metódou: z intenzít  $I_{LMB}$  nameraných tesne nad limbom v kavite obklopujúcej protuberanciu a  $I_{DSK}$  nameraných tesne pri okraji disku je možné odhadnúť  $\alpha$  faktor použitím nasledovnej formuly:

$$\alpha = \frac{I_{LMB} - I_{DSK}}{I_{LMB}} . \quad (6)$$

Hodnoty  $\alpha$  vypočítané z intenzít  $I_{LMB}$  a  $I_{DSK}$ , budeme ich nazývať „zmerané“, a určené použitím pomeru  $\tau_{193}/\tau_{211}$  a rozdiely v hmotnostiach spôsobené použitím „zmeraných“  $\alpha$  namiesto určených s pomeru optických hrúbok, sú ukázané v Tabuľke č. 2. Môžeme vidieť, že apsoň pre štyri z piatich študovaných protuberancií sú rozdiely akceptovateľné, teda je možné veriť určeniu  $\alpha$  pomocou pomeru  $\tau_{193}/\tau_{211}$ .

V Tabuľke č. 2. sú uvedené aj rozdiely v hmotnostiach určených z pozorovaní v AIA kanáli 193 Å a 335 Å. Pre tie protuberancie, kde je tento rozdiel malý, môžeme dôverovať určeným hodnotám stupňov ionizácie  $j_1$  a  $j_2$ , a môžeme ich považovať za dobrú aproximáciu pre celú protuberanciu.

#### Pod'akovanie

Tento článok bol vytvorený realizáciou projektu ITMS číslo 26220120029, na základe podpory operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja. Práca vznikla aj s podporou projektu VEGA 2/0108/12 a projektu Grantovej Agentury České Republiky číslo P209/10/1706

#### LITERATÚRA

- Anzer, U., Heinzel, P.: 2005, The Astrophysical Journal, 622, 714  
 Fontenla, J.M., Rovira, M.: 1985, Solar Phys., 96, 53  
 Gilbert, H.R., Holtzer, T.E., MacQueen, R.M.: 2005, ApJ, 618, 524  
 Gunár, S., Schwartz, P., Schmieder, B., Heinzel, P.: 2010, Astronomy and Astrophysics, 514, id.A43  
 Heinzel, P., Anzer, U., Schmieder, B.: 2003, Solar Phys., 216, 159  
 Heinzel, P., Gouttebroze, P., Vial, 1994, A&A, 292, 656  
 Heinzel, P., Schmieder, B., Fárník, F., Schwartz, P. a kol.: 2008, The Astrophysical Journal, 686, 1383.  
 Labrosse, N., Gouttebroze, P.: 2004, ApJ, 617, 614  
 Schwartz, P., Heinzel, P., Schmieder, B., Anzer, U.: 2006, Astronomy and Astrophysics, 459, 651  
 Schwartz, P., Schmieder, B., Heinzel, P., Kotrč, P.: 2012, Solar Phys., v tlači