

Určovanie hmotnosti pokojných protuberancií

M. Bodnárová, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica, mbodnarova @astro.sk

P. Schwartz, Astronomický ústav SAV, Tatranská Lomnica

P. Heinzl, Astronomický ústav AV ČR, Ondřejov, Česká republika

Abstrakt:

Počas pozorovacej kampane Apríl - Jún 2011 boli získané multi-spektrálne pozorovania protuberancií v ultrafialovom žiarení (AIA na SDO), v röntgenovom žiarení (XRT na Hinode) a v spektrálnych čiarach H α a Ca II H (spektrografy na Astronomickom ústave v Ondřejove). Získané pozorovania sme použili na výpočet máp optickej hrúbky, na základe ktorých sme určili hmotnosti pozorovaných protuberancií. Použitá metóda spracovania pozorovaní je založená na poznatku, že pokles intenzity EUV koronálnych čiar s vlnovými dĺžkami kratšími ako 912 Å na mieste protuberancie je spôsobený dvoma procesmi - absorpciou v rezonančnom kontinuu vodíka a taktiež neutrálneho a jeden-krát ionizovaného hélia (foto-ionizácia) alebo deficitom vyžarovania koróny z objemu vyplneného materiálom protuberancie. Keďže oba mechanizmy prispievajú k poklesu intenzity simultánne, na ich rozlíšenie sú nevyhnutné pozorovania v röntgenovom žiarení. Použitá metóda taktiež berie do úvahy nerovnomerné vyžarovanie koróny pred a za protuberanciou. V súčasnosti postupne spracúvame pozorovania väčšieho množstva protuberancií s cieľom vytvorenia rozsiahlejšej štatistickej vzorky.

1. ÚVOD

Protuberancie sú objekty nachádzajúce sa v slnečnej koróne, ktoré sú tvorené materiálom 100-násobne chladnejším a hustejším ako je materiál koróny. Pozorovania naznačujú, že ich tvorí hustý a chladný chromosférický materiál ponorený do prostredia slnečnej koróny s teplotou okolo 1 milión Kelvínov (Parenti, 2014). V dôsledku nízkej teploty je plazma v jadre protuberancie čiastočne ionizovaná a v dôsledku vysokej hustoty opticky hrubá pre určité vlnové dĺžky (napr. väčšina rezonančných čiar vodíka a hélia).

Protuberancie sa nachádzajú na rôznych miestach nad slnečným "povrchom". Pokojné protuberancie môžu mať životnosť aj niekoľko týždňov, a keďže sú na týchto miestach ukotvené (magnetickým poľom) v dôsledku rotácie Slnka môžeme pozorovať ich postupný pohyb pred slnečným diskom z jedného okraja na druhý. Nad slnečným okrajom sú protuberancie v emisii (sú jasné), ale ak sa práve nachádzajú pred slnečným diskom pozorujeme ich v absorpcii (sú tmavé, lebo absorbujú žiarenie fotosféry pod nimi) a historicky ich potom nazývame filamentami.

Protuberancie sa vyznačujú rôznorodými tvarmi, dobami života, štruktúrou, zložitosťou okolitého magnetickeho poľa i polohou vzhľadom na slnečný disk. V dôsledku tejto rôznorodosti tvarov, jemnej štruktúry a maloškálovej dynamiky, ktoré sú na hranici rozlišovacej schopnosti pozorovacích prístrojov nie je jednoduché ich

modelovať. Hmotnosť je jednou z dôležitých informácií na vytvorenie spoľahlivého rovnovážneho modelu protuberancie. Vyvíjanie metód na nepriame určovanie hmotnosti protuberancií (na základe pozorovaní) môže prispieť k pochopeniu vzájomného vzťahu protuberancií a výronov koronálnej hmoty, a taktiež pomôcť presnejšie odhadnúť množstvo materiálu vyvrhnutého do vesmírneho priestoru.

2. METÓDA A VSTUPNÉ DÁTA

Ak chceme určiť hmotnosť protuberancie je potrebné najprv zistiť jej geometrickú hrúbku (a celkový objem) a taktiež ionizačný stupeň plazmy (najmä vodík a hélium), ktorá ju tvorí.

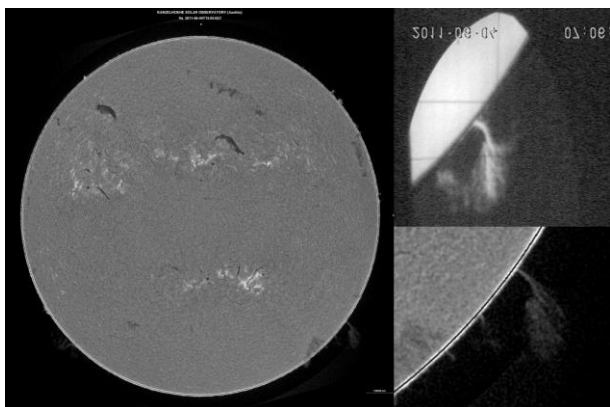
Na určenie hmotnosti viacerých protuberancií pozorovaných počas pozorovacej kampane Apríl - Jún 2011 sme použili metódu podrobne popísanú v práci Schwartz a kol. (2015). Táto metóda používa na určenie stĺpovej hustoty vodíka, a na následné určenie hmotnosti protuberancie, multi-spektrálne pozorovania (kombinácia XUV zobrazovania a optickej spektroskopie) získané simultánne prístrojmi na Zemi a vo vesmíre. Metóda sa zakladá na poznatku, že intenzita žiarenia slnečnej koróny v EUV oblasti na vlnových dĺžkach pod 912 Å je znížená v dôsledku absorpcie v rezonančných kontinuách vodíka a hélia (fotoionizácia) a súčasne aj deficitom vo vyžarovaní koróny v objeme,

ktorý zaplňa chladný material protuberancie. Hoci oba mechanizmy prispievajú k znižovaniu intenzity súčasne je možné ich vplyv od seba odlišiť za pomoci pozorovaní v röntgenovom žiarení a tak určiť pokles intenzity žiarenia spôsobený fotoionizáciou.

Pri práci sme použili slit-jaw obrázky a spektrá v $H\alpha$ a $Ca II H$ získané pozemskými spektrografmi (SLS a HSFA2) v Ondřejeve, röntgenové snímky vesmírneho ďalekohľadu HINODE (prístroj XRT) a EUV snímky z družice SDO (prístroj AIA).

3. URČOVANIE HMOTNOSTI PROTUBERANCIE

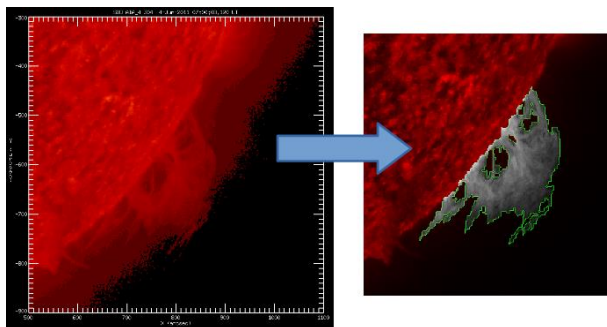
Počas pozorovacej kampane Apríl - Jún 2011 boli v Ondřejeve denne (v závislosti od pozorovacích podmienok) vykonávané pozorovania pokojných protuberancií s cieľom zhromaždiť dostatočne veľký štatistický súbor protuberancií na určenie ich hmotností. Jednou z pozorovaných protuberancií bola aj protuberancia pozorovaná 4. júna 2011, ktorá je znázornená na Obr. č.1.



Obr. č. 1.: Protuberancia pozorovaná 4. júna 2011 ($H\alpha$; vľavo - celodisková snímka z Kanzelhohe; vpravo hore - spektrograf SLS v Ondřejeve; vľavo dole - výsek z celodiskovej snímky z Kanzelhohe).

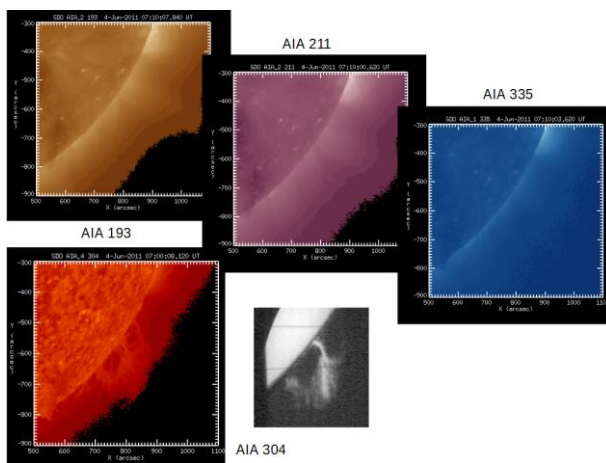
V prípade tejto protuberancie bolo v Ondřejeve medzi 05:47:56 UT - 11:54:22 UT napozorovaných (spektrografom SLS) 17 spektier v $H\alpha$, z ktorých sme použili na výpočet hmotnosti protuberancií 14. V Ondřejeve boli napozorované aj spektrá v $Ca II$ (spektrografom HSFA2), na základe ktorých sa určila rýchlosť mikro-turbulencie plazmy. Snímok z prístroja AIA na družici SDO získaný pri vlnovej dĺžke 304 Å (spektrálna čiara jeden-krát ionizovaného hélia) bol použitý na vymedzenie celkovej plochy protuberancie (Obr.č.2.), keďže protuberancie na tejto vlnovej dĺžke pozorované nad slnečným okrajom vo veľkej miere vyžarujú.

Pozorovanie v röntgenovej oblasti získané družicou XRT (s filtrom Al-Mesh, lebo detekuje plazmu s podobnými teplotami ako snímky na vlnových dĺžkach 193, 211 a 304 Å z prístroja AIA, sa ale vyznačuje kontamináciou ultrafialovým žiarením - bola odstránená použitím snímky 171 Å z prístroja AIA) bolo použité na odčítanie vplyvu koronálnej emisivity.



Obr. č. 2.: Celková plocha protuberancie vymedzená na základe snímky na vlnovej dĺžke 304 Å.

Pri určovaní hmotnosti protuberancie boli použité aj snímky na vlnových dĺžkach 193, 211 a 335 Å z prístroja AIA na družici SDO, kde je protuberancia pozorovaná ako tmavý objekt (Obr. č. 3.) v dôsledku absorpcie v rezonančných kontinuách vodíka a hélia (fotoionizácia).



Obr. č. 3.: Protuberancia pozorovaná 4. júna 2011 na vlnových dĺžkach 193, 211 a 335 Å z prístroja AIA na družici SDO v porovnaní so snímku v $H\alpha$ z Ondřejeva.

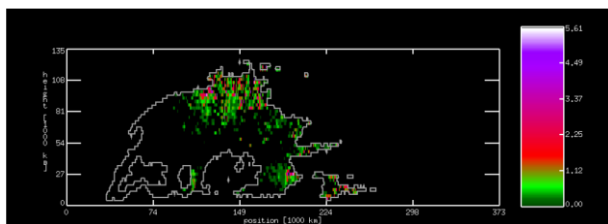
Výpočet optickej hrúbky bol uskutočnený naprieč tangenciálou k slnečnému okraju podľa metódy podrobne popísanej v práci Heinzel a kol. (2008). Použili sa pri ňom snímky na vlnových dĺžkach 193 (alebo 335), 211, 304 Å a snímku v röntgenovom žiarení. Na zistenie správnej hodnoty optickej hrúbky však bolo potrebné najprv určiť aj ionizačné stupne vodíka, a taktiež neutrálneho a jeden-krát ionizovaného hélia. Na určenie ionizačného stupňa neutrálneho vodíka sme spracovali $H\alpha$ spektrá zo spektrografu SLS v Ondřejeve. Výsledkom je mapa ionizačných stupňov vodíka pre celú plochu protuberancie s priemernou hodnotou 0,5177. Na určenie správnych hodnôt ionizačných stupňov neutrálneho a jeden-krát ionizovaného hélia sme najprv museli vypočítať hmotnosť protuberancie pre rôzne kombinácie hodnôt týchto dvoch ionizačných stupňov pri vstupných dátach zahrňujúcich snímky na vlnových dĺžkach 193 Å alebo 335 Å. Minimálny rozdiel v určených hmotnostiach pre snímky na vlnových dĺžkach 193 Å a 335 Å bol 2.514 % uočenej hmotnosti pre hodnotu ionizačného stupňa neutrálneho hélia 1,0 a hodnotu ionizačného stupňa jeden-krát ionizovaného hélia 0,0.

Nr.	Date	Area [km ²]	i	j ₁	j ₂	M ₁₉₃ [kg]	M _{error} [%]
1(s) Al-Mesh	3 June 2011	1.110x10 ¹⁰	0.58	0.5	0.5	1.327x10 ¹²	-21
1(s) Ti-Poly	3 June 2011	1.118x10 ¹⁰	0.59	0.8	0.2	1.195x10 ¹²	-37.32
2(s) Al-Mesh	4 June 2011	1.159x10 ¹⁰	0.53	0.0	1.0	5.233x10 ¹²	11.12
2(s) Ti-Poly	4 June 2011	1.159x10 ¹⁰	0.53	1.0	0.0	1.307x10 ¹²	11.72
3(s) Al-Mesh	5 June 2011	8.742x10 ⁹	0.54	1.0	0.0	1.198x10 ¹²	-4.32
3(s) Ti-Poly	5 June 2011	8.825x10 ⁹	0.58	0.9	0.0	1.163x10 ¹²	12.9
4 Al-Mesh	3 June 2011	4.849x10 ⁹	0.54	0.7	0.3	8.169x10 ¹¹	6.46
4 Ti-Poly	3 June 2011	4.910x10 ⁹	0.58	0.4	0.6	1.405x10 ¹²	-53.95
5 Al-Mesh	11 June 2011	2.286x10 ⁹	0.63	0.3	0.6	3.383x10 ¹¹	11.65
5 Ti-Poly	11 June 2011	2.326x10 ⁹	0.63	0.7	0.2	6.836x10 ¹¹	12.6

Obr. č. 4.: Tabuľka zahrňujúca výsledky určovania hmotnosti piatich protuberancií (prvé tri označené značkou (s) predstavujú tú istú protuberanciu pozorovanú počas troch dní za sebou). Vysvetlivky: "Nr" poradové číslo protuberancie a typ filtra röntgenového snímka; "Date" dátum pozorovania; "Area" plocha protuberancie odvodená zo snímky na vlnovej dĺžke 304 Å; "i" priemerný ionizačný stupeň vodíka; "j₁" ionizačný stupeň neutrálneho hélia; "j₂" ionizačný stupeň jeden-krát ionizovaného hélia; "M₁₉₃" hmotnosť protuberancie a "M_{error}" 1σ chyba učenej hmotnosti.

Na výpočet finálnej mapy optických hrúbok (na Obr. č. 4.) sa potom použila už hotová mapa ionizačných stupňov neutrálneho vodíka, exaktné hodnoty ionizačného stupňa neutrálneho a jeden-krát ionizovaného hélia, a taktiež snímky na vlnových dĺžkach 193 Å, 211 Å, 304 Å a snímka v röntgenovom žiarení (filter Al-Mesh alebo Ti-Poly).

Keďže iba 25.8% plochy protuberancie pokrývajú kladné (realistické) hodnoty optických hrúbok pre konečný výpočet hmotnosti protuberancie zo 4. júna 2011 sme použili len priemernú hodnotu otickej hrúbky namiesto individuálnych hodnôt z mapy optických hrúbok. Výsledná hmotnosť danej protuberancie (pre Al-Mesh filter) bola určená na 5,233×10¹² kg (1σ chyba = 11.1 %), pri celkovej ploche 1,159 × 10¹⁰ km².



Obr. č. 4.: Finálna mapa optických hrúbok pre výpočet hmotnosti protuberancie zo dňa 4. júna 2011.

Rovnakým spôsobom sme určili hmotnosti ďalších protuberancií z tejto pozorovacej kampane a tieto výsledky sú zhrnuté v tabuľke Tab. č. 1. Pre každú protuberanciu sú v Tab. č. 1. uvedené výsledky dvoch výpočtov hmotnosti - jeden využívajúci röntgenový snímok s filtrom Al-Mesh (kontaminácia ultrafialovým žiarením bola odstránená použitím snímky 171 Å z prístroja AIA) a druhý s filtrom Ti-Poly (pre porovnanie, snímok zobrazuje plazmu s odlišnými teplotami ako snímok s filtrom Al-Mesh).

Keďže pokojné protuberancie majú dlhú životnosť (dni, týždne aj mesiace), je možné niektoré z nich pozorovať viac dní. Protuberancia zo 4. júna 2011 je jednou z takýchto protuberancií a bola pozorovaná aj 3. a 5. júna 2011. Porovnanie toho ako vyzerala táto protuberancia v jednotlivé dni je znázornené na Obr. č. 5.



Obr. č. 5.: Porovnanie tvaru a plochy tej istej protuberancie z pozorovaní počas troch po sebe nasledujúcich dní.

4. ZÁVER

V práci sme ukázali priebeh určovania hmotnosti protuberancie (zo 4. júna 2011) metódou využívajúcou multi-spektrálne pozorovania z prístrojov na Zemi a vo vesmíre. Uviedli sme prehľad určených hmotností niekoľkých protuberancií. Zároveň sme uviedli výsledky určenia hmotnosti tej istej protuberancie z pozorovaní z troch po sebe nasledujúcich dní, ktoré dávajú rádovo porovnateľnú hodnotu hmotnosti hoci tvar aj plocha pokojnej protuberancie určená na základe snímok z družice SDO sa môže zo dňa na deň líšiť.

V budúcnosti chceme pokračovať v určovaní hmotností ďalších z napozorovaných protuberancií s cieľom nazhromaždiť čo najväčší štatistický súbor, ktorý chceme potom použiť na rozšírenie našich vedomostí o protuberanciách.

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.

Autori ďakujú za podporu projektu medzinárodnej mobility SAV-AV, ČR-18-03 Akadémie vied Českej republiky a Slovenskej akadémie vied.

Pod'akovanie patrí projektu Vega 2/0004/16.

LITERATÚRA

Heinzel, P., Schmeider, B., Farník, F., a kol., 2008, *Astrophysical Journal* 686, 1383.

Parenti, S., 2014, *Living Reviews in Solar Physics*, 11, 1, <http://www.livingreviews.org/lrsp-2014-1>

Schwartz, P., Heinzel, P., Kotrč, P., Farník, F., a kol., 2015, *Astronomy&Astrophysics* 574, A62.