

Príznaky horúcej plazmy v pokojnej protuberancii pozorovanej v čiare He I D3

J. Koza, J. Rybák, P. Gömöry, M. Kozák

Astronomický ústav, Slovenská akadémia vied, Tatranská Lomnica

Abstrakt

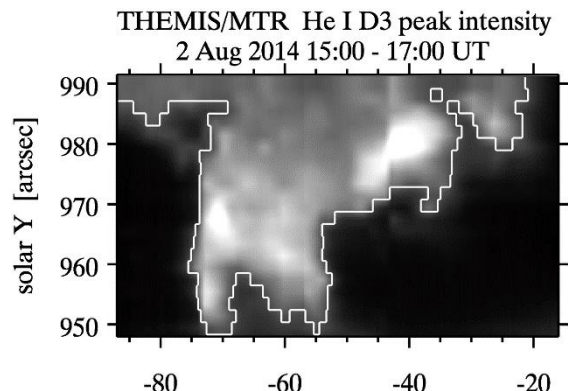
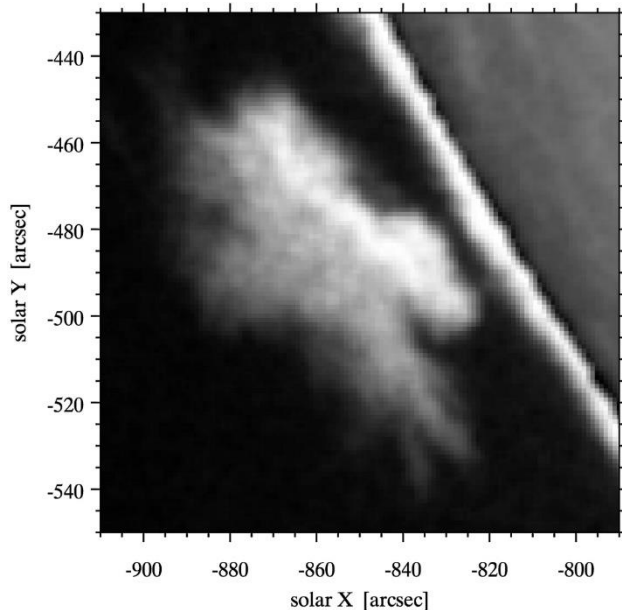
V práci sú prezentované výsledky analýzy profilov spektrálnej čiary He I 5876 Å (He I D3) v pokojnej protuberancii, ktorá bola pozorovaná ďalekohľadom THEMIS. Spektrálne charakteristiky dvoch komponent He I D3 Stokes I profilov sú merané fitovacím systémom, ktorý ich aproximuje dvojitým Gaussianom. Tento model vedie k pomeru centrálnych intenzít He I D3 komponent 5.5 ± 0.4, ktorý sa líši od hodnoty 8 očakávanej pre opticky tenkú plazmu. Ukazujeme, že dvojitý Gaussian systematicky podhodnocuje intenzitu modrého krídla čiary He I D3. Testovali sme tiež dvojitý Lorentzov a dvojitý Voigtov model He I D3, pričom prvý z uvedených dáva neuspokojivé fity a druhý je fyzikálne neprijateľný. Aby sme vyriešili tento problém, vytvorili sme dvojteplotný multigausssovský model zložený z dvoch dvojitých Gaussianov, ktorý je uspokojivou reprezentáciou čiary He I D3 bez spomenutého intenzitného deficitu v modrom krídle. Tento model naznačuje prítomnosť chladnej a aj horúcej plazmy v protuberancii s teplotami 11,5 kK a 91 kK. Je pozoruhodné, že obe tieto teploty dobre súhlasia s teplotami 10 kK a 100 kK v 2D modeloch jemnej štruktúry protuberancií, ktoré boli použité v modeloch prenosu žiarenia vo vodíkových čiarach Lymanovej série v prácach Gunár a kol. (2007) a Schwartz a kol. (2015). To môže byť dôkazom fyzikálnej adekvátnosti multigausssovského modelu a ďalší dôkaz prítomnosti horúcej plazmy v študovanej protuberancii. Studená a chladná komponenta typického He I D3 profilu majú pomer centrálnych intenzít 6,6 a 8, čo naznačuje hrúbku protuberancie 17 Mm a optickú hrúbku chladnej plazmy 0,3, zatiaľ čo optická hrúbka horúcej plazmy je zanedbateľná. Uvedené parametre protuberancie sa zdajú byť realistické a naznačujú fyzikálnu adekvátnosť multigausssovského modelu s významným dopadom pre interpretáciu He I D3 spektropolarimetrie pomocou súčasných inverzných kódov, ktoré stále aproximujú protuberanciu ako jednodimenzionálnu izotermálnu štruktúru. Preto pre pokročilú diagnostiku tejto spektrálnej čiary v protuberanciách by mal byť vzatý do úvahy jej multigausssovský model.

1. ÚVOD

Multiplet prechodov neutrálneho hélia He I s vlnovou dĺžkou 5876 Å, označovaný aj ako D₃ čiara (ďalej ako He I D₃) je jedným z hlavných diagnostických prostriedkov pri pozemských pozorovaniach protuberancií zameraných na štruktúru ich magnetického poľa (López Ariste 2015). Multiplet sa skladá zo šiestich prechodov. Súčasné spektropolarimetrické pozorovania rozlišujú spoločnú emisiu piatich prechodov ako výraznejšiu modrú komponentu He I D₃ a šiesty prechod tvorí slabšiu červenú komponentu. Spektrálny odstup modrej a červenej komponenty je 343,3 mÅ, čo dáva čiare jej charakteristický dvojitý profil. V prípade zanedbateľnej optickej hrúbky oboch komponent a prirodzenej excitácie termu 3³D, pomer centrálnych intenzít modrej a červenej komponenty je 8:1 (Landi Degl'Innocenti 1982). Cieľom tejto práce je vytvoriť štatistický súbor spektrálnych charakteristík modrej a červenej komponenty He I D₃ v tvare umožňujúcom porovnanie s budúcim numerickým modelovaním čiary He I D₃ a navrhnúť adekvátny fitovací model Stokes I profilov He I D₃, ktorý bude v súlade so súčasnými predstavami o termodynamicknej štruktúre protuberancií. Viac podrobností je možné nájsť v práci Koza a kol. (2017).

2. POZOROVANIE

Dňa 2. augusta 2014 bola cieľom pozorovania ďalekohľadu THEMIS (López Ariste, Rayrole, Semel, 2000) pokojná protuberancia na východnom okraji slnečného disku v pozičnom uhle 117° (Obr. 1). Šírka štrbiny spektrografu THEMIS zodpovedala jednej oblúkovej sekunde a štrbina bola orientovaná paralelne k slnečnému okraju (limbu). Pozorovanie prebiehalo v skenovacom režime a začalo blízko limbu o 14:59 UT a pokračovalo radiálne smerom ďalej od limbu až do 17:00 UT. Skenovanie prebiehalo v dvoch smeroch a pozostávalo z jedného kroku o veľkosti 15 oblúkových sekúnd paralelne s limbom, po ktorom nasledoval jeden krok v radiálnom smere, v ktorom bolo vykonaných celkovo 25 krokov s odstupom dve oblúkové sekundy. Skenovanie tak efektívne pokrylo plochu 88'' × 50''. Na pravom paneli Obr. 1 je výrez skenovanej plochy pokrývajúcej celú protuberanciu. Jednotlivé spektrá boli snímané expozičným časom 2 s. Zvolená modulačná schéma viedla k tomu, že všetky štyri Stokesove parametre boli v danej polohe štrbiny získané za 144 s a 2D skenovanie celej protuberancie trvalo dve hodiny (Koza a kol. 2017). Uhlový a spektrálny rozmer pixlov spektier je 0,227''/px a 11,6 mÅ/px.



Obrázok 1. Výrez z celodiskového $H\alpha$ filtergramu cieľovej protuberancie na východnom okraji slnečného disku v pozičnom uhle 117° získaný 2. augusta 2014 o 14:12:39 [vľavo] na Observatóriu Kanzelhöhe (Pötzi a kol., 2015). Pre oblasti nad limbom a na disku bolo použité rôzne intenzitné škálovanie. Zrekonštruovaná mapa centrálnej intenzity spektrálnej čiary He I D₃ cieľovej protuberancie pozorovanej d'alekohľadom THEMIS 2. augusta 2014 od 15:00 do 17:00 UT [vpravo]. Slnečný limb je mimo obrázku pod jeho spodným okrajom. Biela čiara ohraničuje oblasť, z ktorej boli získané výsledky na Obr. 2 a 3.

3. FITOVANIE DVOJITÝM GAUSSIÁNOM

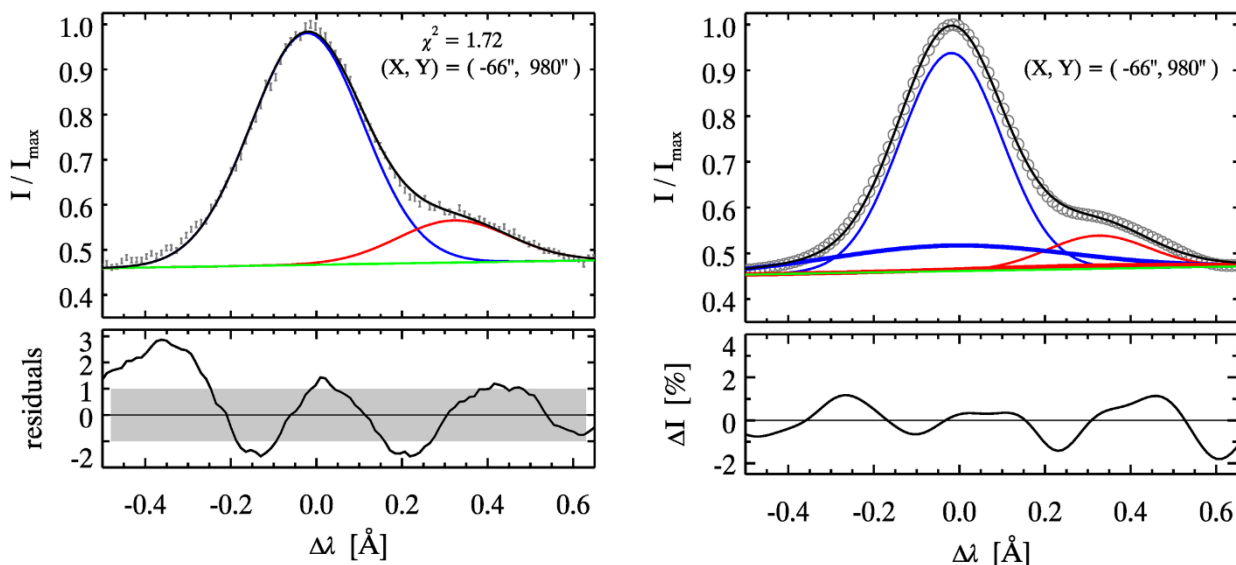
Pozorované spektrálne profily He I D₃ boli aproximované modelom zloženým z dvoch Gaussiánov superponovaných na polynóm prvého stupňa reprezentujúci intenzitu pozadia. Pre fitovanie bola použitá funkcia `mpfitfun.pro` z balíka SolarSoft, ktorá volá procedúru `mpfit.pro` (Markwardt 2009, Moré 1978, Moré a Wright 1993). Tá vykonáva χ^2 minimalizáciu váhovaných štvorcov rozdielov pozorovaných dát I_i ($i = 1 \dots N$) a užívateľom definovanej funkcie F_i Levenbergerovou-Marquardtovou metódou. Model mal sedem voľných parametrov: centrálnu intenzitu $I_{\text{blue,red}}$; šírky profilu v polohe maxima centrálnej intenzity $\text{FWHM}_{\text{blue,red}}$; spektrálnu polohu maxima modrej komponenty λ_{blue} a dva koeficienty polynómu. Spektrálna poloha červenej komponenty bola zviazaná s polohou modrej vzťahom $\lambda_{\text{red}} = \lambda_{\text{blue}} + 343,3$ mÅ. Ľavý panel Obr. 2 ukazuje výsledný fit typického profilu, ktorý bol získaný s nasledujúcimi parametrami: $I_{\text{blue}}/I_{\text{red}} = 5,5$; $\text{FWHM}_{\text{blue}} = \text{FWHM}_{\text{red}} = 0,31$ Å. Dolný subpanel dokumentuje reziduálne rozdiely typického pozorovaného profilu I_i a jeho najlepšieho fitu F_i normalizované neurčitou pozorovaní σ_i , pričom index i zodpovedá jednotlivým diskretným vlnovým dĺžkam: $(I_i - F_i)/\sigma_i$. Väčšina reziduálnych rozdielov typického profilu je neprekračuje 1σ interval. Najväčší reziduálny rozdiel približne 3σ sa vyskytuje v polohe $\Delta\lambda \approx -0,35$ Å, čo naznačuje systematicky väčšiu pozorovanú intenzitu v modrom krídle ako má Gaussovské krídlo fitu. Túto charakteristiku ďalej nazývame ako exces modrého krídla.

4. VÝSLEDKY FITOVANIA DVOJITÝM GAUSSIÁNOM

Ľavý panel Obr. 3 dokumentuje Dopplerovské rýchlosti protuberančnej plazmy v_{Dopp} odvodené z polôh maxima modrej komponenty λ_{blue} v jednotlivých pixeloch pomocou vzťahu $v_{\text{Dopp}} = c \cdot (\lambda_{\text{blue}} - \lambda_{\text{ref}})/\lambda_0$, kde c je rýchlosť svetla, λ_{ref} je referenčná vlnová dĺžka vypočítaná ako priemer hodnôt λ_{blue} zo všetkých 2983 pixelov protuberancie a $\lambda_0 = 5876$ Å. Väčšina meraných rýchlostí je z intervalu ± 5 kms⁻¹ a ich distribúcia má medián a maximum v hodnotách 0,3 kms⁻¹ a $0,4 \pm 1,7$ kms⁻¹, pričom hodnota 1,7 kms⁻¹ je štandardnou odchýlkou Gaussovského fitu histogramu na spodnom subpaneli.

Indikátorom optickej hrúbky plazmy emitujúcej v spektrálnej čiare He I D₃ je pomer centrálnych intenzít jej modrej a červenej komponenty $I_{\text{blue}}/I_{\text{red}}$ (Léger 2008). Histogram pomerov centrálnych intenzít znázornený na pravom dolnom paneli Obr. 3 má medián a maximum pri hodnotách 5,4 a $5,5 \pm 0,4$. Hodnota 0,4 je štandardnou odchýlkou Gaussovského fitu histogramu, ktorý naznačuje nadbytok profilov s pomerom centrálnych intenzít siahajúcim až po hodnotu pomeru 2.

Histogram $\text{FWHM}_{\text{blue}}$ (nezobrazené) nemá jedno globálne maximum, ale naznačuje rozdelenie s dvoma maximami pre hodnoty 0,25 Å and 0,30 Å. Podobne histogram FWHM_{red} má výrazne maximum pre hodnotu 0,22 Å a druhé maximum pre 0,31 Å. Mediány histogramov $\text{FWHM}_{\text{blue}}$ a FWHM_{red} sú 0,31 Å a 0,29 Å. Histogram pomeru $\text{FWHM}_{\text{blue}}/\text{FWHM}_{\text{red}}$ (nezobrazené) má medián a maximum pri hodnotách 1,03 a $1,04 \pm 0,18$.



Obrázok 2. Príklad typického fitu dvojitým Gausiánom (čierna) pozorovaného Stokes I profilu čiary He I D_3 (šedé chybové intervaly) s hodnotou $\chi^2 = 1,72$ [panel vľavo]. Modrá a červená Gaussovská komponenta a lineárne pozadie sú reprezentované modrou, červenou a zelenou čiarou. Dolný subpanel vľavo znázorňuje reziduálne rozdiely najlepšieho fitu vyjadrené v jednotkách 1σ (šedý obdĺžnik). Multigausssovský fit (čierna) Stokes I profilu čiary He I D_3 (šedé krúžky) vľavo po Fast Fourier Transform dekonvolúcii inštrumentálneho profilu spektrografu optimálnym filtrom [panel vpravo]. Tenká modrá a tenká červená čiara predstavujú chladnú zložku a hrubá čiara horúcu zložku protuberancie. Dolný subpanel vpravo znázorňuje percentuálne rozdiely dekonvolovaného He I D_3 profilu a jeho multigausssovského fitu.

4. FITOVANIE MULTIGAUSOVSKÝM MODELOM

Na exces modrého krídla profilu He I D_3 už poukázali Landman, Edberg, a Laney (1977) a Kotrč a Heinzel (1989), ktorý navrhli dvojteplotný model protuberancie. Inšpirovaní týmto vysvetlením nadbytku emisie v modrom krídle He I D_3 , skonštruovali sme multigausssovský model profilu He I D_3 zložený z dvoch dvojitých Gausiánov s rozdielnymi šírkami, ktoré reprezentujú studenú a horúcu plazmu protuberancie. Model má deväť voľných parametrov: centrálné intenzity modrých komponent I_{blue} (dva parametre); pomery centrálnych intenzít $I_{\text{blue}} / I_{\text{red}}$ vymedzené hodnotami 0,001 a 8 (dva parametre); FWHM spoločné pre modrú a červenú komponentu ale rozdielne pre chladnú a horúcu zložku (dva parametre); dva koeficienty lineárneho polynómu (dva parametre). Parametre modelu pre typický fit a profil (Obr. 2, vpravo) sú: $\text{FWHM}_{\text{blue,red}}^{\text{cool}} = 0,28 \text{ \AA}$, $\text{FWHM}_{\text{blue,red}}^{\text{hot}} = 0,65 \text{ \AA}$, $(I_{\text{blue}}/I_{\text{red}})^{\text{cool}} = 6,6$, $(I_{\text{blue}}/I_{\text{red}})^{\text{hot}} = 8,0$. Pomocou nasledujúce rovnice boli z hodnôt $\text{FWHM}^{\text{cool}}$ a FWHM^{hot} odhadnuté kinetické teploty chladnej a horúcej plazmy protuberancie 11,5 kK a 91 kK:

$$T = \frac{m_{\text{He}}}{2k} \left\{ \left(\frac{\text{FWHM} c}{2\sqrt{\ln 2} \lambda} \right)^2 - v^2 \right\},$$

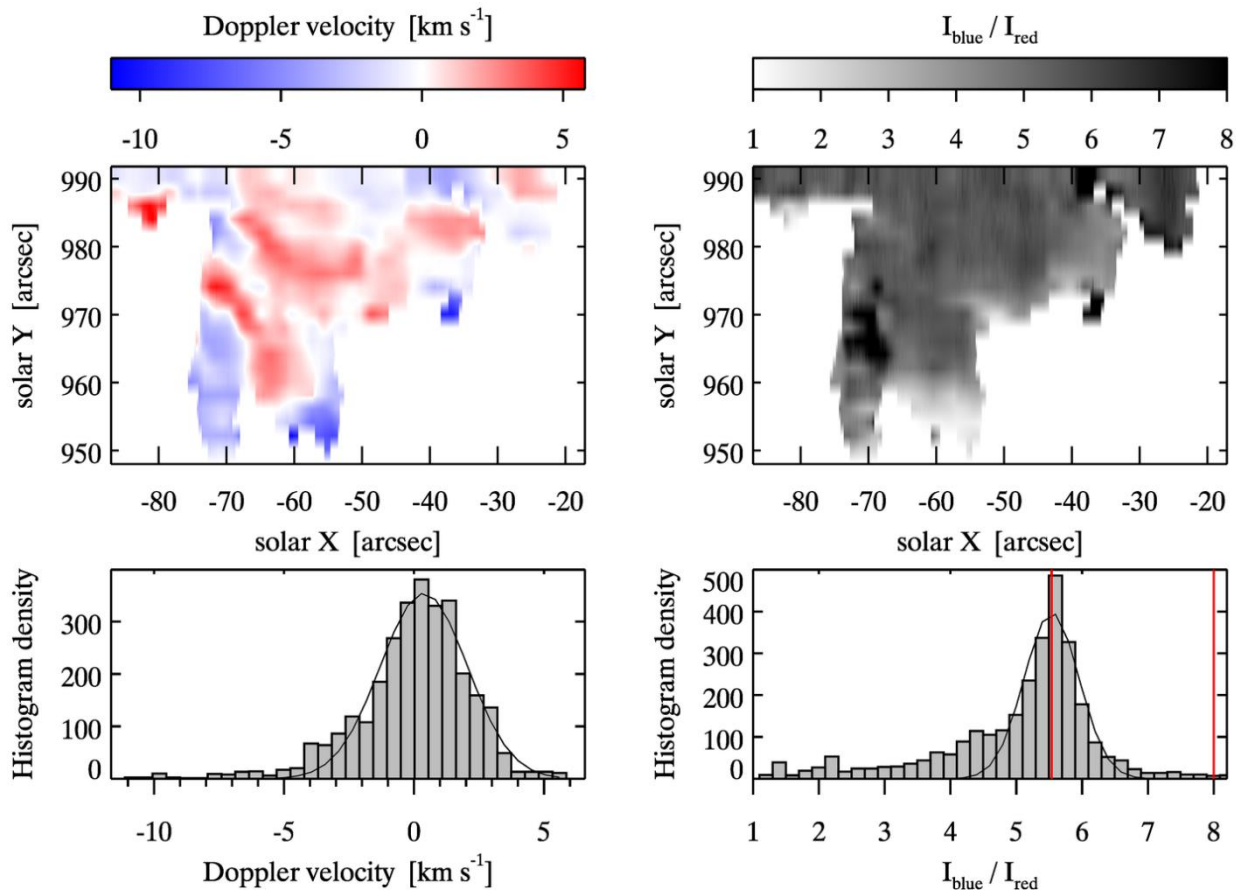
kde m_{He} je hmotnosť atómu hélia, k je Boltzmannova konštanta, c je rýchlosť svetla, λ je centrálna vlnová dĺžka He I D_3 a v je mikroturbulentná rýchlosť rovnaká pre chladnú a horúcu zložku 5 km s^{-1} . Právý panel Obr. 2 ilustruje výsledný multigausssovský fit typického profilu He I D_3 po dekonvolúcii inštrumentálneho profilu.

5. DISKUSIA

Najdôležitejším zistením charakterizujúcim cieľovú protuberanciu je pomer centrálnych intenzít modrej a červenej komponenty $5,5 \pm 0,4$, ktorý sa líši od hodnoty 8 charakteristickej pre opticky tenkú plazmu. Toto však nie je celkom nové zistenie. House a Smartt (1982) zistili hodnotu pomeru $6,6 \pm 0,4$. Analýza ôsmich protuberancií v práci Athay a kol. (1983) viedla k pomerom centrálnych intenzít v rozsahu 6,1 až 7,6. Konečne López Ariste a Casini (2002) a Wiehr a Bianda (2003) zistili pomery 6,8 a 6. Nami zistená hodnota $5,5 \pm 0,4$ je teda na spodnej hranici rozsahu vyššie uvedených hodnôt.

Hľadanie v databáze NASA ADS nám poskytlo iba prácu Prasad, Ambastha a Mathew (1999), v ktorej bola prezentovaná distribúcia Doppelrovských rýchlostí v pokojnej protuberancii v čiare He I D_3 so štandardnou odchýlkou okolo priemernej hodnoty $\pm 1,8 \text{ km s}^{-1}$, ktorá dobre súhlasí s odchýlkou $\pm 1,7 \text{ km s}^{-1}$ zistenou v tejto práci. Interval Dopplerovských rýchlostí $\pm 5 \text{ km s}^{-1}$ prezentovaný na dolnom paneli Obr. 3 vľavo je v súlade s výsledkami analýz Dopplerovských rýchlostí pokojných protuberancií pozorovaných v spektrálnych čiarach He I D_3 (Prasad, Ambastha a Mathew 1999), $\text{H}\alpha$ (Schmieder a kol. 2010), $\text{He I } 10\,830 \text{ \AA}$ (Orozco Suárez, Asensio Ramos, a Trujillo Bueno, 2014), a Mg II k\&h (Vial a kol. 2016).

Je pozoruhodné, že teploty 11,5 kK a 91 kK chladnej a horúcej zložky protuberancie odhadnuté z multigausssovského modelu veľmi dobre súhlasia s medznými teplotami 10 kK a 100 kK 2D modelu jemnej štruktúry protuberancií použitými v práci Gunár a kol. 2007. Toto by mohol byť nepriamy dôkaz fyzikálnej adekvátnosti multigausssovského modelu.



Obrázok 3. Dopplerovská rýchlosť [vľavo] a pomer centrálnych intenzít $I_{\text{blue}} / I_{\text{red}}$ modrej a červenej komponenty spektrálnej čiary He I D₃ [vpravo] pozorované v cieľovej protuberancii (Obr. 1). Gaussovské fity histogramov na dolných paneloch sú znázornené tenkou čiarou. Vertikálna červená čiara pri hodnote 5,5 na histograme vpravo dole vyznačuje polohu maxima Gaussiánu a pri hodnote 8 hodnotu pomeru $I_{\text{blue}} / I_{\text{red}}$ charakteristickú pre opticky tenkú plazmu pre čiaru He I D₃.

6. ZÁVER

V tejto práci boli analyzované pozorovania pokojnej protuberancie plošne skenovanej spektrografom ďalekohľadu THEMIS 2. augusta 2014 v spektrálnej čiare He I D₃. Ukázali sme, že modré krídlo tejto čiary vykazuje systematicky vyššiu intenzitu ako predpokladá model dvojitého Gausiánu. Ako riešenie sme navrhli a otestovali multigaussovský model profilu He I D₃ a ukázali sme, že je fyzikálne adekvátnym modelom profilu He I D₃. Viac podrobností je možné nájsť v práci Koza a kol. (2017).

Pod'akovanie Táto práca vznikla vďaka podpore projektu VEGA 2/0004/16.

LITERATÚRA

- Athay, R.G., Querfeld, C.W., Smartt, R.N., Landi Degl'Innocenti, E., Bommier, V.: 1983, *Solar Phys.* **89**, 3.
 Gunár, S.; Heinzel, P.; Schmieder, B.; Schwartz, P.; Anzer, U.: 2007, *Astron. Astrophys.* **472**, 929.
 House, L.L., Smartt, R.N.: 1982, *Solar Phys.* **80**, 53.
 Kotrč, P., Heinzel, P.: 1989, *Hvar Obs. Bull.* **13**, 371.
 Koza, J.; Rybák, J.; Gömöry, P.; Kozák, M.; López Ariste, A.: 2017, *Solar Phys.* **292**, 98.
 Landi Degl'Innocenti, E.: 1982, *Solar Phys.* **79**, 291.

- Landi Degl'Innocenti, E., Landolfi, M. (eds.): 2004, Polarization in Spectral Lines, *Astrophysics and Space Science Library* **307**.
 Landman, D.A., Edberg, S.J., Laney, C.D.: 1977, *Astrophys. J.* **218**, 888.
 Léger, L.: 2008, PhD thesis, Planete et Univers [physics]. Université Paul Sabatier – Toulouse III, Français.
 López Ariste, A.: 2015, In: Vial, J.-C., Engvold, O. (eds.) Solar Prominences, *Astrophysics and Space Science Library* **415**, 179.
 López Ariste, A., Casini, R.: 2002, *Astrophys. J.* **575**, 529.
 López Ariste, A., Rayrole, J., Semel, M.: 2000, *Astron. Astrophys. Suppl.* **142**, 137.
 Markwardt, C.B.: 2009, In: Bohlender, D.A., Durand, D., Dowler, P. (eds.) Astronomical Data Analysis Software and Systems XVIII, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* **411**, 251.
 Moré, J.: 1978, In: Watson, G.A. (ed.) Numerical Analysis, *Lecture Notes in Mathematics* **630**, 105.
 Moré, J., Wright, S.: 1993, *Optimization Software Guide, Frontiers in Applied Mathematics* **14**. 978-0-89871-322-0.
 Orozco Suárez, D., Asensio Ramos, A., Trujillo Bueno, J.: 2014, *Astron. Astrophys.* **566**, A46.
 Pötzi, W., Veronig, A.M., Riegler, G., Amerstorfer, U., Pock, T., Temmer, M., Polanec, W., Baumgartner, D.J.: 2015, *Solar Phys.* **290**, 951.
 Prasad, C.D., Ambastha, A., Mathew, S.K.: 1999, *Bull. Astron. Soc. India* **27**, 411.
 Schmieder, B., Chandra, R., Berlicki, A., Mein, P.: 2010, *Astron. Astrophys.* **514**, A68.
 Schwartz, P.; Gunár, S.; Curdt, W.: 2015: *Astron. Astrophys.* **577**, A92.
 Vial, J.-C., Pelouze, G., Heinzel, P., Kleint, L., Anzer, U.: 2016, *Solar Phys.* **291**, 67.
 Wiehr, E., Bianda, M.: 2003, *Astron. Astrophys.* **404**, L25.