

EUV filamenty: Nové pozorovania a modely *

P. Schwartz, Astronomický ústav AVČR, 25165 Ondřejov, ČR, schwartz@asu.cas.cz

P. Heinzel, Astronomický ústav AVČR, 25165 Ondřejov, ČR, pheinzel@asu.cas.cz

B. Schmieder, Observatoire de Paris, Section Meudon, LESIA, 92195 Meudon Principal Cedex, France, brigitte.schmieder@obspm.fr

U. Anzer, Max-Planck-Institut für Astrophysik, Karl-Schwarzschild-Strasse 1, 85740 Garching, Germany, ula@mpa-garching.mpg.de

Abstrakt

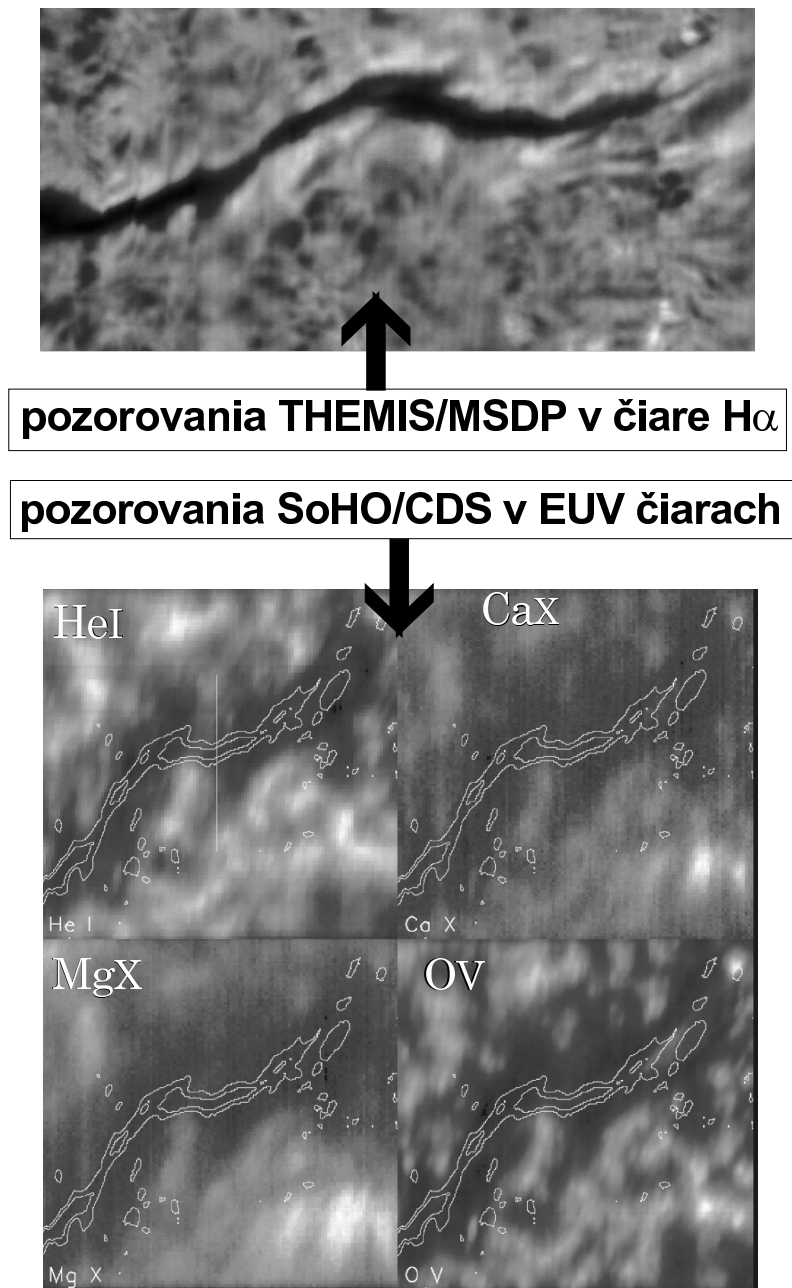
Heinzel a kol. (2001) a neskôr aj iní ukázali, že filamenty môžu byť oveľa rozsiahlejšie, keď sú pozorované v EUV oblasti spektra, pričom v $H\alpha$ čiare sú viditeľné iba niektoré ich časti s najväčšou opacitou. V ostatných miestach filamentu je v čiare $H\alpha$ príliš malá opacita na to, aby bol pokles jasnosti oproti disku v týchto miestach pozorovateľný. Ale opacita v EUV oblasti spektra je aj v týchto miestach dostatočne vysoká na to, aby bol tmavý EUV filament viditeľný. Teda EUV filamentom nazývame celý filament, ktorý je ako celok možné pozorovať v EUV oblasti spektra. Časti EUV filamentu neviditeľné (alebo veľmi slabo viditeľné) v $H\alpha$ čiare boli nazvané „EUV extensions”, t.j. EUV rozšírenie filamentu viditeľného v $H\alpha$. Boli navrhnuté dva modely popisujúce EUV rozšírenie: Aulanier a Schmieder (2002) považujú EUV rozšírenie za nízko ležiace (vo výškach menších než 4000 km) chladné štruktúry nachádzajúce sa na okraji filamentov. Naproti tomu Anzer a Heinzel (2003) považujú EUV rozšírenie za súčasť chladného mraku plazmy tvoriaci filament, teda ich výška je porovnateľná s výškou filamentov pozorovaných v $H\alpha$. Použitím nového spektroskopického modelu (Heinzel a kol. 2003a) a pozorovaní filamentu vykonaných 15. októbra 1999 prístrojmi CDS a SUMER na družici SoHO a spektrografom MSDP na ďalekohľade VTT boli určené výšky a následne 3D štruktúra EUV rozšírenia tohoto filamentu. EUV rozšírenie sa nachádzalo vo výškach porovnateľných s výškou $H\alpha$ filamentu (Schwartz a kol. 2004a), čo podporuje model Anzera a Heinzela (2003). Toto bolo zistené aj pre EUV filament pozorovaný 19. júna 1998 nielen použitím spektroskopického modelu ale aj určením výšok z projekcie filamentu na disk (filament sa nachádzal pomerne blízko limbu). Zo znalosti 3D štruktúry bola odhadnutá hmotnosť EUV rozšírenia filamentu z 15. októbra 1999, porovnateľná z hmotnosťami výtryskov koronálnej hmoty (CME) určenými autormi Simnett (2000) a Webb (2000). Modelovaním profilov vodíkových Lymanových spektrálnych čiar pomocou non-LTE teórie a riešenia rovnice prenosu žiarenia sme určili fyzikálne vlastnosti (hustotu a teplotu) plazmy tohoto EUV rozšírenia.

1. ÚVOD

Simultánne pozorovania filamentov v $H\alpha$ čiare a v EUV oblasti spektra odhalili, že tmavé štruktúry v EUV oblasti pozorované na disku, sú omnoho rozsiahlejšie než štruktúry pozorované v čiare $H\alpha$

(Heinzel a kol. 2001 alebo Schmieder a kol. 2003). Jedno z takýchto pozorovaní ukazujúce oveľa rozsiahlejšiu tmavú štruktúru v EUV oblasti než v $H\alpha$ čiare je na Obrázku 1. Tieto rozsiahle tmavé štruktúry pozorované v EUV sa nazývajú EUV filamenty. Ich časti, neviditeľné v $H\alpha$ čiare kvôli nízkej opacite, sa nazývajú rozšírenie EUV filamentu (alebo skrátené EUV rozšírenie). Tento termín je zavedený

*So žiadosťou o reprints sa obracajte na prvého autora príspevku.



Obrázok 1. Porovnanie pozorovaní filamentu z 5. mája 2000 na disku v čiare $H\alpha$ a v EUV oblasti spektra (Heinzel a kol. 2001). Pozorovania v čiare $H\alpha$ boli vykonané na spektrografe MSDP (Mein 1991) na teleskope THEMIS na Tenerife. Pozorovania v EUV oblasti boli vykonané spektrografom CDS na družici SoHO. Na tomto obrázku sú pozorovania dvoch koronálnych čiar: CaX 557,77 Å, MgX 624,94 Å, jednej čiary z prechodovej vrstvy OV 629,73 Å a jednej chromosférickej čiary – HeI 584,33 Å. Tmavá štruktúra pozorovaná v EUV oblasti spektra je oveľa rozsiahlejšia než tenký filament pozorovaný $H\alpha$ čiare. Pre názornejšie porovnanie je úzka tmavá štruktúra pozorovaná v $H\alpha$ vyznačená bielymi kontúrami v obrázkoch pozorovaní spektrografa CDS.

po prvý raz v slovenčine práve v tomto článku, preto uvidíme aj anglický originál: „EUV-filament extensions”, skrátene „EUV extensions”.

Tým, prečo je EUV rozšírenie viditeľné v EUV oblasti spektra a nie v $H\alpha$ čiare a mnohými inými otázkami ich prejavov (napr. prečo sú filamente pozorované v $H\alpha$ čiare ako tmavé útvary na disku, ale ako emisné protuberancie na limbe) sa budeme zaoberať v časti 2. tohoto článku.

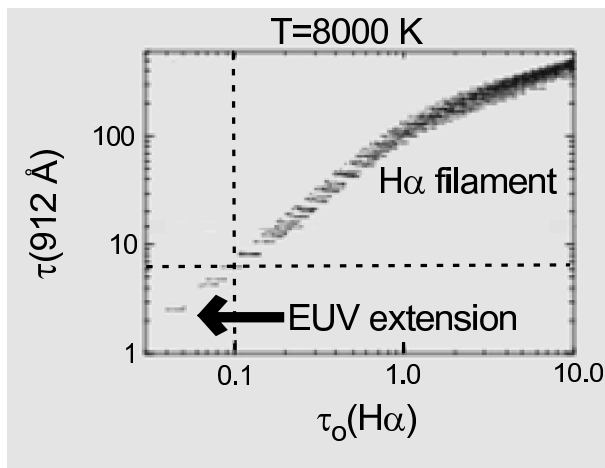
Už Schmahl a Orrall (1979) a Chiuderi Drago a kol. (2001) zistili, že tmavé štruktúry pozorované v EUV oblasti spektra na slnečnom disku sú spôsobené absorpciou EUV žiarenia, emitovaného zo slnečnej atmosféry spod filamentu. K absorpcii tohoto žiarenia dochádza v prevažne vodíkovej plazme EUV filamentu a to v Lymanovom kontinuu. Jedná sa o tzv. pravú absorpciu (pure absorption) – o fotoionizáciu vodíka z prvej hladiny pohltitím fotónov určitej spektrálnej čiary s danou vlnovou dĺžkou nižšou ako hrana Lymanovho kontinua vodíka (912 Å). Fotóny vyžiarené následnou rekombináciou sú už redistribuované na celý interval vlnových dĺžok Lymanovho kontinua vodíka. V dôsledku tejto absorpcie sa EUV filament javí ako tmavý voči svojmu okoliu.

Heinzel a kol. (2003a) uvažujú aj o ďalšom mechanizme – tzv. „volume blocking”. Tento mechanizmus je založený na fakte, že z objemu, v ktorom sa nachádza relatívne chladná plazma EUV filamentu, nie sú emitované koronálne spektrálne čiary a horúce čiary prechodovej vrstvy. Obidva tieto mechanizmy (absorpcia a volume blocking) sa podieľajú na zníženej intenzite žiarenia emitovaného z EUV filamentu. Na základe týchto dvoch mechanizmov Heinzel a kol. (2003a) vytvorili spektroskopický model, pomocou ktorého je možné vypočítať výšky EUV rozšírenia nad povrchom Slnka a následne určiť jeho 3D štruktúru. Spektroskopickému modelu a jeho výsledkom sa venujeme v 3. časti tejto práce. Zo znalosti 3D štruktúry EUV rozšírenia bolo možné určiť hustotu a následne hmotnosť EUV rozšírenia. Tomu sa venujeme podrobnejšie v 4. časti.

Použitím jednorozmerného non-LTE modelu EUV rozšírenia a pozorovaní opticky hrubých vodíkových Lymanových spektrálnych čiar je možné určiť tlak a teplotu prevažne vodíkovej plazmy EUV rozšírenia. Podrobne sa tomu venujeme v 5. časti. V poslednej časti sú diskutované a zhrnuté súčasné znalosti a predstavy o EUV filamentoch.

2. OTÁZKY VIDITEENOSTI FILAMENTOV V RÔZNYCH SPEKTRÁLNYCH ČIARACH NA DISKU A NA LIMBE

V Úvode sme už napísali, že filamente pozorované v EUV oblasti spektra sú oveľa rozsiahlejšie než pozorované v $H\alpha$ (ako to možno vidieť napr. na Obrázku 1). EUV rozšírenie nie je viditeľné v



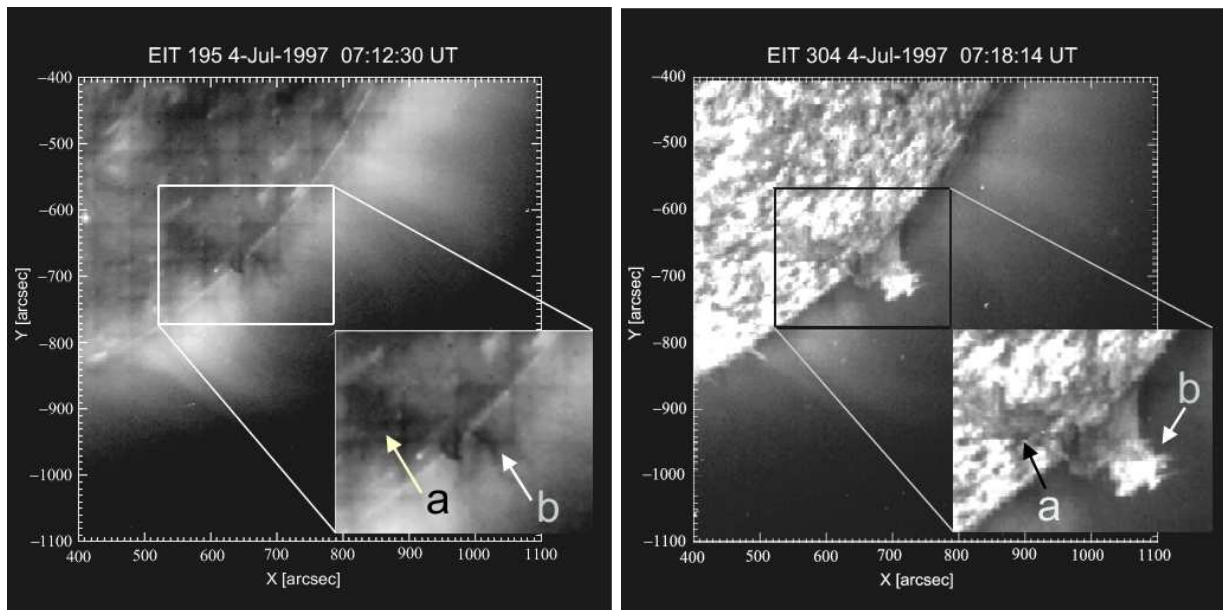
Obrázok 2. Závislosť optickej hrúbky τ_{912} na hrane Lymanovho kontinua vodíka na optickej hrúbke $\tau_o(H\alpha)$ v centre čiar $H\alpha$ pre teplotu 8000 K vypočítaná použitím kompletnej redistribúcie. Pre vyššie teploty stúpa τ_{912} so stúpajúcim $\tau_o(H\alpha)$ miernejšie a dosahuje menšie hodnoty. Tento graf je prebratý z práce Heinzel a kol. (2001). Prerušované čiary zvislá a vodorovná vyznačujú dve oblasti: Oblasť označená „EUV extension” – opacita v $H\alpha$ je príliš malá na to, aby bol filament pozorovateľný, no v EUV oblasti môže byť dostatočná. Oblasť označená „ $H\alpha$ filament” – filament pozorovateľný aj v $H\alpha$ ($\tau_o(H\alpha) > 0,1$), aj v EUV.

$H\alpha$ kvôli jeho malej opacite v tejto čiare, pričom opacita vo vlnových dĺžkach vodíkoveho Lymanovho kontinua je dostatočná na pozorovateľný pokles intenzity EUV spektrálnych čiar. Závislosť optickej hrúbky τ_{912} na hrane Lymanovho kontinua vodíka na optickej hrúbke $\tau_o(H\alpha)$ v centre spektrálnej čiary $H\alpha$ pre teplotu 8000 K je vynesená na Obrázku 2 (Heinzel a kol. 2001). Optická hrúbka $d\tau_\lambda$ na vlnovej dĺžke λ je priamo úmerná opacite κ_λ :

$$d\tau_\lambda = \kappa_\lambda dz, \quad (1)$$

kde dz je geometrická hrúbka. Zo závislosti na Obrázku 2 vyplýva: Pre $\tau_o(H\alpha) < 0,1$ filament už nie je pozorovateľný v čiare $H\alpha$, no opacita na hrane Lymanovho kontinua vodíka je postačujúca na pozorovateľný kontrast voči žiareniu slnečného disku. Teda EUV rozšírenie je pozorovateľné ako tmavá štruktúra v spektrálnych čiarach s inovou dĺžkou menšou ako hrana Lymanovho kontinua 912 Å. Opacita s klesajúcou vlnovou dĺžkou klesá až po 504 Å (hrana rezonančného kontinua neutrálneho hélia), kde začína dominovať absorpcia neutrálnym héliom. Táto tiež s klesajúcou vlnovou dĺžkou klesá a na hrane Lymanovho kontinua ionizovaného hélia 228 Å nastupuje opacita ionizovaného hélia. Táto opacita znova s klesajúcou vlnovou dĺžkou klesá.

Či už sa jedná o pravú absorpciu (v prípade EUV koronálnych spektrálnych čiar a čiar z prechodovej



Obrázok 3. Pozorovania filamentu označeného **a** a protuberancie označenej **b** vykonané prístrojom EIT (Extreme-Ultraviolet Imaging Telescope) (Delaboudinière a kol. 1995) na družici SoHO (Solar and Heliospherical Observatory). Na ľavom paneli je pozorovanie v koronálnych spektrálnych čiarach iónov FeXI a FeXII v okolí 195 Å. Aj filament aj protuberancia sa prejavujú ako tmavé útvary. Na pravom paneli je pozorovanie v chromosférickej čiare HeII 304 Å, kde filament sa prejavuje ako tmavý útvar no protuberancia ako žiariaci.

vrstvy) alebo o rozptyl (v prípade vodíkových alebo héliových fotosférických alebo chromosférických spektrálnych čiar, napr. H α alebo HeII 304 Å), filament sa javí vždy ako tmavá štruktúra na jasnom slnečnom disku (pozri Obrázok 1 a Obrázok 3 – ľavý aj pravý panel, tmavá štruktúra označená **a**).

Iná je situácia na limbe:

V prípade fotosférických a chromosférických spektrálnych čiar vodíka a hélia vidíme protuberanciu ako emisný útvar (Obrázok 3 – pravý panel, štruktúra označená **b**). Je to preto, lebo v protuberancii dochádza k rozptylu žiarenia týchto čiar a koronálne pozadie je tmavé (koróna žiari v týchto čiarach a v kontinuu v ich okolí veľmi slabo). Intenzita v jadrách týchto čiar je aj po rozptyle omnoho vyššia ako intenzita pozadia. Preto protuberancie pozorujeme v týchto čiarach v emisii.

Protuberancie pozorované na limbe v koronálnych čiarach s vlnovou dĺžkou nižšou než 912 Å sa prejavujú ako tmavé útvary na intenzívnom pozadí slnečnej koróny (pozri Obrázok 3 – ľavý panel, tmavá štruktúra označená **b**). Pozorovanie EUV rozšírenia na limbe je otáznne. Doteraz boli filamente pozorované v EUV na limbe iba prístrojom SoHO/EIT. Opacita plazmy EUV rozšírenia v koronálnych EUV čiarach pozorovaných prístrojom SoHO/EIT je malá (Anzer a Heinzel, 2005), teda pokles intenzity by mal byť spôsobený takmer výlučne vlnou blocking-om. V dôsledku malej opacity je v týchto čiarach EUV rozšírenie opticky tenké, preto vidíme pri pozorovaní na limbe aj korónu za EUV rozšírením. Teda príspevok koróny je pri pozorovaní na limbe väčší

než pri pozorovaní na disku, kde prispieva iba koróna nad filamentom. Preto EUV rozšírenie pozorované na limbe môže byť prežiarené žiarením koróny. Tento problém si však vyžaduje ďalšie pozorovania a ich analýzu.

3. 3D ŠTRUKTÚRA EUV ROZŠÍRENIA

Skôr, než by sme sa zaoberali fyzikálnymi vlastnosťami plazmy EUV rozšírenia, bolo potrebné určiť ich podstatu. Teda čo to sú vlastne tie tmavé rozsiahle štruktúry (EUV filamente) pozorované v EUV oblasti spektra v mieste filamentov pozorovaných v H α (tzv. H α filamentov) a aký majú vzťah k H α filamentom.

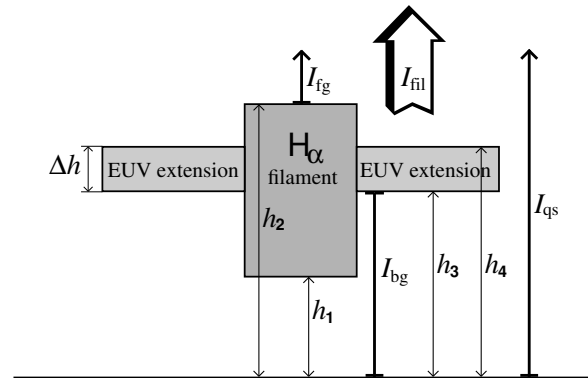
V čiare H α je možné pozorovať iba najhustejšiu a najchladnejšiu časť celého filamentu (EUV filamentu), ktorý je celý viditeľný iba v EUV oblasti spektra. Súčasná predstava o filamentoch nedokáže vysvetliť prítomnosť EUV rozšírenia. Táto predstava popisuje filament ako rezanec zložený z množstva sploštených slučiek, pričom tieto slučky sú na vrchu plytko preliacené. Týmto preliaceninám sa hovorí tzv. magnetic dips. Budeme ich ďalej v tejto práci nazývať „preliaceny siločiar magnetického poľa”. Na každej slučke je len jedna takáto preliacenina naplnená chladnou (6 000 – 10 000 K) plazmou. EUV rozšírenie je tvorené plazmou s nižšou hustotou a pravdepodobne vyššou teplotou, z čoho vyplýva aj vyšší stupeň ionizácie vodíka v tejto plazme. Preto aj geometrická hrúbka EUV rozšírenia musí byť 2 až 3 krát väčšia (Heinzel a kol. 2003b), než geome-

trická hrúbka $H\alpha$ filamentu, aby obsahovali dostatočné množstvo neutrálneho vodíka, absorbujúceho EUV žiarenie s vlnovou dĺžkou nižšou než 912 \AA . Teda aby optická hrúbka v oblasti Lymanovho kontinua vodíka bola dostatočná na viditeľnosť EUV rozšírenia na slnečnom disku. Súčasná predstava s plytkými preliačeninami siločiar magnetického poľa nemôže popisovať EUV rozšírenie už len kvôli ich veľkej geometrickej hrúbke. Preto boli navrhnuté dve nové predstavy o EUV rozšírení.

Prvá, navrhnutá autormi Aulanier a Schmieder (2002), uvažuje o tzv. parazitických polaritách v bipolárnom fotosférickom magnetickom poli pod filamentom. Teda v obidvoch hlavných polaritách bipolárnej oblasti pod filamentom existujú maličké oblasti s opačnou polaritou než ich okolie. Magnetické pole v koróne nadväzujúce na fotosférickú bipolárnu oblasť s množstvom parazitických polarít vykazuje značné nepravidelnosti v jednoduchom bipolárnom usporiadaní. Práve v takýchto nepravidelnostiach v okolí $H\alpha$ filamentu by mohli vzniknúť krátke a nízke prepojenia parazitických polarít, na ktorých by sa vyskytovali preliačneniny siločiar magnetického poľa naplnené chladnou plazmou EUV rozšírenia. Teda táto predstava považuje EUV rozšírenie za štruktúry v **malých výškach** nepresahujúcich 4000 km nad povrchom Slnka.

Inú predstavu o EUV rozšírení navrhli Anzer a Heinzel (2003). Táto je založená na tzv. „twisted flux tubes” – zakrútených magnetických trubiciach. Títo autori vychádzali z jednoduchej bipolárnej štruktúry magnetického poľa. Opačné polarity sú poprepájané arkádou slučiek, pričom každú slučku tvorí viacero magnetických trubíc. Na každej slučke je jedna plytká preliačnenina siločiar magnetického poľa naplnená chladnou plazmou $H\alpha$ filamentu. Pokiaľ sú však jednotlivé magnetické trubice pokrútené (tak ako keď v rukách žmýkame prádlo) vyvolá to vznik ďalších preliačnenín siločiar magnetického poľa mimo vrcholov slučiek. Tieto preliačneniny siločiar magnetického poľa môžu byť naplnené chladnou plazmou EUV rozšírenia. Čím viac sú magnetické trubice pokrútené, tým ďalej od vrcholu slučiek sa môžu vyskytnúť preliačneniny siločiar magnetického poľa a tým je EUV príviesok rozsiahlejší. Dôležitou vlastnosťou tejto predstavy je fakt, že EUV rozšírenie by sa malo nachádzať **vo výškach porovnateľných s výškou $H\alpha$ filamentu**.

Práve výška EUV rozšírenia nad povrchom Slnka sa stala kritériom na určenie, ktorá z horeuvedených predstáv lepšie popisuje EUV rozšírenie. Na určenie výšok EUV rozšírenia navrhli Heinzel a kol. (2003a) spektroskopický model, pomocou ktorého možno určiť výšky z pozorovaní aspoň dvoch EUV koronálnych spektrálnych čiar s vlnovou dĺžkou nižšou než 912 \AA . Schéma tohto spektroskopického modelu je na Obrázku 4. Intenzita danej koronálnej spektrálnej čiary pozorovaná v okolí EUV filamentu je jej objemová emisivita $\varepsilon(h)$ zintegrovaná podľa výšky h



Obrázok 4. Schéma spektroskopického modelu (Heinzel a kol. 2003a) použitého na určenie výšok h_3 a h_4 spodnej a vrchnej hranice EUV rozšírenia. Tenké čiary označujú výšky a hrúbku Δh EUV rozšírenia. Hrubé plné čiary označujú úseky zorného lúča, z ktorých je vyžarovaná daná intenzita: I_{qs} je intenzita koronálnej čiary vyžarovaná z pokojnej koróny, I_{bg} – intenzita koronálnej čiary vyžiarená z koróny pod filamentom a I_{fg} – intenzita koronálnej čiary vyžiarená z koróny nad filamentom. I_{fil} je intenzita koronálnej spektrálnej čiary pozorovaná v mieste EUV rozšírenia.

po celej dráhe zorného lúča od povrchu Slnka:

$$I_{qs} = \int_0^{\infty} \varepsilon(h) dh. \quad (2)$$

Intenzitu tejto koronálnej spektrálnej čiary vo výške h normovanú na I_{qs} sme označili ako $f(h)$:

$$f(h) = \frac{1}{I_{qs}} \int_0^h \varepsilon(h') dh'. \quad (3)$$

Predpokladáme exponenciálny pokles intenzity I danej koronálnej spektrálnej čiary s výškou h :

$$I(h) = I_{h=0} \exp(-h/H), \quad (4)$$

kde H je škálovacia výška. Potom môžeme napísať aproximatívny vzťah (Heinzel a kol. 2003a)

$$f(h) \approx 1 - \exp(-h/H). \quad (5)$$

Zo schémy na Obrázku 4 a použitím vzťahu (5) vyplýva pre intenzitu I_{fil} danej spektrálnej čiary nameranú v mieste EUV rozšírenia:

$$I_{fil} = I_{qs} [1 - f(h_4)] + I_{qs} f(h_3) \exp(-\tau_{\lambda}), \quad (6)$$

kde τ_{λ} je optická hrúbka kontinua vo vlnovej dĺžke λ tejto spektrálnej čiary. Druhý člen vzťahu (6) vyjadruje absorpciu žiarenia vlnovej dĺžky $\lambda < 912 \text{ \AA}$ Lymanovým kontinuum. Pre $\tau_{\lambda} = 0$ vyjadruje $I_{qs} - I_{fil}$ úbytok žiarenia v dôsledku volume blocking.

Použitím vzťahu (6) pre dve EUV koronálne spektrálne čiary s vlnovou dĺžkou menšou než 912 \AA sme

dostali sústavu rovníc, riešením ktorej sme určili výšky h_3 a h_4 . Optickú hrúbku sme považovali za voľný parameter, pričom ako referenčnú pre obidve spektrálne čiary sme zobrali optickú hrúbku τ_{912} na hrane Lymanovho kontinua vodíka. Túto sme prepočítali na optickú hrúbku τ_λ na vlnovej dĺžke konkrétnej spektrálnej čiary použitím formuly závislosti opacity Lymanovho kontinua na vlnovej dĺžke:

$$\frac{\tau_\lambda}{\tau_{912}} = \frac{\lambda^3}{(912)} \frac{g_{II}(\lambda)}{g_{II}(912)}, \quad (7)$$

kde $g_{II}(\lambda)$ je Gauntov faktor pre vlnovú dĺžku λ v Å.

Na určenie výšok EUV rozšírenia filamentu pozorovaného 15. októbra 1999 sme použili pozorovania dvoch EUV koronálnych čiar s vlnovou dĺžkou menšou než 912 Å vykonané na spektrografe CDS (Coronal Diagnostic Spectrometer) (Harrison a kol. 1995) na družici SoHO. Tieto pozorovania sú ukázané na Obrázku 5.

Na výpočet $f(h)$ pre obidve koronálne spektrálne čiary (do sústavy rovníc (6)) potrebujeme poznať škálovacie výšky H (pozri vzťah (5)). Porovnaním pozorovanej čiary MgIX 368 Å na limbe v pokojnej koróne publikovaných Fludrom a kol. (1999) a pozorovanej tejto čiary nad aktívnou oblasťou publikovaných Sterlingom a kol. (1999) bolo zistené, že priebeh intenzity tejto čiary s výškou nezávisí na mohutnosti slnečnej aktivity. Čiara MgX 624,94 Å je formovaná pri takmer rovnakej teplote a elektrónovej hustote ako MgIX 368 Å, preto sa dá predpokladať, že ani priebeh intenzity čiary MgX 624,94 Å s výškou nezávisí na mohutnosti slnečnej aktivity (Heinzl a kol. 2003a) (ani lokálne v mieste merania, ani globálne – teda nezávisí ani na slnečnom cykle). Preto sme použili hodnotu 32 000 km pre škálovaciu výšku spektrálnej čiary MgX určenú z meraní CDS na limbe v pokojnej koróne publikovaných autormi Fludra a kol. (1999). Títo autori merali priebeh intenzity s výškou v koróne. Kvôli tomu, že tento EUV filament nebol presne v strede slnečného disku, zorný lúč zvieral s radiálnym smerom uhol α . Tento uhol je rovný heliocentrickej uhlovej vzdialenosti filamentu od stredu slnečného disku. Preto sme pretransformovali škálovaciu výšku spektrálnej čiary MgX do smeru zorného lúča. Filament nebol ďaleko od stredu slnečného disku ($\alpha \approx 40^\circ$), preto sme použili aproximatívny vzťah – radiálnu škálovaciu výšku vydělili $\cos\alpha$. Škálovaciu výšku spektrálnej čiary SiXII 520,60 Å sme vypočítali pomocou vzťahu

$$\frac{I_{fg}}{I_{qs}} = 1 - f(h_2) \quad (8)$$

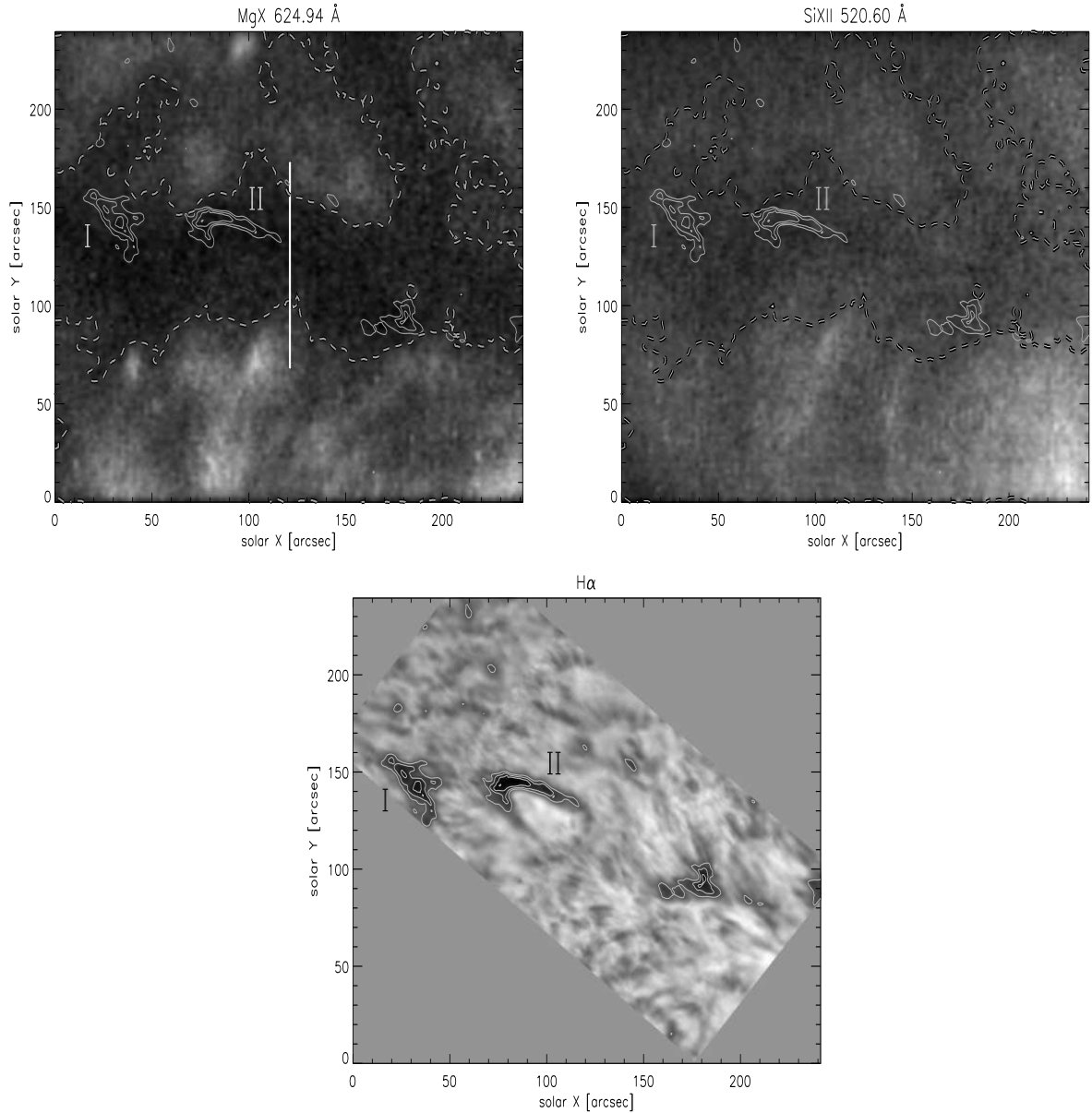
vyplývajúceho zo schémy na Obrázku 4. Najprv sme do vzťahu (8) dosadili I_{fg} a I_{qs} čiary MgX 624,94 Å a jej škálovaciu šírku prepočítanú do smeru zorného lúča a pomocou (5) vyjadrili h_2 vrchnú výšku H α filamentu. Potom sme do (8) dosadili I_{fg} , I_{qs} čiary SiXII 520,60 Å a práve vypočítanú h_2 a vypočítali škálovaciu výšku pre túto spektrálnu čiaru.

Potom sme mohli riešením sústavy rovníc (6) vypočítať hodnoty výšky h_3 spodnej hranice a výšky h_4 vrchnej hranice EUV rozšírenia v celej jeho pozorovanej oblasti (na Obrázku 5 na jeho dvoch vrchných paneloch oblasť ohraničená prerušovanou čiarou mimo oblastí ohraničených plnou čiarou). Hodnotu optickej hrúbky τ_{912} na hrane Lymanovho kontinua sme považovali za voľný parameter. Predpokladali sme, že nie je menšia než 1, aby EUV rozšírenie vykazovalo merateľnú absorpciu. Nemala by byť ani väčšia než 7, keďže EUV príviesok nebol vyvíditelný v čiare H α , ako to vyplýva z grafu na Obrázku 2. Výšky EUV rozšírenia vypočítané pre hodnoty τ_{912} z tohoto intervalu len málo záviseli na hodnote optickej hrúbky (Schwartz a kol. 2004a). Priemerné hodnoty výšky spodnej a vrchnej hranice sú 15 000 km a 40 000 km. Aj keď sú značné variácie výšok okolo týchto priemerných hodnôt, tieto hodnoty sú štatisticky najvýznamnejšie v oblasti EUV rozšírenia okrem jeho okraja, kde podľa očakávania výšky klesajú. Pre priemernú výšku vrchnej hranice H α filamentu, sme vypočítali zo vzťahu (8) hodnotu 44 500 km. Teda výška H α filamentu a výšky EUV rozšírenia sú porovnateľné, čo podporuje predstavu Anzera a Heinzela (2003).

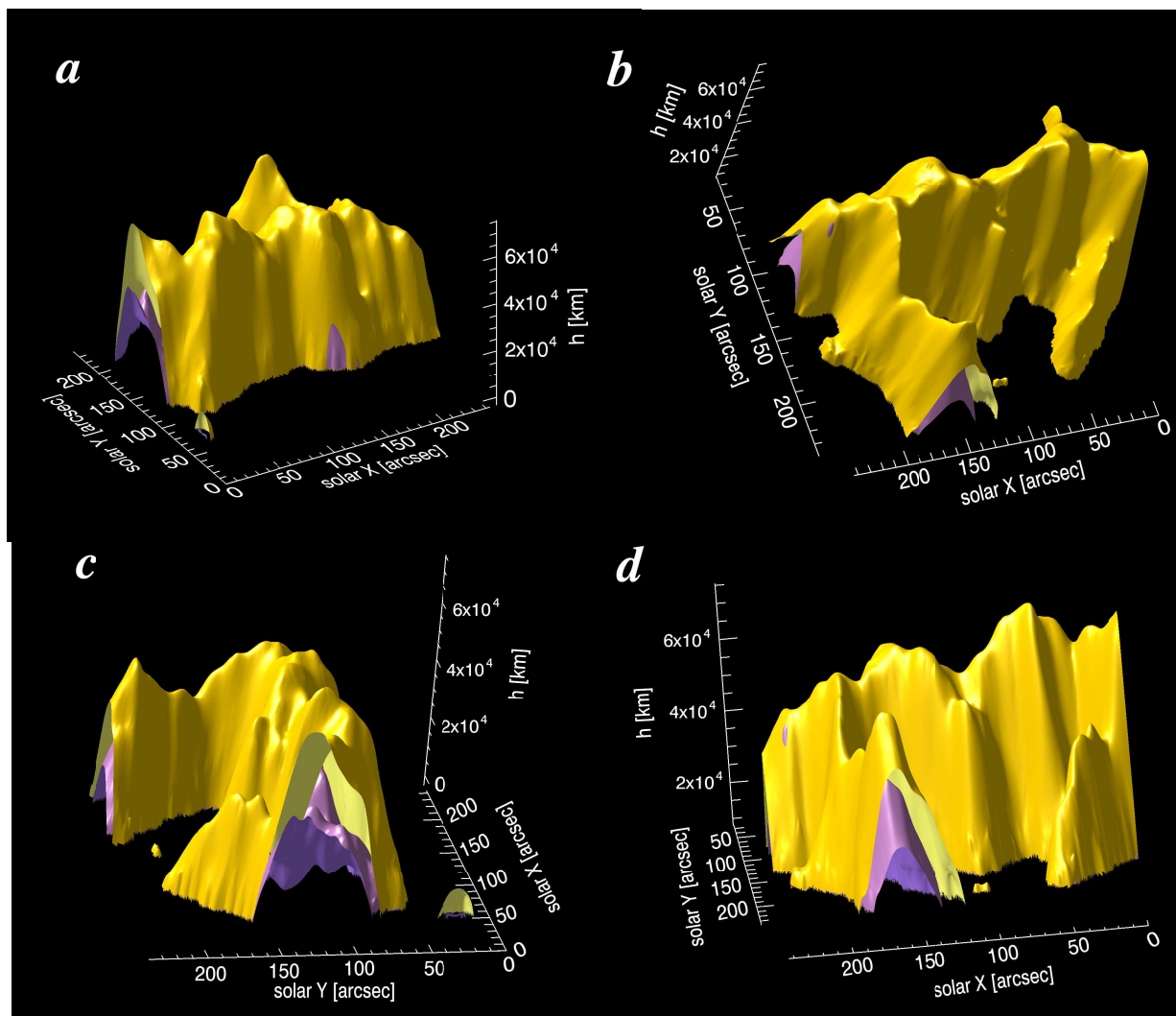
Správnosť predstavy Anzera a Heinzela (2003) potvrdilo aj určenie výšok EUV rozšírenia filamentu južnej polárnej korunky (south polar crown filament) pozorovaného 19. júna 1998 medzi 7:00 a 8:00 UT prístrojmi: Swedish Vacuum Solar Telescope (SVST) (Scharmer a kol. 1985) v čiare H α , spektrografom SoHO/CDS v koronálnej EUV čiare MgIX 368,06 Å a EUV teleskopom na družici TRACE (Handy a kol. 1999) v čiarach FeIX a FeX v oblasti 171 Å vyžarovaných z koróny a horúcich oblastí prechodovej vrstvy. Tieto pozorovania sú ukázané na Obrázku 7.

Preto, že filament bol dosť ďaleko od stredu slnečného disku, bol pozorovaný v projekcii na slnečný disk mimo neutrálnej čiary (separujúcou magnetické polarity), ktorá je presne pod filamentom pri pohľade zhora. Potom zo vzdialenosti projekcie H α filamentu od neutrálnej čiary bolo možné určiť výšky H α filamentu. Výšky H α filamentu (Obrázok 7 – ľavý panel) boli určené zo vzdialeností v troch rezoch EUV filamentom (spojnice bodov A_1A_2 , B_1B_2 a C_1C_2 smerujúce do stredu slnečného disku). Vrchné výšky boli určené zo vzdialeností hranice H α filamentu vzdialenejšej od neutrálnej čiary (body A_1 , B_1 , C_1), spodné zo vzdialeností hranice H α filamentu bližšej k neutrálnej čiare. Výšky v radiálnom smere vrchnej hranice H α filamentu boli medzi 66 500 a 100 000 km a výšky spodnej hranice medzi 41 000 a 60 000 km (Schmieder a kol. 2004).

Použitie spektroskopického modelu bolo v tomto prípade komplikovanejšie, lebo žiarenie čiary vlnovej dĺžky 368,06 Å bolo absorbované nielen v Lymanovom kontinuu vodíka, ale aj v rezonančnom kontinuu neutrálneho hélia a žiarenie vlnovej dĺžky



Obrázok 5. Pozorovania EUV filamentu vykonané 15. októbra 1999 medzi 10:00 a 12:00 UT (Schwartz a kol. 2004a). Pozícia filamentu na slnečnom disku bola $N37,6^{\circ} E19,3^{\circ}$ v Carringtonovských (relatívnych voči stredu slnečného disku) heliografických súradniciach ($-253,8$ arcsec $512,8$ arcsec v SoHO súradniciach). Na vrchných dvoch paneloch sú pozorovania CDS v dvoch EUV koronálnych spektrálnych čiarach. Tieto pozorovania boli použité na určenie výšok EUV rozšírenia. Prerušovanou kontúrou je označená oblasť EUV filamentu. Kontúrou plnou čiarou je označená oblasť H α filamentu určená z H α pozorovaní (spodný panel) spektrografa Multichannel Subtractive Double Pass (MSDP) na Vacuum Tower Telescope (VTT) na Tenerife. Najtmavšie oblasti v H α filamente označené I a II boli použité na určenie intenzít I_{fg} obidvoch EUV koronálnych spektrálnych čiar. Zvislou úsečkou v obrázku pozorovania čiar MgX je označená poloha štrbiny spektrografa SoHO/SUMER pri pozorovaní Lymanových čiar vodíka.



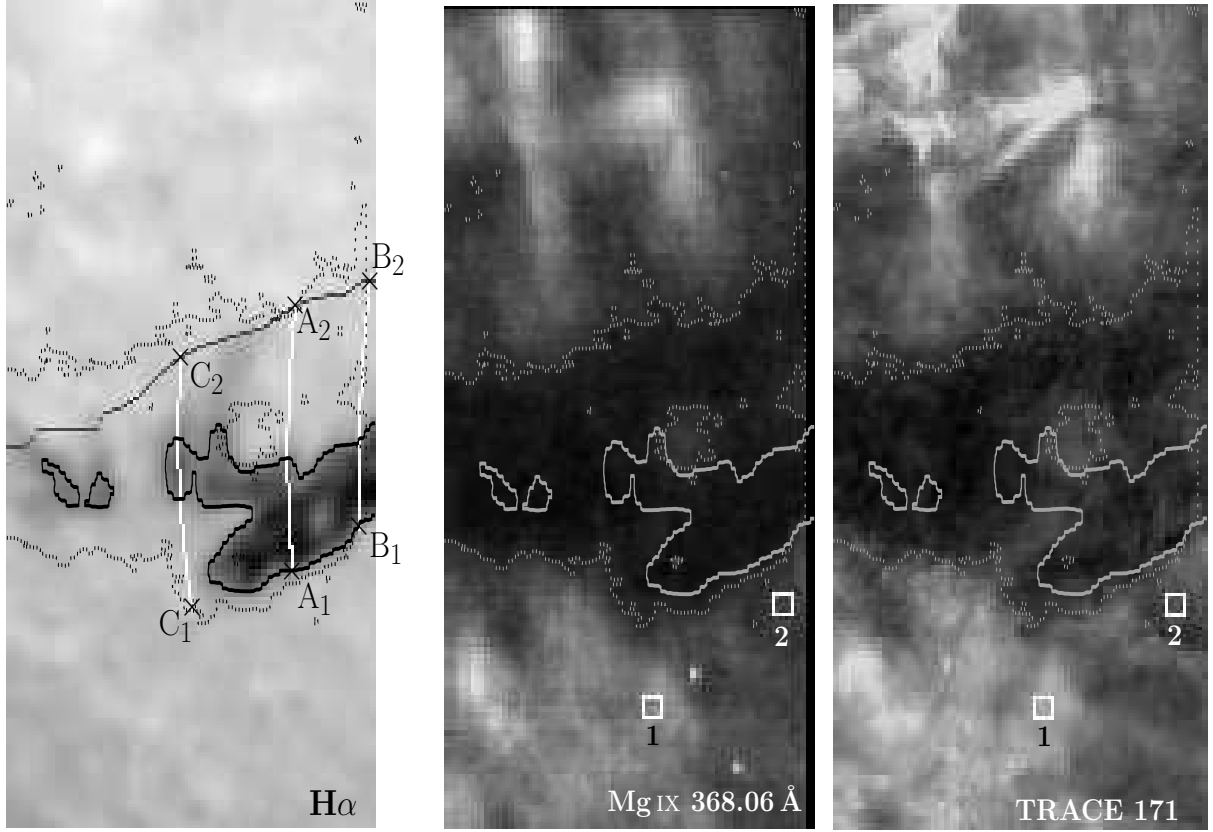
Obrázok 6. 3D štruktúra EUV rozšírenia filamentu pozorovaného 15. októbra 1999 určená pri $\tau_{912}=5$ zobrazená zo štyroch rôznych uhlov pohľadu (obrázok prebratý z práce Schwartz a kol. (2004a)). Výšky EUV rozšírenia vypočítané použitím spektroskopického modelu (Heinzl a kol. 2003a) vykazovali značný šum kvôli šumu v pozorovaniach CDS (pozri Obrázok 5, najmä pozorovania spektrálnej čiary SiXII 520,60 Å) a preto boli nevhodné na zobrazenie 3D štruktúry a bolo potrebné ich vyhladiť spriemerovaním cez štvorcové oblasti veľkosti 8 arcsec \times 8 arcsec.

171 Å ešte aj v rezonančnom kontinuu ionizovaného hélia. Kvôli malej absorpcii žiarenia vlnovej dĺžky 171 Å plazmou EUV rozšírenia a značnému šumu v pozorovaniach TRACE v oblasti EUV rozšírenia (kde sú malé hodnoty intenzít) výsledky spektroskopického modelu neboli dostatočne presné na určenie 3D štruktúry EUV rozšírenia. Preto sme aspoň vypočítali intervaly, v ktorých sa výšky EUV rozšírenia pohybovali. Výšky spodnej hranice EUV rozšírenia určené pomocou spektroskopického modelu v smere zorného lúča boli v intervale 10 000 až 20 000 km a výšky vrchnej hranice v intervale 60 000 až 100 000 km (Schmieder a kol. 2004). To odpovedá výškam v radiálnom smere 6 300–12 700 km pre spodnú hranicu a 39 000–66 400 km pre vrchnú hranicu EUV rozšírenia. Z toho vyplýva, že EUV filament pozorovaný 19. júna 1999 je veľmi rozsiahly, čo sa týka výšok. Z porovna-

nia výšok H α filamentu a EUV rozšírenia vyplýva, že hmota EUV rozšírenia sa nachádza pod H α filamentom, čo je vidieť aj na pozorovaniach (Obrázok 7). Aj keď v tomto prípade sú výšky vrchnej hranice H α filamentu väčšie než výšky vrchnej hranice EUV rozšírenia, aj tento prípad potvrdzuje že EUV príviesok sa nachádza vo veľkých výškach a teda potvrdzuje predstavu Anzera a Heinzela (2003).

4. ODHADY HUSTOTY A HMOTNOSTI EUV ROZŠÍRENIA Z JEHO 3D ŠTRUKTÚRY

Z 3D štruktúry (Obrázok 6) rozšírenia EUV filamentu pozorovaného 15. októbra 1999 bolo možné odhadnúť hmotnosť a priemernú hustotu plazmy tohto EUV rozšírenia. Najprv bola určená tzv. stĺpcová hmotnosť v každom pixle rastra pozorovaní spektrografu CDS v oblasti EUV rozšírenia. Hmotnosť



Obrázok 7. Pozorovania EUV filamentu vykonané 19. júna 1999 v čase 7:00 – 8:00 UT prístrojmi SVST v $H\alpha$, SoHO/CDS v čiare MgIX 368,06 Å a TRACE v kanále 171 Å. Pozícia filamentu bola $S45^\circ E28^\circ$ v Carringtonovských heliografických súradniciach. Plnou čiarou je označený $H\alpha$ filament, bodkovanou EUV filament. V obrázku pozorovania v $H\alpha$ spojnice bodov A_1A_2 , B_1B_2 a C_1C_2 označujú vzdialenosti medzi projekciou $H\alpha$ filamentu na disk a neutrálnou čiarou v troch rezoch cez EUV filament. Neutrálna čiara (na nej sú body A_2 , B_2 a C_2) bola určená z meraní SoHO/MDI. V rastoch pozorovaní CDS a TRACE štvorčky označené číslami 1 a 2 vyznačujú oblasti, kde boli určené hodnoty intenzity I_{qs} . Obrázok je prevzatý z práce Schmieder a kol. (2004).

EUV rozšírenia je potom sumou stĺpcových hmotností v celej oblasti EUV rozšírenia vynásobenou plochou jedného pixla v cm^2 . Priemernú hustotu plazmy EUV rozšírenia potom vypočítame tak, že hmotnosť EUV rozšírenia vydělíme jeho objemom určeným z jeho 3D štruktúry.

Hodnoty stĺpcovej hmotnosti sme určovali podľa práce Heinzel a kol. (2003b). Za predpokladu, že plazma v EUV rozšírenia obsahuje iba vodík a hélium (abundancie ostatných prvkov sú zanedbateľné) a takmer všetko hélium je neutrálne, platí

$$n_p = n_e, \quad (9)$$

kde n_p je koncentrácia protónov (ionizovaného vodíka) a n_e hustota voľných elektrónov. V chladnej plazme EUV rozšírenia je skoro všetok neutrálny vodík v základnom stave, preto môžeme napísať

$$n(\text{HI}) \approx n_1 = 1.6 \times 10^{17} \tau_{912}/D, \quad (10)$$

kde n_1 je koncentrácia neutrálneho vodíka v základnom stave, a D geometrická hrúbka EUV rozšírenia v cm. Vzťah (10) bol odvodený z definície

optickej hrúbky na hrane Lymanovho kontinua vodíka (912 Å). Koncentrácia neutrálneho vodíka na druhej hladine je úmerná kvadrátu hustoty voľných elektrónov (Heinzel a kol. 1994), teda

$$n_e = C \sqrt{n_2}, \quad (11)$$

pričom konštanta C je druhá odmocnina pomeru rýchlosti fotoionizácie z druhej hladiny a rýchlosti žiarivej rekombinácie na túto hladinu. Pre filamenty stanovili Mein a kol. (2001) pre túto konštantu hodnotu $C = 2,6 \times 10^8$. Koncentráciu n_2 neutrálneho vodíka na druhej hladine je možné vypočítať z definície optickej hrúbky $\tau_o(H\alpha)$ v centre čiar $H\alpha$

$$n_2 = 10^2 \tau_o(H\alpha) \Delta\nu_D/D, \quad (12)$$

kde $\Delta\nu_D$ je Dopplerovská šírka čiar $H\alpha$. Použitím vzťahov (9) a (11) je možné vypočítať celkovú koncentráciu vodíka

$$n(\text{H}) = n(\text{HI}) + n_p = n_1 + 2.6 \times 10^8 \sqrt{n_2}. \quad (13)$$

Potom po dosadení zo vzťahov (10) a (12) dostaneme

$$n(\text{H}) \simeq 1.6 \times 10^{17} \tau_{912}/D + 2.6 \times 10^9 \times [\alpha(T) \Delta\nu_D \tau_{912}/D]^{1/2}, \quad (14)$$

kde $\alpha(T)$ je na teplote závislý pomer optickej hrúbky v centre čiary $\text{H}\alpha$ ku optickej hrúbke na hrane Lymanovho kontinua (pozri Appendix v práci (Heinzel a kol. 2001)). Hodnotu $\alpha(T)$ pre teplotu 8000 K môžeme určiť napr. zo závislosti v grafe na Obrázku 2. Za predpokladu, že abundancia hélia voči vodíku je 0,1 a hmotnosť atómu hélia je štvornásobkom hmotnosti vodíka, stĺpcovú hmotnosť M_{col} vypočítame zo vzťahu

$$M_{\text{col}} = 1,4 m_{\text{H}} n(\text{H}) D, \quad (15)$$

kde m_{H} je hmotnosť atómu vodíka v g, $n(\text{H})$ koncentrácia vodíka v cm^{-3} vypočítaná z (14) a D geometrická hrúbka EUV rozšírenia v cm.

Pre hodnoty optickej hrúbky τ_{912} od 1 do 7 sa hmotnosť EUV rozšírenia pohybovala od $5,7 \times 10^{14}$ do $1,8 \times 10^{15}$ g, čo je rádovo porovnateľné s hmotnosťami výtryskov koronálnej hmoty (CME) publikovanými autormi Simnett (2000) a Webb (2000). Hodnoty priemernej hustoty sa pohybovali od $2,3 \times 10^{-15}$ do $8,0 \times 10^{-15}$ g cm^{-3} , čo je podľa očakávania o jeden až tri rády menej než typická hustota plazmy $\text{H}\alpha$ filamentov 2×10^{-14} až 2×10^{-12} g cm^{-3} (Jensen a Wiik 1990).

5. URČENIE TLAKU A TEPLOTY PLAZMY EUV ROZŠÍRENIA MODELOVANÍM PROFILOV VODÍKOVÝCH LYMANOVÝCH SPEKTRÁLNYCH ČIAR

Na určenie tlaku a priebehu teploty v EUV filamente je vhodné použiť pozorovania spektrálnych čiar, pre ktoré je plazma EUV filamentu opticky hrubá. Keďže predpokladáme 90%-né zastúpenie vodíka v plazme EUV filamentu, vhodné sú spektrálne čiary vodíka. Pre nižšie čiary Balmerovej série ($\text{H}\alpha$, $\text{H}\beta$ a $\text{H}\gamma$) je opticky hrubá iba plazma $\text{H}\alpha$ filamentu, EUV rozšírenie je pre ne opticky tenké. Pre EUV príviesok bolo vhodné použiť pozorovania Lymanových čiar vodíka, pre ktoré je opacita plazmy v celom EUV filamente dostatočná na to, aby ovplyvnila ich profil. Čím vyššia čiara Lymanovej série vodíka, tým menší vplyv opacity plazmy EUV rozšírenia, preto sme použili pozorovania nižších čiar Lymanovej série vodíka $\text{L}\beta$ (1026 Å), $\text{L}\delta$ (950 Å), $\text{L}\varepsilon$ (938 Å), $\text{L}6$ (931 Å) a $\text{L}7$ (926 Å). Tieto čiary boli pozorované spektrografom *Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation* (SUMER) (Wilhelm a kol. 1995) na družici SoHO, 15. októbra 1999 v mieste toho istého EUV filamentu, ktorého 3D štruktúru sme určovali. Štrbina tohto spektrografu bola orientovaná smerom juh-sever a prechádzala naprieč EUV filamentom (pozri ľavý vrchný panel

Obrázka 5). Pozorované spektrum je zobrazené na Obrázku 8. Priemerné profily z dvoch úsekov na štrbine označených „EUV-extension section” I a II (ďalej len section I a section II) boli použité na modelovanie tlaku a priebehu teploty v EUV rozšírení. Priemerné profily vodíkových Lymanových čiar zo section I sú na Obrázku 9. Tieto profily boli zosymetrizované, aby bol odstránený vplyv veľkoškálových pohybov plazmy, ktoré sme zatiaľ do modelu nazahrnuli. Priemerné profily zo section II boli podobné tým na Obrázku 9.

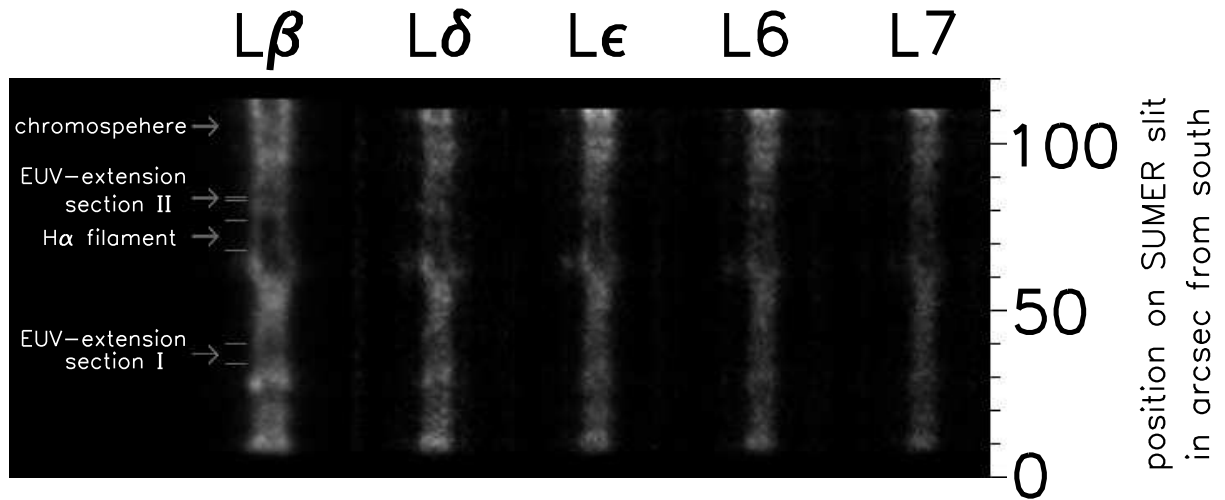
Hľadali sme také hodnoty tlaku a teploty, pre ktoré by sa syntetické profily, vypočítané pomocou modelu Heinzela a kol. (1997), najviac zhodovali s týmito priemernými pozorovanými profilmi. Rozdielnosť medzi syntetickými a pozorovanými profilmi sme charakterizovali funkciou χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(I_i^{\text{obs}} - I_i^{\text{synt}})^2}{\delta I_i^2}, \quad (16)$$

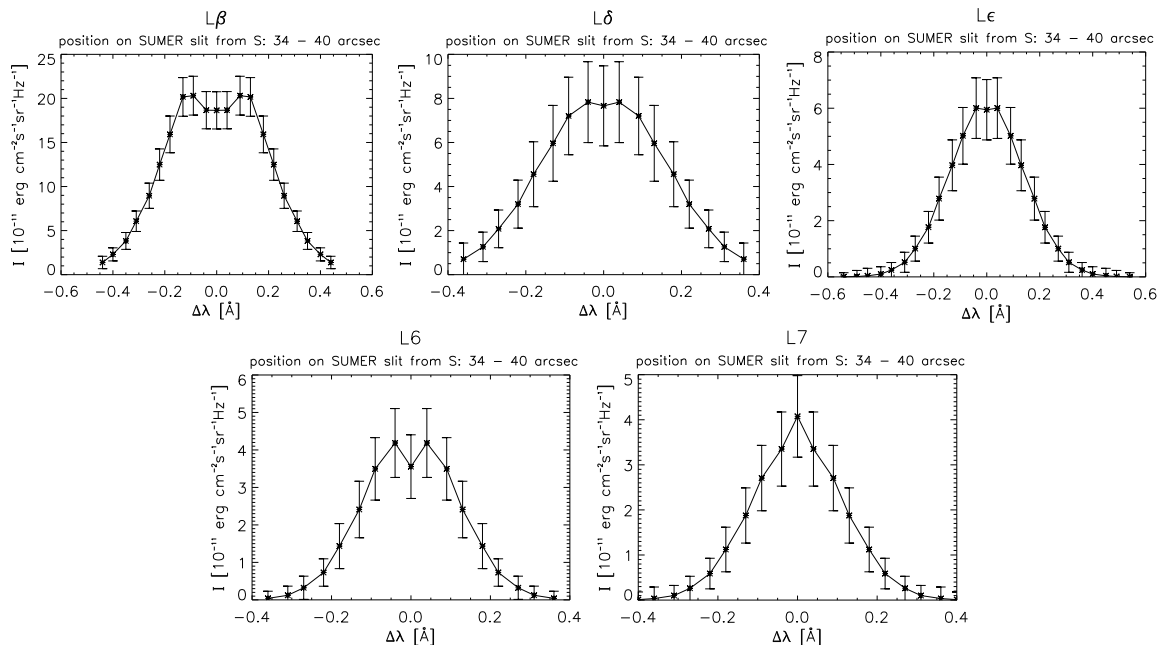
kde I_i^{obs} a I_i^{synt} sú intenzity v jednotlivých vlnových dĺžkach z pozorovaných resp. syntetických profilov všetkých uvažovaných Lymanových čiar vodíka. δI_i sú chyby meraní intenzít (chybové úsečky v profiloch na Obrázku 9).

Model Heinzela a kol (1997) je schematicky znázornený na Obrázku 10. Tento model aproximuje filament ako horizontálnu vrstvu, pričom prenos žiarenia je riešený vo vertikálnom smere. Predpokladáme, že žiarenie Lymanových spektrálnych čiar vodíka dopadá na filament iba zo spodu (z chromosféry). Pre toto žiarenie sme použili priemerné profily z chromosféry v blízkosti EUV filamentu (oblasť označená *chromosphere* na Obrázku 8). Na vrchu a na spodku horizontálnej vrstvy aproximujúcej filament sú dve prechodové oblasti PC-TR (prominence-corona transition region) medzi filamentom a korónou, umiestnené symetricky voči jej centrálnej osi. Aj priebeh teploty s výškou je symetrický voči centrálnej osi. Teplota klesá od okraja filamentu z hodnoty T_s strmo v PC-TR oblastiach, no v blízkosti centra je teplota takmer konštantná a na centrálnej osi horizontálnej vrstvy dosahuje hodnotu T_c . Tlak je rovnaký vo všetkých výškach h v horizontálnej vrstve a rýchlosť mikroturbulencie by nemala byť väčšia než 10 km s^{-1} . Pre geometrickú hrúbku D a výšku h_3 sme použili hodnoty 16 000 km a 20 000 km určené z 3D štruktúry (Obrázok 6). Tieto čísla sú stredné hodnoty z úsekov section I a section II na štrbine spektrografu SUMER (pozri polohu štrbiny na Obrázku 5, úseky na Obrázku 8).

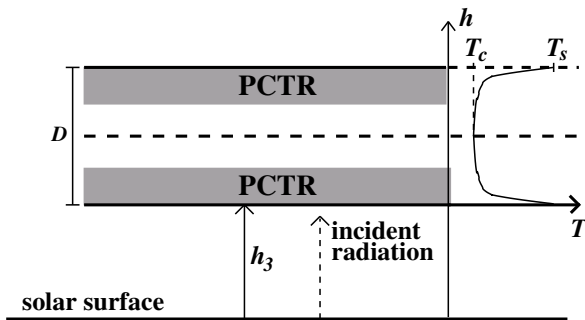
Teploty a tlak, pre ktoré model najlepšie zreprodukoval pozorované profily, sme našli minimalizáciou funkcie χ^2 (vzťah (16)). Pre obidva úseky EUV rozšírenia section I a section II to boli tieto hodnoty (Schwartz a kol. 2004b):



Obrázok 8. Pozorovania Lymanových čiar vodíka spektrografom SoHO/SUMER vykonané 15. októbra 1999 v čase 11:24–11:55 UT. Na zvislej osi je poloha na štrbine v arcsec v smere od juhu. Na ľavo od spektra je vyznačená oblasť H α filamentu s hlbokou samoabsorpciou v centre profilu. Je tu vyznačená aj oblasť „chromosphere”, ktorá je mimo EUV filament, pričom priemerné profily spektrálnych čiar z tejto oblasti sme použili pre žiarenie ožarujúce filament zo spodu. Profily z dvoch oblastí „EUV-extension section” boli použité na určenie tlaku a teploty plazmy EUV rozšírenia.



Obrázok 9. Priemerné profily vodíkových Lymanových čiar z úseku na štrbine označeného EUV-extension section I (pozri Obrázok 8). Na vodorovných osiach je relatívna vlnová dĺžka $\Delta\lambda$ voči stredu danej spektrálnej čiary v Å a na zvislej osi intenzita v $10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$. Profily boli zosymetrizované, aby sa odstránil vplyv blendov a veľkoškálových pohybov plazmy. Šum v krídlach čiar bol redukovaný tak, že bodmi v krídlach čiar bola preložená Gaussova funkcia (podobne ako v práci Stellmachera a kol. (2003)), centrá čiar s prípadnou samoabsorpciou ostali nezmenené.



Obrázok 10. Schéma non-LTE modelu Heinzela a kol. (1997). Tento model bol použitý na určenie tlaku a priebehu teploty v EUV rozšírení. h_3 je výška spodnej hranice EUV rozšírenia a D jeho geometrická hrúbka. Popis ďalších veličín je v texte.

- pomerne nízky tlak plynu okolo 10^{-2} dyn cm $^{-2}$
- teplota T_c na centrálnej osi horizontálnej vrstvy od 2×10^4 do 3×10^4 K
- teplota T_s na okrajoch EUV rozšírenia okolo 10^5 K
- optická hrúbka v centre čiary H α oveľa menšia než 0,1; teda EUV príviesok nemožno pozorovať v čiare H α (pozri časť 2. tejto práce), čo súhlasí s realitou (pozri Obrázok 5).

Pri týchto hodnotách tlaku a teplôt a za predpokladu, že pri takých teplotách je skoro všetok vodík ionizovaný, priemerná hustota v centrálnej osi horizontálnej vrstvy aproximujúcej EUV príviesok bola z invalu 2×10^{-15} až 3×10^{-15} g cm $^{-3}$ (Schwartz a kol. 2004b), čo je porovnateľné s hodnotami určenými len z 3D štruktúry v časti 4. tohoto článku. V prechodových oblastiach PCTR medzi filamentom a korónou bola priemerná hustota nižšia, jej hodnota bola okolo 6×10^{-16} g cm $^{-3}$ (Schwartz a kol. 2004b).

6. ZHRNUTIE A ZÁVER

V tomto článku sme sa venovali EUV filamentom z hľadiska ich prejavov (aké sa nám javia, keď ich pozorujeme) a z hľadiska ich fyzikálnej podstaty (fyzikálne vlastnosti ich plazmy a mechanizmy popisujúce ich prejavy a existenciu).

Dôležitými poznatkami o rozšírení EUV filamentov prezentovanými v tejto práci, ktoré môžu v blízkej budúcnosti vytvoriť reálnejší pohľad na filamentey a procesy s nimi spojené, sú tieto: Rozšírenia EUV filamentov sa nachádzajú vo výškach nad povrchom Slnka porovnateľných s výškou H α filamentu. To podporuje názor, že hmota EUV filamentu naplňuje preliačieniny siločiar magnetického poľa. Tieto preliačieniny vznikajú zakrútením slučiek magnetických trubíc (twisted flux tubes). Na vrchu týchto slučiek vznikajú plytké preliačieniny naplnené hustou a chladnou plazmou H α filamentu.

V okolí týchto plytkých preliačienín vnikajú na týchto slučkách hlbšie preliačieniny naplnené teplejšou a redšou plazmou EUV rozšírenia.

Fakt, že hmotnosti EUV rozšírenia sú porovnateľné s hmotnosťami výtryskov koronálnej hmoty (CME), by mohol vyriešiť problém, odkiaľ sa berie toľko hmoty v CME, keď bol v mieste jej pôvodu pred tým pozorovaný v čiare H α len malý prípadne žiadny filament. Na potvrdenie tohto názoru je však potrebné ešte ďalšie štúdium EUV filamentov v rôznych štádiách ich vývoja (od pokojného štádia až po aktiváciu a následný výtrysk).

V budúcnosti by sme chceli použiť vhodnú optimalizačnú metódu na nájdenie syntetických profilov Lymanových čiar vodíka, ktoré by presnejšie simulovali pozorované profily a tak určiť presnejšie hodnoty tlaku a teploty. Znalosť hodnôt týchto veličín v celom EUV rozšírenia ako priestorovom útvaru by nám umožnila určiť presnejšiu hodnotu jeho hmotnosti. Dobrá znalosť fyzikálnych vlastností plazmy EUV rozšírenia by mohla umožniť aj jednoznačne sa rozhodnúť, ktorá z predstáv o EUV rozšírení je správna, či sa jedná o „parazitické polarity“ alebo o „twisted flux tubes“.

POĎAKOVANIE

SoHO je projekt výskumu Slnka z kozmu v rámci spolupráce ESA a NASA.

Táto práca bola podporovaná z grantov Akadémie vied Českej republiky A3003203 a S-1003006 a z kľúčového projektu K-2043105. B.S., P.H. a P.S. sú členmi projektu European Solar Magnetism Network (ESMN-HPRN-CT-2002-00313), z ktorého bola táto práca tiež podporovaná.

LITERATÚRA

- Anzer, U., Heinzel, P., 2003, A&A, 404, 1139
 Anzer, U., Heinzel, P., 2005, ApJ, v tlači
 Aulanier, G., Schmieder, B., 2002, A&A, 386, 1106
 Chiuderi Drago, F., Alissandrakis, C.E., Bastian, T., Bocchialini, K., Harrison, R.A. 2001, Sol. Phys., 199, 115
 Delaboudinière, J.-P., Artzner, G.E., Brunaud, J. a kol. 1995, Sol. Phys., 162, 291
 Fludra, A., del Zanna, G., Alexander, D., Bromage, B.J.I. 1999, J. Geophys. Res., 104, No. A5, 9709
 Handy, B.N., Acton, L.W., Kankelborg, C.C. a kol. 1999, Sol. Phys., 187, 229
 Harrison, R.A., Sawyer, E.C., Carter, M.K. a kol. 1995, Sol. Phys., 162, 233
 Heinzel, P., Anzer, U., Schmieder, B., 2003a, Sol. Phys., 216, 159
 Heinzel, P., Anzer, U., Schmieder, B., Schwartz, P. 2003b, 'EUV-filaments and their mass loading' in Proceedings of ISCS 2003 Symposium, ed. A. Wilson, ESA SP-535, 447
 Heinzel, P., Gouttebroze, P., Vial, J.-C. 1994, A&A, 292, 656
 Heinzel, P., Schmieder, B., Tziotziou, K., 2001, ApJ, 561, L223
 Heinzel, P., Schmieder, B., Vial, J.-C. 1997, 'NLTE analysis of SUMER filament observations on SoHO' in Proc. of Fifth SOHO workshop, ed. A. Wilson, ESA SP-404, 427
 Jensen, E., Wiik, J.E. 1990, 'Plasma parameters in quiescent prominences' in Dynamics of quiescent prominences, eds. V. Ruždjak and E. Tandberg-Hanssen, Proc. IAU Colloq. 117, 298
 Mein, P., 1991, A&A, 248, 669
 Mein, N., Schmieder, B., DeLuca, E.E., Heinzel, P., Mein, P., Malherbe, J.M., Staiger 2001, ApJ, 556, 438

- Scharmer, G.B., Brown, D.S., Peterson, L., Reben, J. 1985, *Appl. Opt.*, 24, 2558
- Schmahl, E.J., Orrall, F.Q. 1979, *ApJ*, 231, L41
- Schmieder, B., Lin, Y., Heinzel, P., Schwartz, P. 2004, *Sol. Phys.*, 221, 297
- Schmieder, B., Tziotziou, K., Heinzel, P., 2003, *A&A*, 401, 361
- Schwartz, P., Heinzel, P., Anzer, U., Schmieder, B., 2004a, *A&A*, 421, 323
- Schwartz, P., Schmieder, B., Heinzel, P., Anzer, U. 2004b, 'Multiwavelength determination of the density and total mass of the EUV filament observed by SoHO/CDS, SoHO/SUMER and MSDP/VTT' in *Multi-wavelength Investigations of solar activity*, eds. A.V. Stepanov, E.E. Benevolenskaya and A.G. Kosovichev, *Proc. IAU Symp.* 223, v tlači
- Simnett, G.M. 2000, *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.*, 62, 1479
- Stellmacher, G., Wiehr, E., Dammasch, I.E. 2003, *Sol. Phys.*, 217, 133
- Sterling, A.C., Pike, C.D., Mason, H.E., Watanabe, T., Antiochos, S.K. 1999, *ApJ*, 524, 1096
- Webb, D.F. 2000, *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.*, 62, 1415
- Wilhelm, K., Curdt, W., Marsch, E. a kol. 1995, *Sol. Phys.*, 162, 189