

Syntetické spektrá slnečnej erupcie pre plazmu s elektrónovým zväzkom a spätným prúdom

E. Dzifčáková, Astronomický ústav AVČR v.v.i., Ondřejov, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského Bratislava, elena@asu.cas.cz

M. Karlický, Astronomický ústav AVČR v.v.i., Ondřejov, karlicky@asu.cas.cz

Abstrakt

Elektrónový zväzok a spätný prúd ovplyvňujú distribučnú funkciu elektrónov v plazme počas slnečnej erupcie. Pre modelové distribučné funkcie elektrónov, ktoré zahrňujú vplyv elektrónového zväzku a spätného prúdu, a pre modelovú atmosféru boli vypočítané syntetické spektrá v EUV a RTG spektrálnej oblasti. Na základe zmien v charaktere spektier sú diskutované možnosti diagnostiky spätného prúdu z EUV a RTG spektier.

1. ÚVOD

Zväzok urýchlených elektrónov, ktorý vzniká počas erupcie, sa pohybuje od miesta svojho urýchlenia cez korónu a prechodovú oblasť do hustej chromosféry, kde je brzdený a produkuje RTG emisiu. Takýto elektrónový zväzok reprezentuje elektrický prúd, ktorý je neutralizovaný tzv. spätným prúdom. Battaglia a Benz (2008) nedávno podali pozorovací dôkaz existencie spätného prúdu v slnečných erupciách.

Elektrónový zväzok spolu so spätným prúdom modifikujú distribučnú funkciu elektrónov v erupčnej plazme. Zmeny v distribučnej funkcii elektrónov ovplyvňujú ionizačnú a excitačnú rovnováhu a teda aj intenzity spektrálnych čiar tvorených v slnečnej koróne a v prechodovej oblasti, čo by sa malo prejaviť najmä v EUV a RTG oblasti. Táto práca predstavuje prvý pokus o štúdium takýchto efektov.

2. MODEL

Pri výpočtoch boli urobené nasledujúce predpoklady:

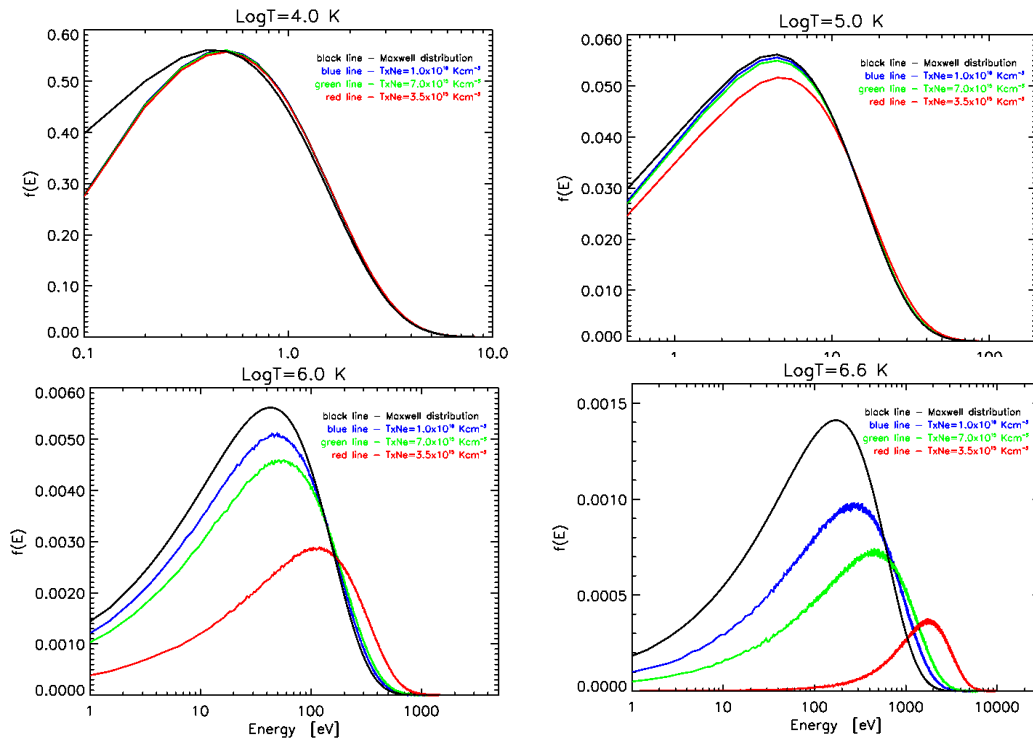
- Ako počiatočný stav bol predpokladaný DEM model atmosféry aktívnej oblasti s konštantným tlakom (Vernazza a Reeves, 1978) prevzatý z CHIANTI. Častice mali Maxwelllovo rozdelenie rýchlostí a teplotou, ktorá odpovedala modelu.
- Monoenergetický zväzok elektrónov s hustotou $2,19 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ a rýchlosťou $1,0 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ (energia elektrónu je 28,4 keV) prechádzal cez korónu a prechodovú oblasť do chromosféry a podĺž svojej dráhy produkoval spätný prúd. Kôli jednoduchosti sme predpokladali monoenergetický zväzok elektrónov, realistickejšiu distribúciu budeme predpokladať v ďalších štúdiách.
- Predpokladali sme, že spätný prúd je tvorený všetkými elektrónmi v plazme s rovnakou driftovou rýchlosťou. Prítomnosť spätného prúdu mení distribučné funkcie elektrónov v súradnicovom systéme spojenom s protónmi a iónmi. Plazmové nestability a vlny boli ignorované.
- Uvažovali sme, že elektrónový zväzok bol prítomný po dostatočne dlhý čas, takže bola dosiahnutá ionizačná a excitačná rovnováha.
- Zanedbávali sme vplyv novej tlakovej nerovnováhy a následných pohybov plazmy.
- Predpokladali sme tri rôzne hodnoty tlaku v atmosfére: $NexT = 3,5 \times 10^{15}$, $7,0 \times 10^{15}$ a $1,0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{K}$.

3. DISTRIBUČNÁ FUNKCIA ELEKTRÓNŮV

V súradnicovej sústave spojennej s protónmi a iónmi je distribučná funkcia elektrónov v dôsledku prítomnosti spätného prúdu posunutá smerom k vyšším energiám a má viac monoenergetický charakter v porovnaní s Maxwellovou distribúciou. Zmeny v tvare distribúcie narastajú s pomerom hustoty elektrónového zväzku k hustote plazmy (**Obr: 1**).

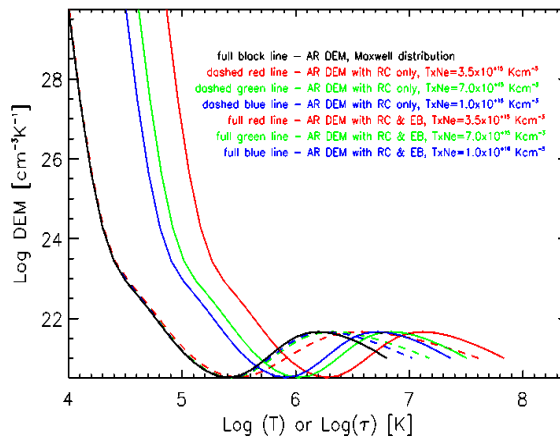
Keďže teplota popisuje len Maxwellovo rozdelenie, na popis netermálnej distribúcie sme použili tzv. pseudo-teplotu, τ , ktorá má ten istý vzťah k strednej energii distribúcie, ako teplota v Maxwellovej distribúcii, teda platí, že

$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} k\tau .$$



Obr. 1. Zmeny v tvare distribučnej funkcie elektrónov spôsobené spätným prúdom v rozličných vrstvách atmosféry pre $N_{eT} = 3,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ K}$ (červená čiara), $7,0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ K}$ (zelená čiara) a $1,0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}$ (modrá čiara). Počiatková teplota v každej vrstve atmosféry je v titulku brázku a Maxwellova distribúcia odpovedajúca tejto teplote je vyznačená čiernou čiarou vo všetkých obrázkoch.

4. ODOZVA ATMOSFÉRY



Obr. 2. Zmeny v slnečnej atmosfére spôsobené iba spätným prúdom (čiarkované čiary) a elektrónovým zväzkom a spätným prúdom spoločne (plné čiary) pre tri rôzne modely atmosféry.. Farebné kódovanie je rovnaké ako na Obr. 1.

Aby sme mohli študovať zmeny spôsobené elektrónovým zväzkom a spätným prúdom v spektre slnečnej atmosféry, použili sme model DEM pre aktívnu oblasť podľa Vernazza & Reeves (1978). Diferenciálna miera emisie (DEM) popisuje príspevok jednotlivých vrstiev atmosféry s danou teplotou k výslednému spektru.

Zmeny v priemernej energii distribúcie spôsobené iba spätným prúdom, ktoré sú veľmi malé v dolnej časti prechodovej oblasti, sa stávajú merateľné v jej hornej časti. Najvýraznejšie zmeny sú v slnečnej koróne, kde pseudoteplota môže dosiahnuť hodnoty, ktoré sú typické pre slnečnú erupciu. Vplyv elektrónového zväzku na spektrum je najväčší v prechodovej oblasti (**Obr. 2**).

5. IONIZAČNÁ A EXCITAČNÁ ROVNOVÁHA

Aproximácie zrážkového prierezu pre ionizáciu a autoionizáciu pre C, N, O, Ne, Mg, Al, Si, S, Ar, Ca, Fe a Ni boli prevzaté z práce Arnaud and Rothenflug (1985). Rýchlosti ionizácie boli získané integráciou zrážkových prierezov cez distribučnú funciu. Do rýchlosti ionizácie bola započítaná aj ionizácia elektrónovým zväzkom.

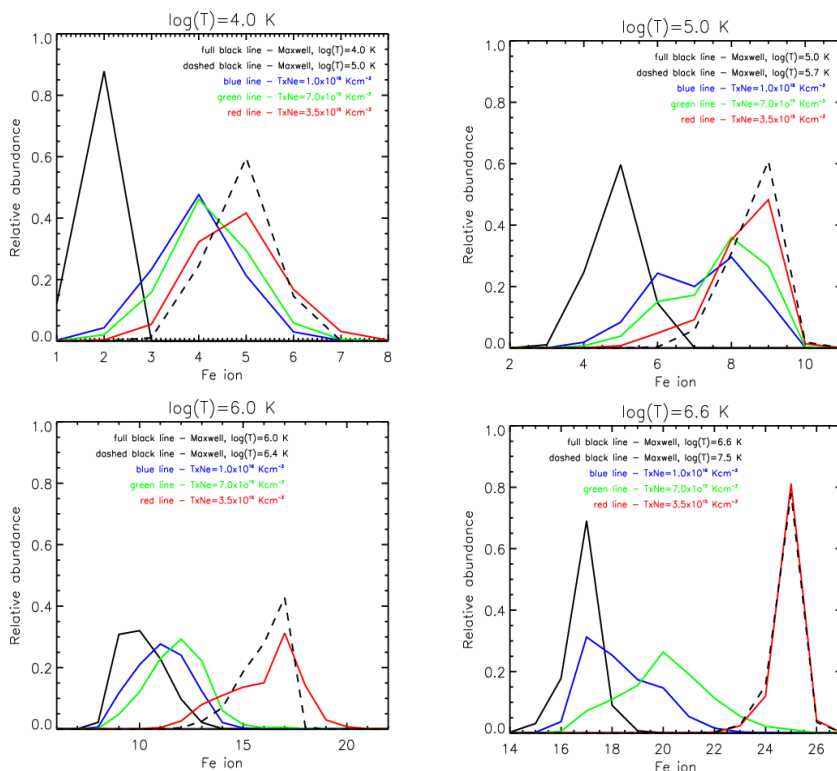
Rýchlosti rekombinácie boli vypočítané technikou, ktorá bola popísaná v práci Dzifčáková (1992). Príspevok elektrónového zväzku k rýchlosti rekombinácie bol zanedbaný.

Príspevok elektrónového zväzku k rýchlosti ionizácie môže byť veľmi dôležitý. Stupeň ionizácie v plazme môže odpovedať podstatne vyššej teplote ako je teplota alebo pseudoteplota plazmy, ak započítame len vplyv spätného prúdu.

Prítomnosť samotného elektrónového zväzku ovplyvňuje ionizačnú rovnováhu najmä v prechodovej oblasti podobným spôsobom ako elektrónová distribúcia so zvýšeným počtom častíc s vysokou energiou: súčasne môžeme pozorovať viac iónov s vysokým relatívnym zastúpením v porovnaní s Maxwellovou distribúciou (**Obr. 3**).

Netepelná distribúcia vznikajúca v plazme koróny v dôsledku prítomnosti spätného prúdu má na ionizačnú rovnováhu opačný vplyv ako elektrónový zväzok. Kombinácia vplyvu spätného prúdu a elektrónového zväzku v koróne spôsobuje, že relatívne zastúpenie iónov v koróne má takmer Maxwellovský charakter.

Pre výpočet syntetických spektier bola použitá originálna modifikácia databázy a softvéru CHIANTI (Dzifčáková, 2006), ktorá umožňuje výpočet excitačnej rovnováhy a syntetických spektier za predpokladu netermálnej distribúcie.



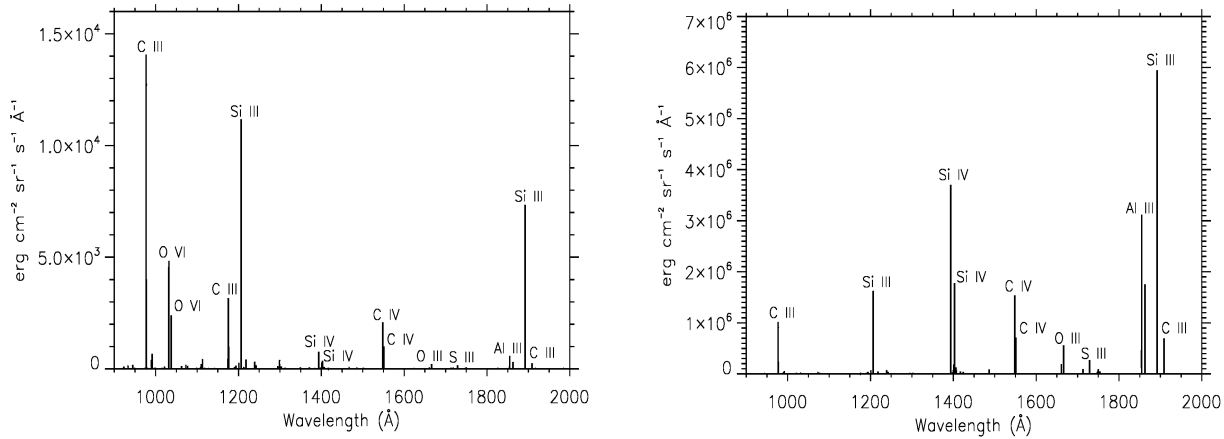
Obr. 3. Zmeny v ionizačnej rovnováhe Fe spôsobené spätným prúdom a elektrónovým zväzkom v rozličných vrstvách atmosféry pre $N_{eT} = 3,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ K}$ (červená čiara), $7,0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ K}$ (zelená čiara) a $1,0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}$ (modrá čiara). Počiatočná teplota v každej vrstve atmosféry je v titulku obrázku a ionizačná rovnováha pre Maxwellovu distribúciu odpovedajúca tejto teplote je vyznačená čiernou čiarou. Čiarkovaná čiara ukazuje abundancie iónov Fe pre Maxwellovu distribúciu s teplotou, pri ktorej má maximum rovnaký ión Fe ako pre netermálnu distribúciu s $N_{eT} = 3,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ K}$.

6. ZMENY V PRECHODOVEJ OBLASTI

Výpočty ukázali, že v prechodovej oblasti sú intenzity EUV čiar ovplyvnené najmä elektrónovým zväzkom. Prítomnosť spätného prúdu, vzhľadom na malú hodnotu driftovej rýchlosti elektrónov, má len malý vplyv na tvar distribučnej funkcie elektrónov a teda aj na výsledné intenzity spektrálnych čiar. Z toho dôvodu spätný prúd nie je možné diagnostikovať v dolnej časti prechodovej oblasti ani v jednom z troch uvažovaných modelov atmosféry. Aj keď zmeny v distribučnej funkcii elektrónov spôsobené spätným prúdom narastajú s výškou

v prechodovej oblasti, nie sme schopní ani v hornej časti prechodovej oblasti oddeliť vplyv spätného prúdu od vplyvu elektrónového zväzku a diagnostkovať ho.

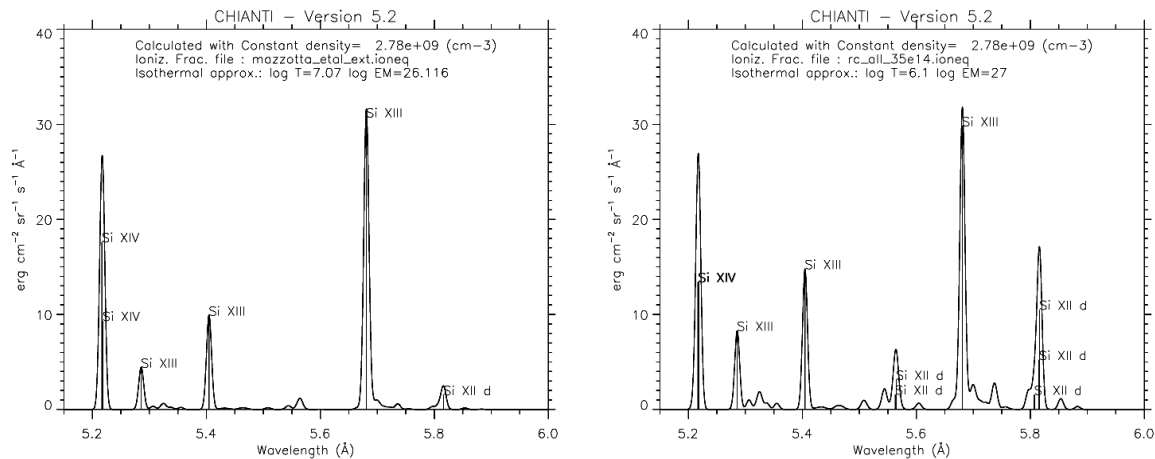
Jedným z najvýraznejších efektov v EUV spektre prechodovej oblasti je nárast intenzít spektrálnych čiar C IV 1548 Å a 1551 Å (**Obr. 4**), a to až o niekoľko rádov. Tieto čiary sú citlivé na prítomnosť magnetického poľa a ich zvýšené intenzity je možné pozorovať v ukotveniach erupčných sučiek (kvázi-separatrixoch) počas erupcie. Podobne výrazný nárast intenzity je možné pozorovať aj v ďalších spektrálnych čiarach: O III, O IV, O V, C III, C IV, Si IV... Ide hlavne o spektrálne čiary v ktorých sú pozorované tzv. blinkre a explozívne javy.



Obr. 4. Intenzity spektrálnych čiar v oblasti 900 - 2000 Å pre DEM aktívnej oblasti (vľavo) a ich nárast spôsobený elektrónovým zväzkom a spätným prúdom pre atmosféru s $NexT = 3,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ K}$ (vpravo).

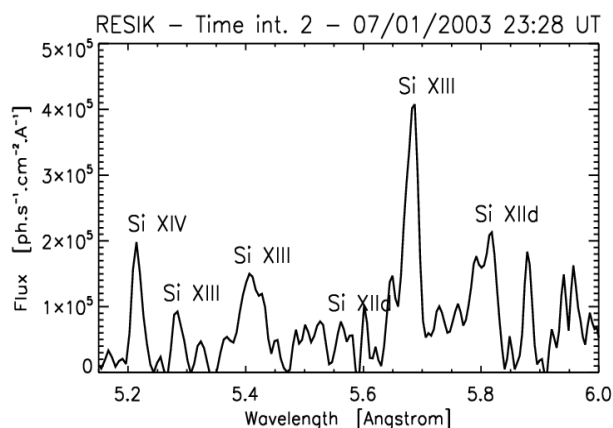
7. ZMENY V SLNEČNEJ KORÓNE

Netermálna distribúcia elektrónov je schopná meniť intenzity satelitných čiar, ktoré vznikajú pri dielektrónovej rekombinácii a je ich možné pozorovať hlavne pri vysokých teplotách. Je potrebné si uvedomiť rozdiel vo formovaní dovolených a satelitných čiar. Intenzita dovolených čiar, ktoré bežne pozorujeme, je integrál súčinu zrážkového prierezu s rýchlosťou elektrónu cez distribučnú funkciu elektrónov od excitačnej energie. Naproti tomu intenzita satelitných čiar, okrem atómových konštánt, závisí priamo na počte elektrónov s energiou odpovedajúcou energii prechodu. Takže satelitné čiary sa javia ako skvelý indikátor tvaru distribučnej funkcie elektrónov, ktorá je ovplyvnená len spätným prúdom. Intenzity dovolených čiar sú naopak citlivé hlavne na prítomnosť elektrónového zväzku.



Obr. 5. Spektrum v oblasti 5.15 - 6.0 Å pre Maxwellovo rozdelenie (vľavo) a spektrum produkované elektrónovým zväzkom a spätným prúdom (vpravo). Nárast intenzít satelitných čiar Si XIII a Si XII d 5.56 Å a 5.82 Å vzhľadom k dovoleným čiarom Si XIII a Si XIV je jasne viditeľný.

Výpočty RTG spektier v koróne ukázali, že silne netermálna distribúcia elektrónov, vznikajúca v slnečnej koróne v dôsledku prítomnosti spätného prúdu, môže výrazne zvýšiť intenzity satelitných čiar (**Obr. 5**). Takéto zvýšenie intenzít satelitných čiar v RTG spektre počas impulznej fázy erupcie je aj skutočne pozorované (**Obr. 6**) a nie je ho možné vysvetliť za predpokladu Maxwellovej distribúcie elektrónov a vhodnej DEM (Dzifčáková a kol., 2008). Môžeme povedať, že ak nami vypočítaný typ netermálnej distribúcie elektrónov je výsledkom prítomnosti spätného prúdu, tak sme schopní spätný prúd v koróne diagnostikovať.



Obr. 6. RTG spektrum erupcie M4.9 zo 7. januára 2003.

8. ZÁVER

Elektrónový zväzok spolu so spätným prúdom menia distribučné funkcie elektrónov a intenzity spektrálnych čiar. Spôsobujú značné zvýšenie intenzít mnohých EUV spektrálnych čiar v prechodovej oblasti, ale v tejto vrstve slnečnej atmosféry nie sme zatiaľ schopní separovať efekt spätného prúdu, ktorý je malý, od efektu elektrónového zväzku, ktorý tam je veľmi výrazný.

Zmeny tvaru distribučnej funkcie elektrónov v slnečnej koróne závisia na počítačovej teplote plazmy a na pomere hustoty elektrónového zväzku k hustote plazmy. Prítomnosť elektrónového zväzku (alebo distribúcie so zvýšeným počtom vysokenergetických častíc) mení pomery intenzít dovolených čiar. Prítomnosť spätného prúdu v slnečnej koróne mení relatívne intenzity satelitných čiar, čo dáva možnosť diagnostikovať ich.

Je potrebné si uvedomiť, že prezentovaný model je veľmi jednoduchý. Reálny zväzok elektrónov nie monoenergetický, v erupčnej plazme dochádza k termalizácii distribúcie častíc a ku mnohým dynamickým efektom. V budúcnosti preto uvažujeme o oveľa realistickejšom modeli interakcie elektrónového zväzku s plazmou.

Podakovanie

Táto práca bola podporovaná VEGA grantom 1/0069/08 vedeckej grantovej agentúry MŠ SR a SAV a grantom IAA300030701 Akadémie vied České republiky. Ďakujeme, že sme mohli použiť dáta a softvér z CHIANTI. CHIANTI je spoločný projekt NRL (USA), RAL (UK), University of Florence (Italy) a University of Cambridge (UK).

LITERATÚRA

- Arnaud, M. a Rothenflug, J.: 1985, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **60**, 425.
 Battaglia, M., Benz, A. O.: 2008, *Astron. Astrophys.*, **487**, 337
 Burgess, A. a Tully, J. A.: 1992, *Astron. Astrophys.*, **254**, 436
 Dzifčáková, E.: 1992, *Solar. Phys.*, **140**, 247.
 Dzifčáková, E.: 2006, *Solar. Phys.*, **234**, 243
 Dzifčáková, E., Kulinová, A., Chifor, C., Mason, H. E., Del Zanna, G., Sylwester, J., Sylwester, B.: 2007, *Astron. Astrophys.*, **488**, 311
 Vernazza, J. E. a Reeves, E. M.: 1978, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **37**, 485
 CHIANTI atomic database,
<http://www.damtp.cam.ac.uk/user/astro/chianti>
 TIPTOPBase, IRON PROJECT,
<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/topbase>