

# Vplyv $\kappa$ -distribúcií a DEM na diagnostiku plazmy

*E. Dzifčáková, Astronomický ústav AV ČR v.v.i., Fričova 298, 251 65 Ondřejov, Česká republika, elena @asu.cas.cz*

## Abstrakt

V práci je analyzovaný vplyv  $\kappa$ -distribúcií a DEM na pozorované pomery intenzít spektrálnych čiar, ktoré sa využívajú pre diagnostické účely v koróne a prechodovej oblasti. Boli vypočítané príspevky k celkovým intenzitám čiar pre rozdielne DEM a pre rozdielne distribučné funkcie elektrónov. Analyzovaný bol efekt tvaru DEM a  $\kappa$ -distribúcií na vybrané pomery intenzít spektrálnych čiar a diskutovaný je ich vplyv na diagnostiku parametrov plazmy.

## 1. ÚVOD

Slnčné žiarenie je pre nás hlavný zdroj informácií o fyzikálnych podmienkach a procesoch prebiehajúcich na Slnku a teda aj v slnečnej koróne a prechodovej oblasti. Aby sme správne interpretovali pozorovania potrebujeme poznať tiež mikrofiziku a teda aj rozdeľovacie funkciu častíc - elektrónov a iónov, ktorá ovplyvňuje zrážkové procesy a teda aj intenzity spektrálnych čiar.

Z pozorovaní je známe, že distribúcie častíc, ktoré pozorujeme v erupciách a slnečnom vetre vykazujú zvýšený počet častíc vo vysokoenergetickej oblasti (vysokoenergetický chvost) v porovnaní s Maxwellovou distribúciou. Napr. Maximovic a kol. (1997) ukázali, že distribúcia rýchlostí častíc v slnečnom vetre je lepšie aproximovateľná  $\kappa$ -distribúciou než súčtom dvoch Maxwellových distribúcií. Collier (2004) ukázal, že ak je priemerná energia častíc konštantná v dynamickom prostredí, tak entropia nie je maximálna pre Maxwellovo rozdelenie ale pre  $\kappa$ -distribúciu. Nedávno Lee a kol. (2012) ukázali, že profily spektrálnych čiar je možné lepšie aproximovať  $\kappa$ -distribúciou než jednou Maxwellovou alebo sumou dvoch Maxwellových distribúcií.

V nehomogénnej plazme je celková intenzita čiar súčtom emisívít plazmy, ktoré sú charakterizované rozdielnymi teplotami a hustotami a ktoré sú váhované cez diferenciálnu mieru emisie (DEM). Za predpokladu Maxwellovského rozdelenia elektrónov sa jednotlivé ióny obvykle vyskytujú iba v úzkej oblasti teplôt, čo umožňuje diagnostiku parametrov plazmy zo spektrálnych čiar pri zjednodušujúcich predpokladoch.

Prítomnosť netermálnych  $\kappa$ -distribúcií elektrónov ale spôsobuje, že ionizačné píky pre jednotlivé ióny sú oveľa širšie v porovnaní s ionizačnými píkami v prípade

Maxwellovskej distribúcie. Pre  $\kappa$ -distribúcie potom platí, že významné príspevky k celkovej intenzite čiar pochádzajú z oveľa širšieho intervalu teplôt (Dzifčáková, 2006).

Práca sa bude zaoberať efektami  $\kappa$ -distribúcií a DEM v prechodovej oblasti a slnečnej koróne.

## 2. K-DISTRIBÚCIA

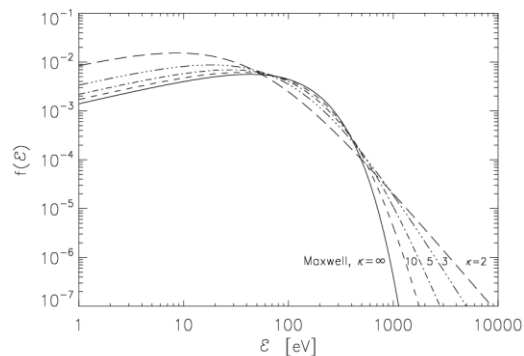
$\kappa$ -distribúcia energií častíc (Obr. 1) je definovaná (napr. Owocki a Scudder, 1983)

$$f(E) = A_{\kappa} \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \left( 1 + \frac{E}{(\kappa - 1.5)kT} \right)^{-(\kappa+1)} E^{1/2},$$

$$\text{kde } A_{\kappa} = \frac{\Gamma(\kappa + 1)}{\Gamma(\kappa - 0.5)(\kappa - 1.5)^{3/2}},$$

pričom  $\langle E \rangle = 3kT/2$ .

Počet častíc vo vysokoenergetickom chvoste je najvyšší pre  $\kappa \rightarrow 1.5$ . S rastom  $\kappa$  klesá odchýlka  $\kappa$ -distribúcie od Maxwellovej. Pre  $\kappa \rightarrow \infty$  platí, že  $\kappa$ -distribúcia prechádza na Maxwellovu.

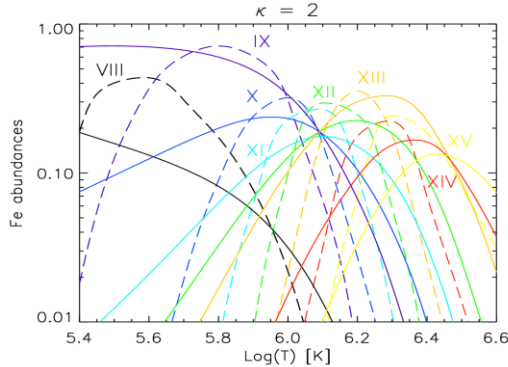


Obr. č. 1: Porovnanie Maxwellovho rozdelenia s  $\kappa$ -distribúciou pre  $\kappa = 2, 3, 5$  a  $10$ .

### 3. IONIZAČNÁ ROVNOVÁHA

Ionizačná rovnováha pre  $\kappa$ -distribúcie bola vypočítaná v prácach Dzifčáková (1992, 2002) a Vanawichian a kol. (2003).

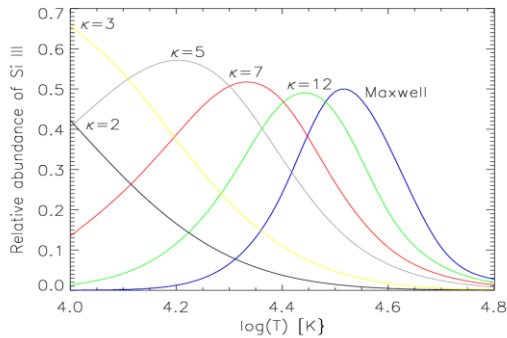
Ako ukazuje obr. 2 a 3, ionizačné píky pre  $\kappa$ -distribúcie sú nižšie a širšie ako pre Maxwellovu distribúciu a maximum je posunuté. Veľkosť zmien rastie s poklesom hodnoty  $\kappa$ . Pre teploty nižšie ako približne  $10^6$  K sa maximum posúva smerom k nižším teplotám a pre vyššie teploty a nízke  $\kappa$  obvykle opačne.



Obr. 2: Ionizačné píky Fe VIII až Fe XV pre Maxwellovu distribúciu (plné čiary) a pre  $\kappa$ -distribúciu s  $\kappa=2$  (čiarkované čiary).

### 4. PRECHODOVÁ OBLASŤ

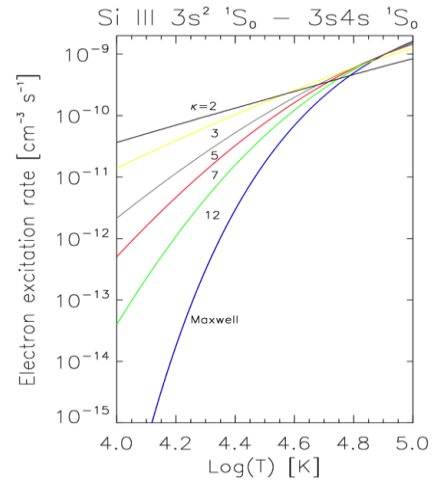
V prechodovej oblasti boli analyzované čiary iónu Si III. V tejto oblasti je ionizačný pík vždy výrazne posunutý smerom k nižším teplotám a tento posun je veľmi citlivý na hodnotu  $\kappa$  (obr. 3).



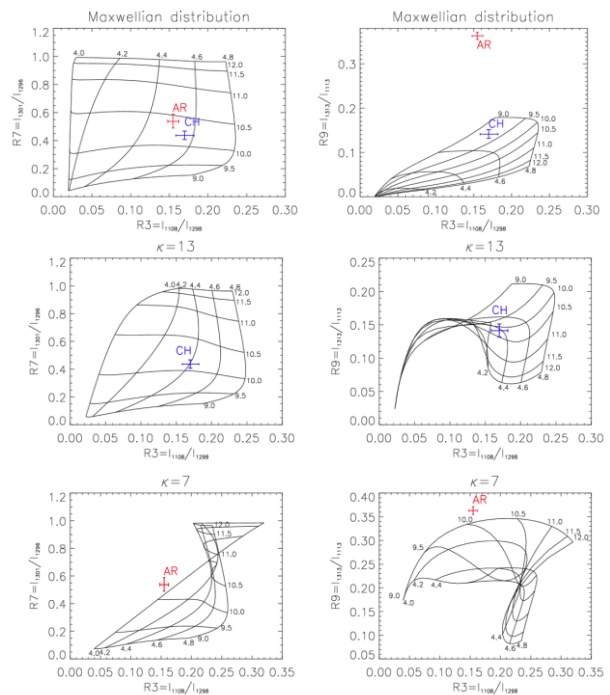
Obr. 3: Ionizačné píky Si III pre Maxwellovu distribúciu (modrá čiara) a pre  $\kappa$ -distribúciu s  $\kappa=12$  (zelená čiara),  $\kappa=7$  (červená čiara),  $\kappa=5$  (sivá čiara),  $\kappa=3$  (žltá čiara) a  $\kappa=2$  (čierna čiara).

Pre výpočet excitačnej rovnováhy a intenzity spektrálnych čiar za predpokladu  $\kappa$ -distribúcie bola použitá vlastná modifikácia softvéru a databázy CHIANTI. Rýchlosti excitácie zrážkami (Obr. 4) a syntetické spektrá boli vypočítané pre Maxwellovu distribúciu a  $\kappa$ -distribúcie s  $\kappa=2 - 34$ , teploty  $10^4$  K -  $10^5$  K, pre elektrónové hustoty  $10^8 - 10^{12}$  cm<sup>-3</sup> a pole žiarenia s radiačnou teplotou  $T_{\text{rad}}=6000$  K a  $r=1.003 R_{\odot}$  (25 000 km). Na diagnostiku distribúcie, teploty a elektrónovej hustoty (Obr. 5) boli použité pozorovania pre aktívnu oblasť (AR), pokojné Slnko (QS) a koronálnu dieru (CH), ktoré boli

publikované v Pinfield a kol. (1999). Rovnaké čiary ako použili Pinfield a kol. (1999) boli použité na diagnostiku parametrov plazmy, vrátane parametra  $\kappa$  (Dzifčáková a Kulinová, 2011).



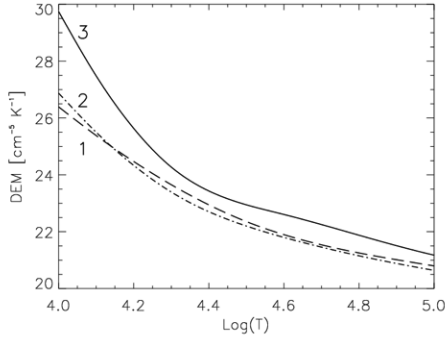
Obr. 4: Zmeny v rýchlosti excitácie  $3s^2 1S_0 - 3s4s 1S_0$  prechodu Si III pre Maxwellovu distribúciu (modrá čiara) a pre  $\kappa$ -distribúciu s  $\kappa=12$  (zelená čiara),  $\kappa=7$  (červená čiara),  $\kappa=5$  (sivá čiara),  $\kappa=3$  (žltá čiara) a  $\kappa=2$  (čierna čiara).



Obr. 5: Teoretické pomery intenzít sčiar Si III a diagnostika parametrov plazmy pre Maxwellovu distribúciu (horný rad) a pre  $\kappa$ -distribúciu s  $\kappa=13$  (stredný rad),  $\kappa=7$  (dolný rad). Červený, resp. modrý krížik označuje pozorovaný pomer intenzít spektrálnych čiar aj s ich chybami pre AR, resp. CH.

Pre Maxwellovu distribúciu ani započítanie vplyvu poľa žiarenia neumožnilo odstrániť nesúhlas pozorovaných pomerov intenzít spektrálnych čiar s teoretickými (Obr. 5, horný rad). Navyše pre AR je pozorovaný pomer intenzít ďaleko mimo teoretický rozsah (Obr. 5 vpravo hore).

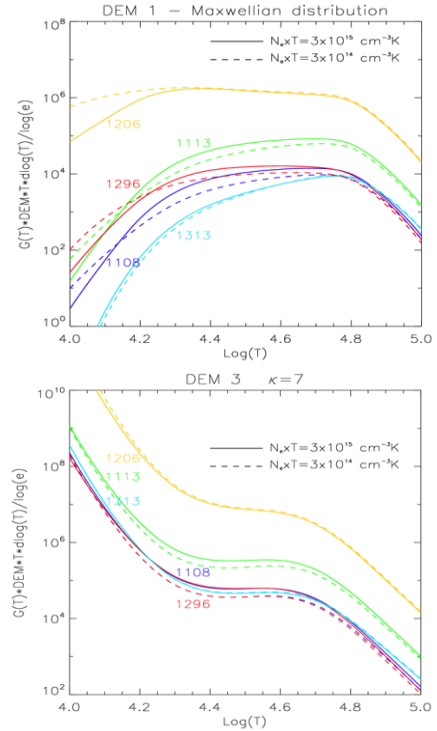
Zosúladiť pozorovania s teóriou sa podarilo až za predpokladu  $\kappa$ -distribúcie elektrónov (Obr. 5, stredný a dolný rad). Pre AR bolo diagnostikované  $\kappa=7$ , pozorovaniam pre QS odpovedalo  $\kappa=11$  a pre CH  $\kappa = 13$ .



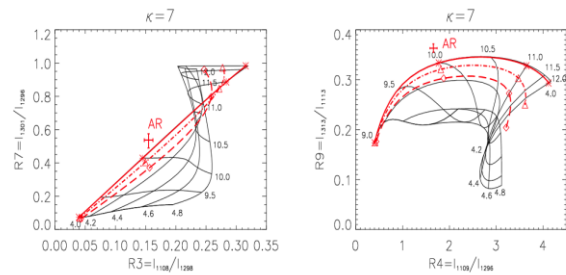
Obr. č. 6: DEM pre 3 typické oblasti na Slnku (CHIANTI).

Diagnostikovaná hodnota parametra  $\kappa$  bola vyššia ako predpovedal Scudder (1992) ale nižšia ako odhadovali MacNeice a kol. (1991). Diagnostikovaná hodnota  $\kappa$  klesá a odchýlka od Maxwella rastie s aktivitou oblasti, najvyššie  $\kappa$  bolo zistené pre CH a najnižšie pre AR. Diagnostikované hustoty elektrónov odpovedajú hustotám obvyklým v prechodovej oblasti, ale teplota pre AR a pre  $\kappa=7$  ( $T=10^4$  K) je príliš nízka. Vysvetlením je zmena v tvare a v posune maxima príspevkovej funkcie pre  $\kappa$  distribúcie v prechodovej oblasti, kde je strmý gradient hustoty a teploty. To nám dobre vyjadruje diferenciálna miera emisie (DEM), Obr. 6, kde sú zobrazené 3 typické DEM publikované v databáze CHIANTI.

Pre tieto 3 typické DEM boli vypočítané príspevkové funkcie intenzity pre spektrálne čiary, ktoré boli použité na diagnostiku parametrov plazmy pre Maxwellovo rozdelenie (Obr. 7, hore) a pre  $\kappa$ -distribúciu s  $\kappa=7$  (Obr.7, dole) pre dve rôzne hodnoty tlaku. Je zrejmé, že pre Maxwellovu distribúciu hlavný príspevok k celkovej intenzite pochádza z oblasti  $\log(T/K)=4.3-4.8$ . Pre  $\kappa$ -distribúcie sa toto maximum posúva k nižším hodnotám a pre  $\kappa=7$  vypočítané maximum príspevkovej funkcie odpovedá  $\log(T/K)=4.0$  (Obr. 7, dole), čo vysvetľuje nízku diagnostikovanú teplotu. K posunu maxima smerom k nízkym teplotám prispieva jednak strmosť DEM a jednak posun maxima abundancie iónu Si III k nízkym T v dôsledku zmien v ionizačnej rovnováhe pre  $\kappa$ -distribúcie (Obr. 3). Pre overenie tohoto výsledku boli vypočítané teoretické pomery intenzít čiar Si III pre DEM 1-3 a pre dva typické tlaky v prechodovej oblasti. Výsledky sú zakreslené v diagnostických obrázkoch pre CH a AR (Obr. 8). Z obrázkov je zrejmé, že bez znalosti DEM môžeme zistiť hodnotu  $\kappa$ , viac-menej dobre diagnostikovať tlak, ale diagnostikovaná teplota závisí na tvare DEM. Obecné platí, že nižšie  $\kappa$  a strmšie DEM v oblasti  $\log(T/K)=4.0-4.8$  má za následok nižšiu diagnostikovanú teplotu, teda DEM a  $\kappa$ -distribúcia majú v tomto prípade podobný efekt.

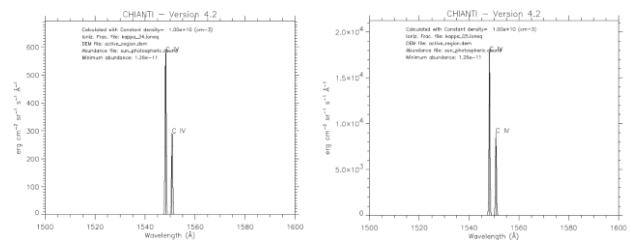


Obr. č. 7: Porovnanie príspevkovej funkcie čiar Si III pre Maxwellovo rozdelenie (hore) a pre  $\kappa$ -distribúciu s  $\kappa=7$  (dole).



Obr. č. 8: Teoretické pomery intenzít čiar Si III pre DEM 1 (čiarkovaná čiara), DEM 2 (bodko-čiarkovaná čiara) a DEM 3 (plná čiara) pre  $\kappa$ -distribúciu s  $\kappa=7$ .

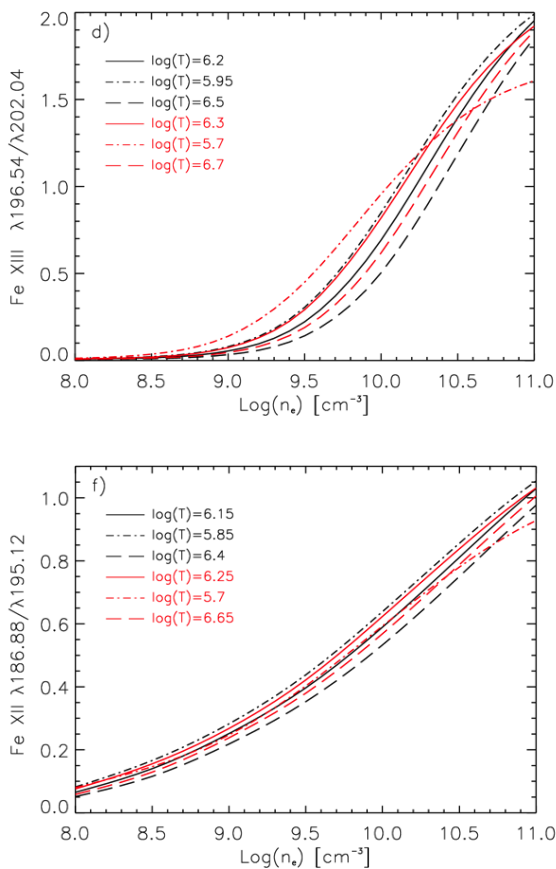
Posun abundančného piky k nižším teplotám pre  $\kappa$ -distribúcie spolu so strmým poklesom DEM v prechodovej oblasti môžu mať za následok extrémne zvýšenie intenzít niektorých spektrálnych čiar, napr. C IV 155 nm (Obr. 9). Intenzita týchto čiar býva obvykle vysoká v prítomnosti magnetického poľa.



Obr. č. 9: Nárast intenzity čiar C IV prechodovej oblasti takmer o dva rády pre  $\kappa$ -distribúcie s  $\kappa = 5$  pre DEM 3.

## 5. KORÓNA

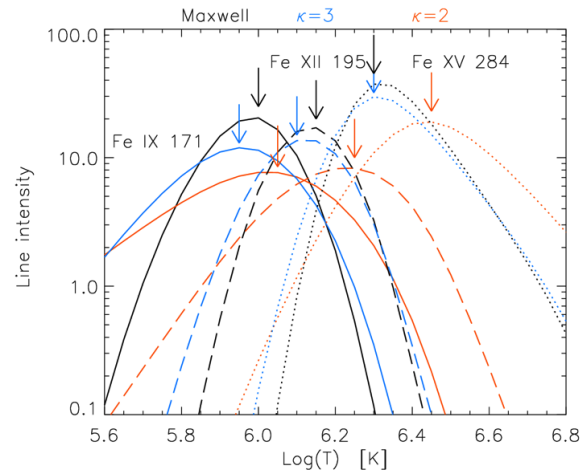
Skôr než začneme analyzovať vplyv  $\kappa$ -distribúcií a DEM na pozorovanú emisiu, potrebujeme poznať vplyv  $\kappa$ -distribúcií na diagnostiku hustoty. Obr. č. 10 ukazuje dva príklady porovnania diagnostického diagramu pre hustotu elektrónov v prípade Maxwellovej distribúcie (čierne čiary) a pre  $\kappa$ -distribúciu s  $\kappa=2$  (červené čiary). Je zrejmé, že nepresnosti v určení hustoty v dôsledku neznalosti distribučnej funkcie elektrónov sú podobné ako nepresnosti v dôsledku neznalosti teploty emitujúcich koronálnych štruktúr, takže majú len malý vplyv na diagnostikovanú hustotu. Pre  $\kappa$ -distribúcie sú hustoty elektrónov vždy o niečo nižšie ako pre Maxwellovo rozdelenie.



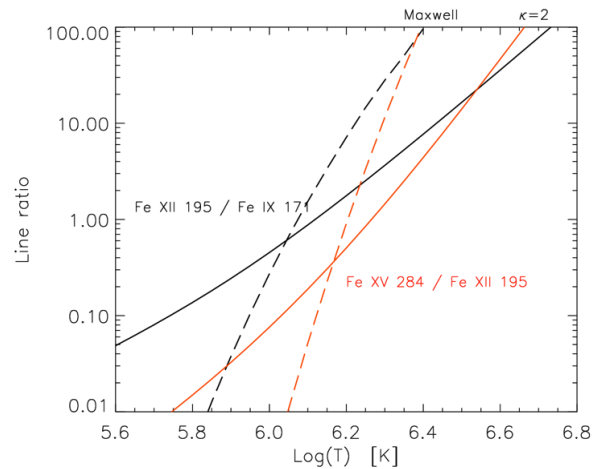
**Obr. č. 10:** Efekt  $\kappa$ -distribúcie na diagnostiku hustoty. Plné čiary odpovedajú pomerom čiar pri teplote, pri ktorej daný ión má najvyššiu emisivitu a čiarkované, resp. bodko-čiarkované čiary odpovedajú teplotám, pre ktoré emisivita klesne na 1/100 maximálnej hodnoty.

Prítomnosť  $\kappa$ -distribúcie spôsobuje, že maximá emisivity spektrálnych čiar sú posunuté voči maximám pri Maxwellovej distribúcii. Navyše čiara má vysokú emisivitu v širšom intervale teplôt v porovnaní s Maxwellom (Obr. 11). Je to spôsobené hlavne rozšírením ionizačných píkov pre  $\kappa$ -distribúcie a ich posunom voči Maxwellovej distribúcie. Oba tieto efekty sa premietajú aj do diagnostiky teploty z pomerov intenzít čiar patriacich rozličným iónom. Napr. rovnakému pomeru intenzít čiar

Fe XII 195 Å / Fe IX 171 Å alebo Fe XV 248 Å / Fe XII 195 Å odpovedá pre Maxwellovu distribúciu iná teplota ako v prípade  $\kappa$ -distribúcie (Obr. 12).



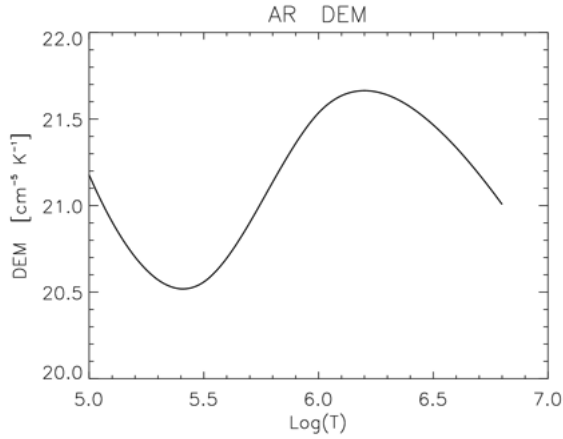
**Obr. č. 11:** Efekt  $\kappa$ -distribúcie na intenzity spektrálnych čiar v koróne. Čierne čiary odovedia Maxwellovmu rozdeleniu, modré  $\kappa$ -distribúcií s  $\kappa=3$  a červené  $\kappa$ -distribúcií s  $\kappa=2$ . Plné čiary sú pre Fe IX 171 Å, čiarkované pre Fe XII 195 Å a bodkované pre Fe XV 284 Å.



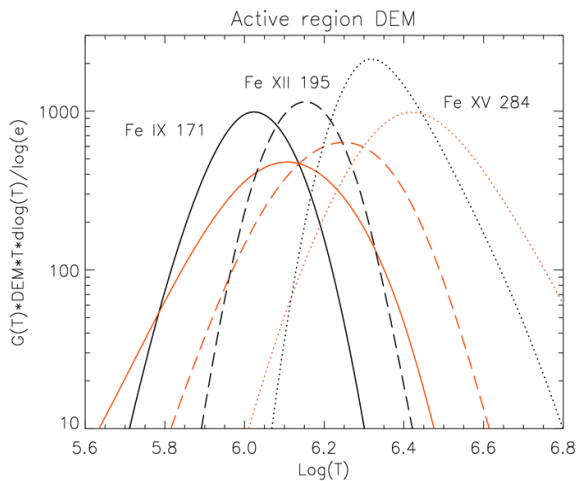
**Obr. č. 12:** Efekt  $\kappa$ -distribúcie s  $\kappa=2$  (plné čiary) na diagnostiku teploty z pomerov intenzít čiar Fe XII 195 Å / Fe IX 171 Å (čierne čiary) a Fe XV 248 Å / Fe XII 195 Å (červené čiary). Pomer intenzít pre Maxwellovo rozdelenie sú vyznačené čiarkovanými čiarami.

Vplyv DEM na intenzity čiar v koróne bol analyzovaný pre DEM aktívnej oblasti z CHIANTI databázy (Obr. 13). V oblasti koronálnych teplôt je toto DEM veľmi široké. Príspevkové funkcie pre čiar Fe IX 171 Å, Fe XII 195 Å alebo Fe XV 248 Å (Obr. 14) majú veľmi podobný tvar ako závislosť intenzít na teplote pre tieto čiar (porovnaj s Obr. 11). Takéto široké DEM nemení polohu maxima príspevku k čiarovej intenzite a posun tejto polohy voči polohu maxima pre Maxwellovu distribúciu je v súlade s posunom ionizačného píku pre  $\kappa$ -distribúcie. Tento posun je smerom k nižším teplotám pre vyššie  $\kappa$  a smerom k

vyšším teplotám pre  $\kappa \sim 2$  (Obr. 11). Polohu maxima príspevku k čiarovej intenzite je schopné zmeniť iba veľmi úzke DEM. Tento fakt, že široké DEM nemení polohu maxima ionizačného píku je možné využiť diagnosticky.

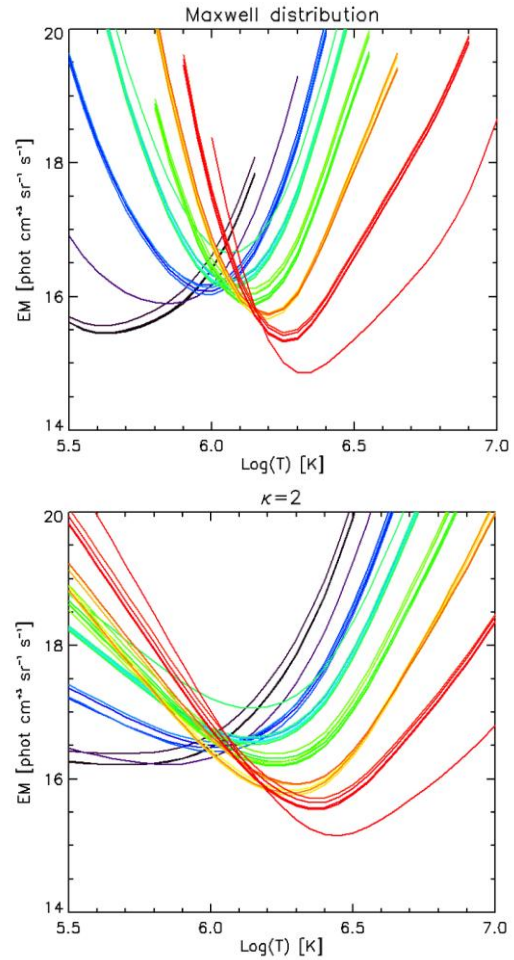


Obr. č. 13: Závislosť DEM pre aktívnu oblasť (CHIANTI) na teplote.



Obr. č. 14: Príspevkové funkcie k intenzite spektrálnej čiar pre Fe IX 171 Å (plné čiary), Fe XII 195 Å (čiarkované čiary) a Fe XV 284 Å (bodkované čiary) pre Maxwellovu distribúciu (čierné čiary) a  $\kappa$ -distribúciu s  $\kappa=2$  (červené čiary).

Rozšírenie abundančného píku pre  $\kappa$ -distribúcie má za následok, že čiary ľubovoľného iónu je možné pozorovať v oveľa širšom intervale teplôt ako pre Maxwellovo rozdelenie. Takže to isté pozorované spektrum je možné za predpokladu Maxwellovho rozdelenia interpretovať ako emisiu z multitermálnej plazmy s relatívne úzkou DEM alebo za predpokladu  $\kappa$ -distribúcie s  $\kappa=2$  ako emisiu takmer izotermálnej plazmy s  $\log(T/K) \sim 6.0$ , pretože pre  $\kappa$ -distribúciu sa všetky krivky v EM-loci diagrame pretínajú takmer v jednom bode (Obr. 15). Z toho môžeme usudzovať, že prítomnosť úzkej DEM má na emisiu rovnaký vplyv ako prítomnosť  $\kappa$ -distribúcií, resp. izotermálnu plazmu s  $\kappa$ -distribúciou elektrónov je možné interpretovať ako multitermálnu plazmu s Maxwellovou distribúciou.



Obr. č. 15: Závislosť miery emisie na teplote pre pozorované intenzity spektrálnych čiar kľudného Slnka pre Maxwellovo rozdelenie (hore) a pre  $\kappa$ -distribúciu s  $\kappa=2$  (dole).

## 6. ZÁVER

Ukázali sme, že v prechodovej oblasti je  $\kappa$ -distribúcia schopná vysvetliť pozorované intenzity spektrálnych čiar Si III, pričom vyššej aktivity oblasti odpovedá väčšia odchýlka distribúcie od Maxwellovej. Gradient hustoty a teploty v prechodovej oblasti nemá vplyv na diagnostikovanú hodnotu  $\kappa$ . Tvar DEM mení diagnostikovanú teplotu a hustotu, ale súčin teploty a hustoty, resp. tlak je pravdepodobne určený korektné. Strmý pokles DEM spolu s  $\kappa$ -distribúciou môžu v prechodovej oblasti zvyšovať intenzity čiar až o niekoľko rádov.

Ak je v koróne pozorovaný posun teplotného maxima emisie spektrálnych čiar, tak je najpravdepodobnejšie spôsobený zmenami v ionizačnej rovnováhe, a teda napr. prítomnosťou  $\kappa$ -distribúcie. To platí aj pre multitermálnu plazmu s DEM, samozrejme iba vtedy, ak toto DEM nie je úzky pík.  $\kappa$ -distribúcia rovnako ako aj DEM spôsobuje, že súčasne môžu byť pozorované atómy v mnohých stupňoch ionizácie a emisie pre  $\kappa$ -distribúciu s konštantnou teplotou môže byť interpretovaná ako emisie plazmy s Maxwellovým rozdelením a vhodnou DEM.



### ***Pod'akovanie***

Táto práca bola realizovaná vďaka podpore grantu GAČR P209/12/1652 a projektu Česko-Slovenskej dvojstrannej spolupráce 7AMB12SK154 (CZ-SK-0153-11).

### **LITERATÚRA**

- Collier, M.R.: 1993, Geophys. Res. Lett. 20, 1531  
Dzifčáková E.: 1992, Solar Phys. 140, 247  
Dzifčáková E.: 2002, Solar Phys. 208, 91  
Dzifčáková E.: 2006, Solar Phys. 234, 243  
Dzifčáková E., Kulinová, A.: 2011, AA, 531, A122  
Lee, E., Williams, D., Lapenta, G.: 2012, zaslané do Astron. Astrophys.  
MacNeice, P., Fontenla, J., Ljepojevic, N. N.: 1991, ApJ 369, 544  
Maksimovic, M., Pierrard, V., Riley, P.: 1997, Geophys. Res. Lett. 24, 1151  
Owocí, S. P. and Scudder, J. D.: 1983 ApJ 270, 758  
Pinfield, D. J., Keenan, F. P., Mathioudakis, M., Phillips, K. J. H., Curdt, W., Wilhelm, K.: 1999, ApJ 527, 1000  
Scudder, J. D.: 1992, ApJ 398, 349  
Wannawichian, S., Ru\_olo, D., Kartavykh, Yu. Yu.: 2003, ApJS 146, 443