

# RTG diagnostika netepelnej distribúcie elektrónov v koróne počas erupcie

E. Dzifčáková, *Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského Bratislava, dzifcakova @fmph.uniba.sk*

A. Kulinová, *Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského, Bratislava, kulinova @fmph.uniba.sk*

## Abstrakt

Spektrá pozorované počas impulznej fázy erupcie je obvykle ťažké vysvetliť na základe predpokladu Maxwellovho rozdelenia elektrónov. Neobvyklé pomery spektrálnych čiar indikujú prítomnosť netepelných distribúcií. V tomto príspevku prezentujeme diagnostiku tvaru elektrónovej distribúcie zo spektier jednej erupcie pozorovanej RTG spektrografom RESIK. Na diagnostiku sme použili jednu satelitnú čiaru a dovolené čiaru iónov rôznych stupňoch ionizácie. Diagnostická metóda bola použitá na RTG spektrá získané v priebehu celej erupcie.

## 1. ÚVOD

Power distribúciu, rozdelenie elektrónov s vyšším a užším píkcom ako má Maxwellovo rozdelenie, môžeme pozorovať vtedy, keď dochádza dodávaniu energie do oblasti chvosta Maxwellovho rozdelenia oveľa rýchlejšie ako prebieha termalizácia. Magnetické pole zvyšuje možnosť vzniku netepelnej distribúcie, pretože bráni disipačnému procesu. Power distribúcia elektrónov môže existovať niekoľko minút počas počiatkovej fázy erupcie a odchýlka od Maxwellovho rozdelenia môže byť značná.

Netepelné distribúcie elektrónov samozrejme ovplyvňujú ionizačnú a excitačnú rovnováhu. Tento fakt vedie k zmenám v pomeroch intenzít spektrálnych čiar, a tak umožňuje diagnostikovať tvar netepelnej distribúcie.

## 2. POWER DISTRIBÚCIA

Voľné elektróny môžu mať power distribúciu charakterizovanú dvoma parametrami  $n$  a  $T$ :

$$f(E)dE = B^n \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{E}{kT} \right)^{\frac{(n-1)}{2}} E^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E}{kT}} dE,$$

kde  $B^n$  je konštanta distribúcie. Stredná energie power distribúcie je  $E=(n+2) \cdot kT/2$ . V prípade tejto distribúcie

stredná energia závisí na parametroch  $n$  a  $T$ . Preto zavádzame pseudo-teplotu  $\tau$ , čo je vlastne teplota Maxwellovho rozdelenia, ktoré má rovnakú strednú energiu ako má daná power distribúcia:  $\tau = (n+2) \cdot T/3$ .

## 3. DIAGNOSTIKA

Spektrálne čiar, ktoré sú vhodné na diagnostiku, musia mať dostatočne vysoké intenzity na to, aby mohli byť zmerané a zmeny ich intenzít v dôsledku zmeny tvaru distribučnej funkcie voľných elektrónov musia byť väčšie ako chyby v určení intenzít týchto čiar.

Na diagnostiku boli vybrané 3 čiar Si pozorované v oblasti mäkkého RTG žiarenia medzi 5 - 6 Å:

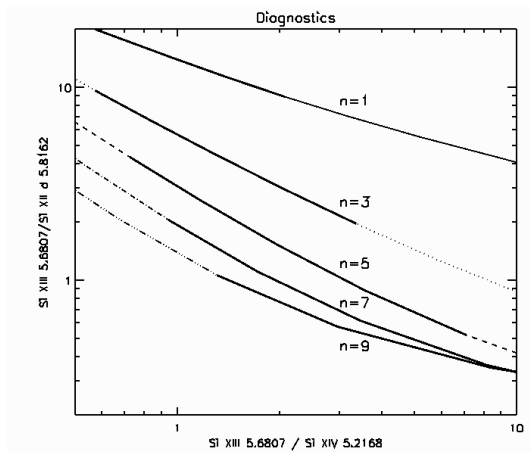
5.2168 Å Si XIV 1s2 S1/2 - 3p 2P3/2

5.6807 Å Si XIII 1s2 1S0 - 1s 3p 1P1

5.8162 Å Si XII d 1s2 2p 2P3/2 - 1s 2p (3P) 3p 2D5/2

Všetky tri čiar sú však blendované. Intenzity blendov boli preto pripočítané k intenzitám najsilnejších čiar.

Teoretický pomer čiar Si XIII/Si XIV (obr. 1) klesá s rastúcim  $n$ . Pre väčšie odchýlky od Maxwellovho rozdelenia, teda pre vyššie  $n$ , dochádza k zvýšeniu intenzity satelitných čiar Si XII d a ich príspevku k intenzite spektrálnej čiar Si XIII 5.68 Å pre nižšie  $\tau$ . Dôsledkom toho je priblíženie sa závislosti zobrazených pomerov čiar pre power distribúcie stupňa  $n=7$  a  $n=9$  v oblasti nízkeho  $\tau$ .



Obrázok 1. Závislosť pomerov Si XIII 5.6807 Å / Si XIV 5.2168 Å a Si XIII 5.6807 Å / Si XII d 5.8162 Å pre rôzne stupne power distribúcie (parameter  $n=1, 3, 5$  a  $9$ ). Hrube vyznačená časť čiar zodpovedá intervalu  $\log \tau \in <7.0; 7.2>$ .

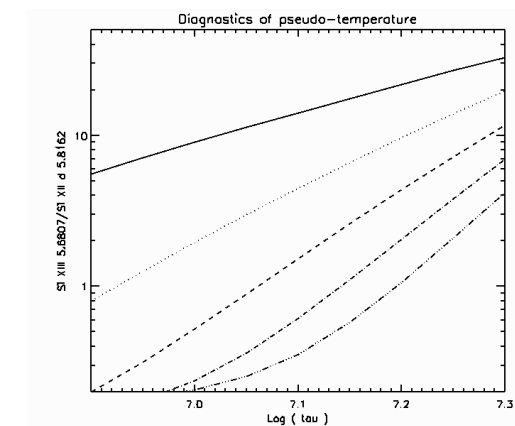
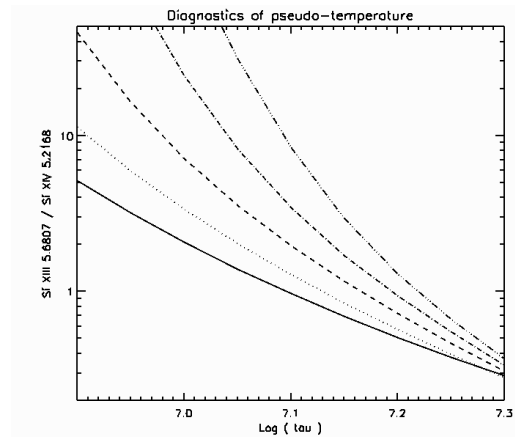
Ak poznáme parameter  $n$  môžeme z teoretických závislostí pomerov intenzít spektrálnych čiar na  $\tau$  odhadnúť hodnotu strednej energie distribúcie (obr. 2).

#### 4. DÁTA

Na diagnostiku tvaru distribučnej funkcie sme použili spektrá erupcie triedy C8.1 pozorovanej RTG spektrogramom RESIK (Sylwester a kol., 2005). Erupcia bola pozorovaná 21 januára 2003. Spektrá boli snímané v časovom intervale 02:20:30 - 02:35:38 UT. Erupcia dosiahla maximum o 02:28 UT.

Dáta obsahovali absolútne RTG spektrá zo 4 spektrálnych kanálov v rozsahu 3 - 6 Å a pokryli priebeh celej erupcie. Použili sme všetkých 47 spektier zo 4. kanálu, ktorý pokrýva úsek spektra približne od 4.9 do 6.2 Å. Na tomto úseku spektra dominujú čiary Si XII d - Si XIV. Pred ďalším spracovaním spektier sme od nich odčítali kontinuum.

Na výpočet syntetických spektier sme použili špecifickú modifikáciu softvéru a databáz CHIANTI, ktorú vytvorila Dr. Dzifčáková. Nová databáza obsahuje súbory s ionizačnou rovnováhou spočítanou pre power distribúcie s rôznym stupňom  $n$  odchýlky od Maxwellovho rozdelenia. Modifikácia softvéru ďalej umožňuje výpočet excitačnej rovnováhy pre rôzne stupne power distribúcie a zahŕňa aj výpočet satelitných čiar.



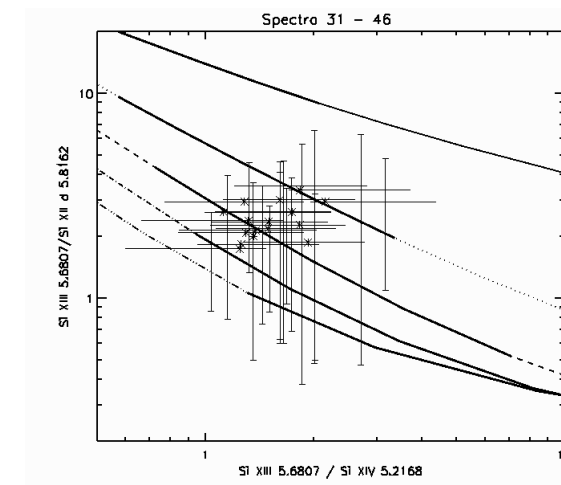
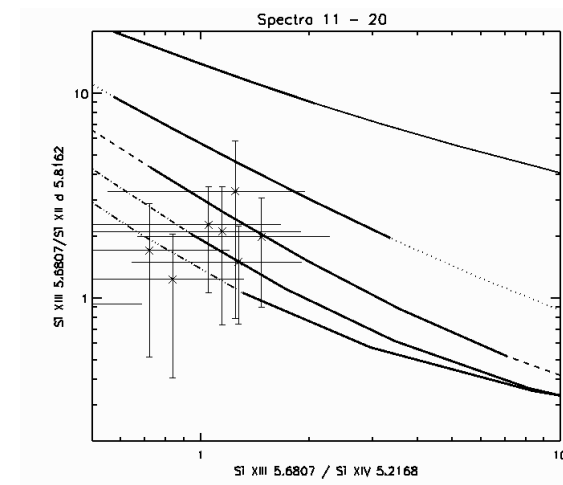
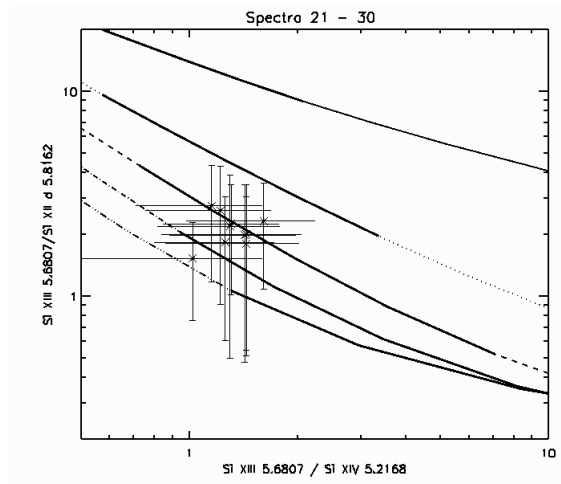
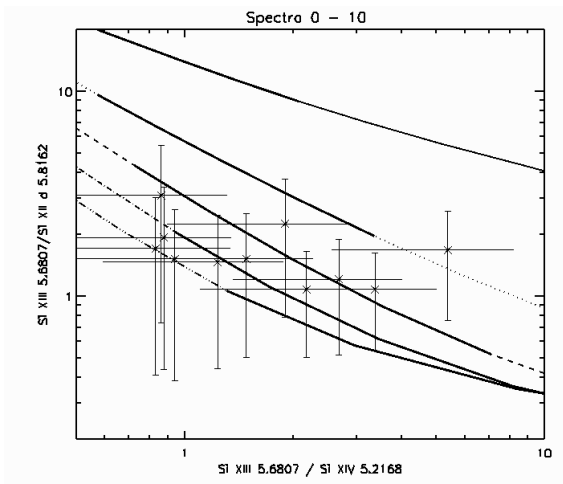
Obrázok 2. Pomer Si XIII 5.6807 Å / Si XIV 5.2168 Å (hore) a pomer Si XIII 5.6807 Å / Si XII d 5.8162 Å (dolu) ako funkcia  $\tau$  pre Maxwellovo rozdelenie ( $n=1$ , plná čiara) a power distribúcie s  $n=3$  (bodkovaná čiara),  $n=5$  (čiarkovaná čiara),  $n=7$  (bodko-čiarkovaná čiara) a  $n=9$  (bodko-bodko-čiarkovaná čiara).

#### 5. POROVNANIE VÝSLEDKOV S DÁTAMI

Kvôli prehľadnosti meraní sme rozdělili spektrá do štyroch skupín (obr. 3a, b). Na obrázku 3a je vidno, že na začiatku erupcie sa hodnota parametra  $n$  nachádzala v intervale 5-9. Po maxime erupcie sa posunula k nižším hodnotám 3-7 (obr. 3b) čo znamená násup termalizácie plazmy.

##### 5.1 PRIEMERNÉ SPEKTRÁ

Z hľadiska časového priebehu erupcie sme sa rozhodli rozděliť spektrá do 5 skupín a urobiť z nich priemerné spektrá:



**Obrázok 3a.** Merania pomerov čiar z časového intervalu 02:20:30 – 02:26:40 UT (spektrá č. 0-10), 02:26:48-02:27:42 UT (spektrá č.11-20). Dáta sú zobrazené aj s chybami.

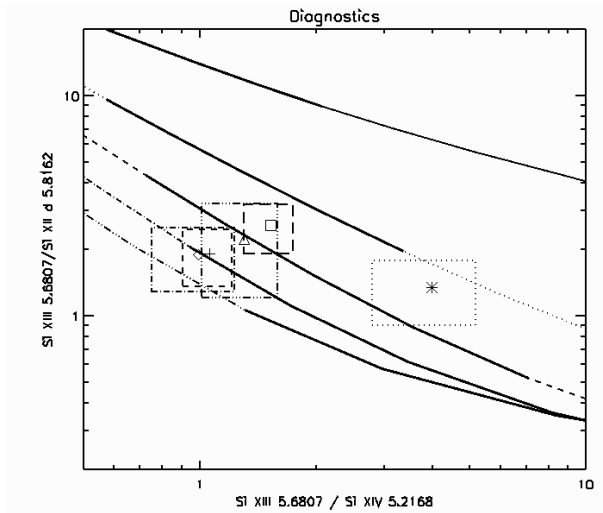
- priemerné spektrum 1 zodpovedá časovému intervalu 02:20:30 – 02:23:34 UT,
- priemerné spektrum 2 zodpovedá časovému intervalu 02:25:04 - 02:26:40 UT,
- priemerné spektrum 3 zodpovedá časovému intervalu 02:26:48 – 02:27:42 UT,
- priemerné spektrum 4 zodpovedá časovému intervalu 02:27:48 – 02:29:30 UT,
- priemerné spektrum 5 zodpovedá časovému intervalu 02:29:42 – 02:35:38 UT.

Výsledky meraní pomerov spektrálnych čiar zo spriemerovaných spektier sú na obrázku 4. Symboly ako hviezdička, krížik, atď. reprezentujú jednotlivé priemerné spektrá. Vidno, že v počiatočnej fáze erupcie narastá nielen odchýlka od maxwelloho rozdelenia ( $n \sim 7$ ), ale aj pseudoteplota  $\tau$  a po maxime sa parameter  $n$  opäť posúva k nižším hodnotám  $n \sim 4$ .

**Obrázok 3b.** Merania pomerov čiar z časového intervalu 02:27:48 - 02:29:30 UT (spektrá č. 21-30) a 02:29:42 - 02:35:38 UT (spektrá č. 31-46). Dáta sú zobrazené aj s chybami.

## 6. POROVNANIE SO SYNTETICKÝM SPEKTROM

Na obrázku 5 je ukážka porovnania meraného priemerného spektra 4 s vypočítaným syntetickým spektrom pre parameter pre  $n=5$  a  $\log(\tau)=7.14$  s  $fwhm=0.02$  Å. Relatívna intenzita spektrálnych čiar použitých na diagnostiku v syntetickom spektre veľmi dobre zodpovedá nameraným hodnotám intenzít. Napriek tomu vypočítaná intenzita čiar Si XIII v oblasti 5.25 – 5.45 Å nezodpovedá pozorovaniu. Tento nesúhlas medzi pozorovaniami a syntetickými spektrami sme zistili aj pre Maxwellovo rozdelenie. Môže to byť spôsobené prítomnosťou veľkého množstva neznámych spektrálnych čiar, ktorých atómové dáta sa nenachádzajú v databáze CHIANTI.



Obrázok 4. Pomery čiar zo spriemerovaných spektier: č. 0 - 2 (hviezdička, chyby - bodkovaný obdĺžnik), č. 3 - 10 (krížik, chyby - čiarkovaný obdĺžnik), č. 11 - 20 (kosoštvorec, chyby - bodko-čiarkovaný obdĺžnik), č. 21 - 30 (trojuholník, chyby - bodko-bodko-bodko-čiarkovaný obdĺžnik) a č. 31 - 46 (štvorec, chyby - obdĺžnik s dlhými čiarkami).

## 7. ZÁVER

Na začiatku erupcie stredná hodnota energie distribúcie rastie s odchýlkou distribúcie od Maxwellovho rozdelenia.

K termalizácii erupčnej plazmy začalo dochádzať približne po jej maxime.

Parameter  $n$  power distribúcie môže dosiahnuť hodnotu 7 a viac počas počiatočnej fázy erupcie a taktiež  $\tau$  môže dosahovať hodnoty nad  $1.6 \times 10^7$  K.

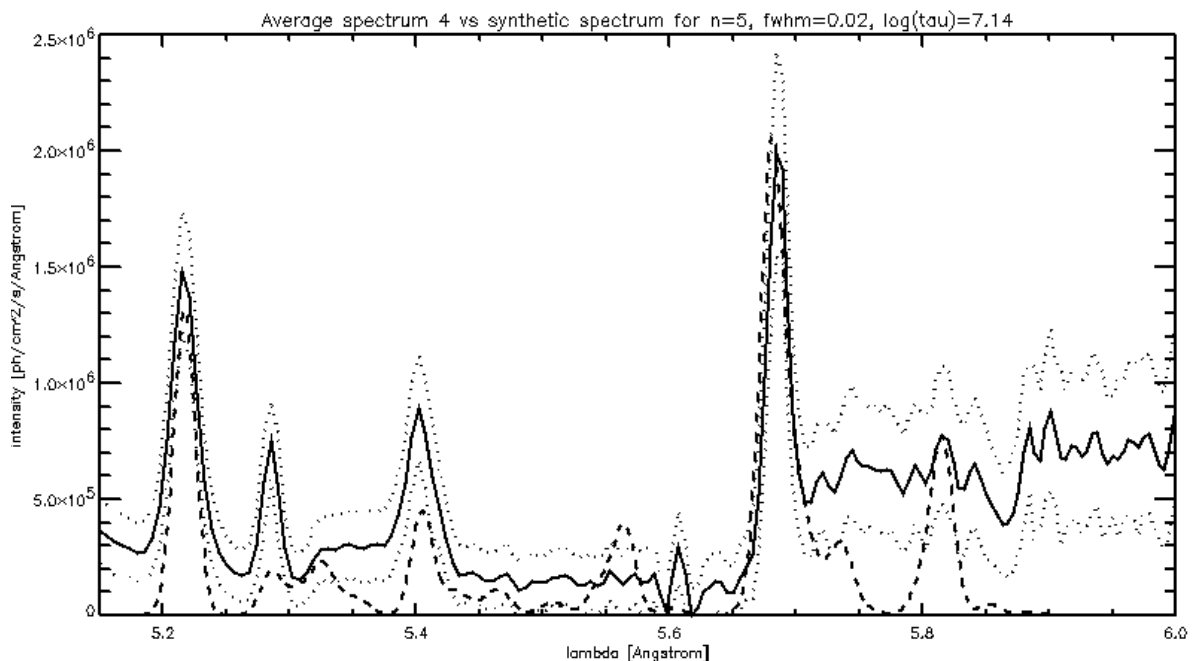
Vďaka niekoľkým zdrojom nepresnosti môžu byť reálne chyby výsledkov väčšie ako tie, ktoré sú zobrazené na obrázkoch. Prvý zdroj chýb je spojený s odstraňovaním kontinua zo spektier. Zatiaľ nevieme vypočítať kontinuum za predpokladu power distribúcie voľných elektrónov. Druhým zdrojom chýb je zahrnutie blendov do intenzít použitých čiar Si. Napríklad len v blízkosti čiary Si XIII 5.6807 Å je viac ako 20 satelitných čiar Si XII d. Dôležitosť týchto satelitov rastie s rastom  $n$ . Významným zdrojom nepresností je aj prítomnosť veľkého množstva čiar, ktoré nebolo možné identifikovať. Nárast celkovej intenzity v spektre pre najdlhšie vlnové dĺžky môže byť spôsobený aj prítomnosťou fluorescencie krystalu spektrometra. Ďalším zdrojom chýb sú prirodzené nehomogenity parametrov erupčnej plazmy.

## Podakovanie

RTG spektrá na analýzu nám poskytol Dr. Janusz Sylwester zo Space Research Center of Polish Academy of Sciences, Wroclaw. Práca bola podporená VEGA grantom č. 1/2026/05.

## LITERATÚRA

Sylwester J., Giałicki I., Kordylewski Z. a kol.: 2005, Solar Physics, 226, 45



Obrázok 5. Porovnanie priemerného spektra 4 (plná čiara) so syntetickým spektrom (čiarkovaná čiara) pre  $n=5$  a  $\log(\tau)=7.14$  s  $fwhm=0.02$  Å. Bodkované čiaru reprezentujú rozsah chýb priemerného spektra 4.