

Diagnostika netermálních distribucí elektronů v plazme slnečných erupcií

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

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

Abstrakt:

Pozorovania spektier slnečných erupcií najmä počas impulznej fázy často nie je možné vysvetliť za predpokladu Maxwellovho rozdelenia rýchlostí elektrónov v plazme. Neobvyklé pomery inenzít spektrálnych čiar indikujú prítomnosť netermálnych distribúcií elektrónov. To vyžaduje nájsť metodiku, ktorá by takúto diagnostiku umožňovala. Ukazuje sa, že satelitné čiary a čiary patriace iónom v rozličných stupňoch ionizácie sú vhodné na takýto typ diagnostiky. Navrhnutá diagnostická metóda bola použitá na RTG spektrá slnečnej erupcie pozorované družicovým röntgenovským spektrografom RESIK.

1. Úvod

Elektrónové distribúcie s vyšším a užším píkcom ako Maxwellovo rozdelenie môžu vzniknúť za predpokladu, že do vysokoenergetickej časti distribúcie je dodávaná energia rýchlosťou, ktorá prevyšuje rýchlosť termalizačných procesov v plazme. Prítomnosť magnetického poľa zvyšuje pravdepodobnosť vzniku takejto distribúcie, pretože bráni disipačným procesom. Tzv. power distribúcia elektrónov môže byť prítomná v erupčnej plazme už niekoľko minút po jej začiatku a odchýlky distribučnej funkcie od Maxwellovho rozdelenia môžu byť značné. Je zrejme, že prítomnosť netermálnej distribúcie mení ionizačnú a excitačnú rovnováhu. To vedie k zmenám pomerov intenzít spektrálnych čiar, čo umožňuje diagnostiku tvaru distribučnej funkcie elektrónov.

Power distribúcia

Voľné elektróny pri vysokých teplotách a nízkych hustotách môžu mať power distribúciu s voľnými parametrami n a T (**obr. 1**):

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

kde E je energia elektrónu, m hmotnosť elektrónu, k Boltzmannova konštanta a B^n je normovacia konštanta power distribúcie. Priemerná energia power distribúcie je

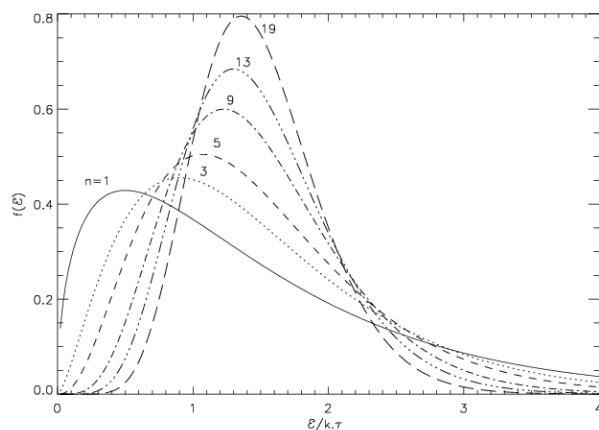
$$\langle E \rangle = (n+2) \cdot kT/2.$$

Pre túto distribúciu priemerná energia závisí na dvoch parametroch n a T . Preto je zavedený nový parameter, pseudo-teplota τ :

$$\langle E \rangle = 3 \cdot k\tau/2$$

čo je teplota Maxwellovho rozdelenia, ktoré má rovnakú priemernú energiu akú má power distribúcia a platí

$$\tau = (n+2) \cdot T/3.$$



Obr. 1. Power distribúcie pre rozdielne hodnoty parametra n ako funkcia E/kT (a) a $E/k\tau=3E/(n+2)kT$ (b). Maxwellova distribúcia elektrónov má $n=1$. Všetky distribúcie na obrázku vpravo majú rovnakú priemernú energiu častíc.

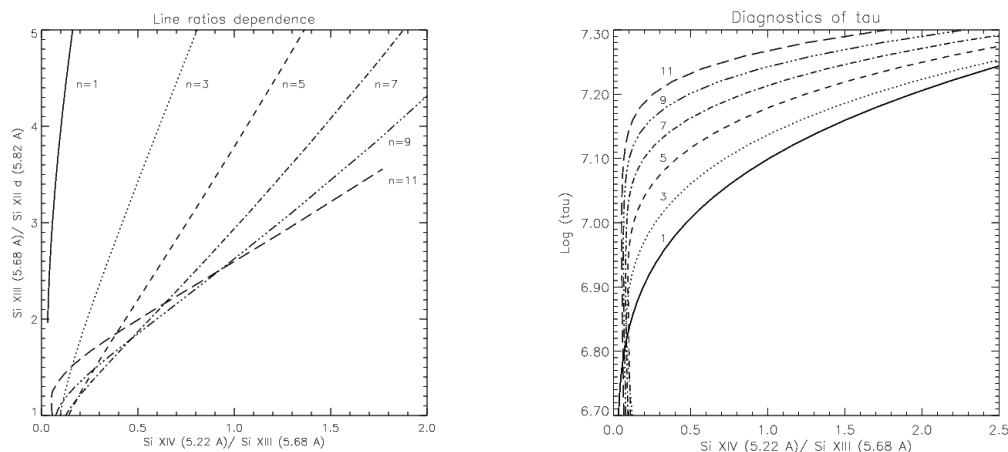
Diagnostika

Čiary, ktoré sa použijú pre diagnostiku by mali mať dostatočnú intenzitu, aby boli merateľné a zmeny v pomere ich intenzít spôsobené zmenou distribučnej funkcie by mali byť väčšie ako sú chyby v určení ich intenzity. Tri čiary kremíka zo spektra získaného spektrografom RESIK (Sylwester a kol., 2005) v oblasti 5 až 6 Å sa ukázali ako vhodné pre diagnostiku:

| | | |
|----------|----------|------------------------------------|
| 5.2168 Å | Si XIV | 1s 2S1/2 - 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 čiary sú blendované. Intenzity blendov boli započítané do intenzít čiar použitých na diagnostiku.

Pre výpočet syntetických spektier v oblasti 5 až 6 Å a na návrh diagnostiky bola použitá originálna modifikácia softvéru CHIANTI, ktorá spolu s rozšírením databázy umožňuje výpočet syntetických spektier pre rôzne netermálne distribúcie a zahŕňa aj výpočet intenzít satelitných čiar, ktoré vznikajú pri dielektrónovej rekombinácii. Táto modifikácia softvéru a databázy bude čiastočne zahrnutá aj v novej verzii CHIANTI 6.0. Syntetické spektrá boli vypočítané za predpokladu konštantnej pseudoteploty a koncentrácie elektrónov a s FWHM=20.0 mÅ. Pomery intenzít čiar, ktoré boli použité na diagnostiku, nezáviseli na koncentrácii elektrónov. Parameter n môže byť určený z pomeru čiar, Si XIV (5.217)/Si XIII (5.681) vs Si XIII (5.681) /Si XII d (5.816) (**obr. 2, vľavo**). Pre známy parameter n je možné určiť τ z vypočítanej závislosti pomeru tokov zvolenej dvojice spektrálnych čiar na $\log \tau$ (**obr 2, vpravo**).

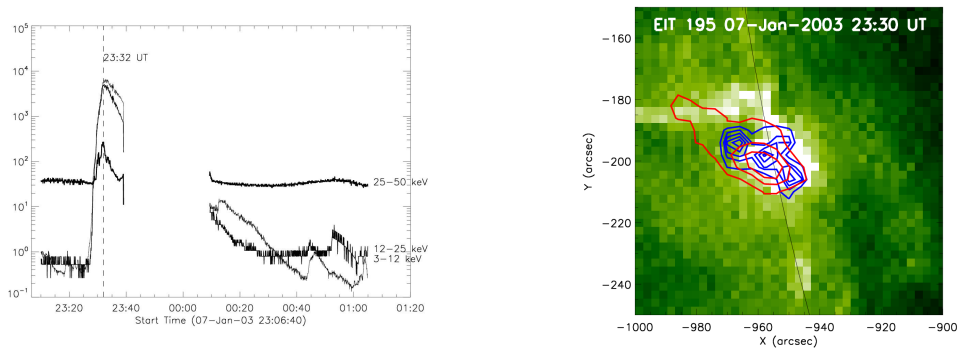


Obr. 2. Diagnostika parametra n zo závislosti pomeru tokov čiar Si XIII (5.681) /Si XII d (5.816) na pomere tokov čiar Si XIV (5.217)/Si XIII (5.681) (vľavo) a diagnostika pseudo-teploty τ zo známej závislosti pomeru tokov Si XIV (5.217)/Si XIII (5.681) na $\log \tau$ (vpravo) pre rôzne hodnoty parametra n .

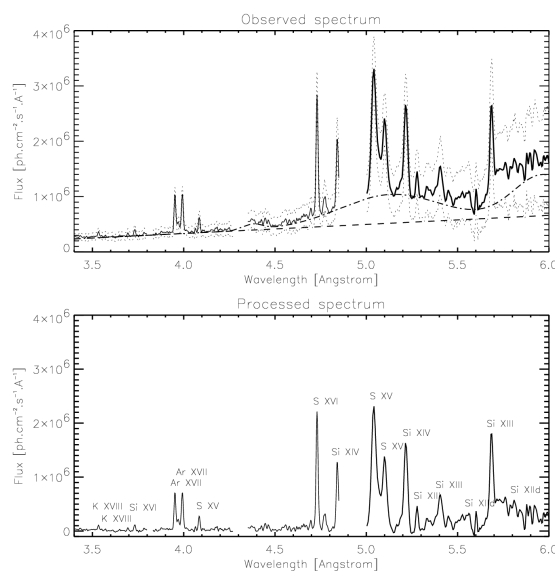
Dáta

Dáta zo spektrografu RESIK spracovali a skalibrovali Dr. Barbara Sylwester a Dr. Janusz Sylwester z Centra vesmírneho výskumu Poľskej Akadémie vied, Wroclaw. Dáta obsahujú absolútne spektrá v X oblasti zo všetkých štyroch kanálov spektrografu RESIK: 3.40-3.80 Å, 3.83-4.27 Å, 4.35-4.86 Å, 5.00-6.05 Å a pokrývajú slnečnú erupciu s importanciou M4.9 z prelomu dňa 7./8. januára 2003, ktorá sa odohrala v aktívnej oblasti 10

251, S14E81, 23:25 – 23:33 – 00:40 UT (**obr. 3**). Použili sme 88 spektier zo štvrtého kanálu, kde dominujú čiary Si XIII - Si XIV.



Obr. 3. Priebeh toku RTG žiarenia zaregistrovaného na družici RHESSI je na obr. 3 vľavo a vzhľad erupcie v EUV oblasti (SoHO, EIT 195 Å) s kontúrami RTG žiarenia 6-12 keV (červené) a 25-50 keV (modré) registrovanými na RHESSI je na obr. 3 vpravo.

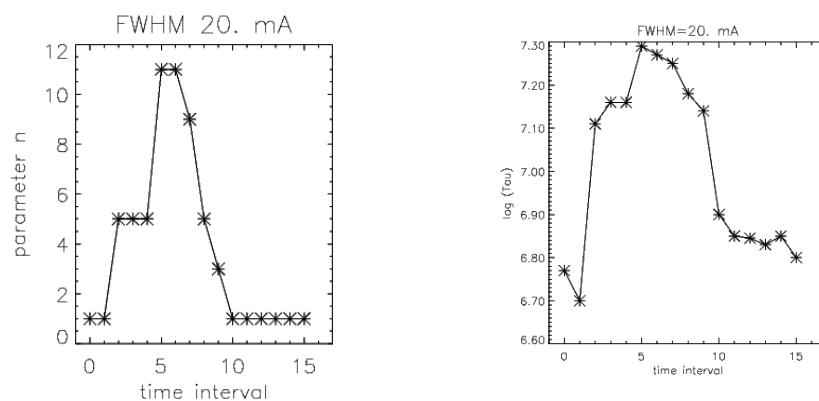


Obr. 4. Spektrum s "kopcami" pozorované spektrografom RESIK (hore) a čiarové spektrum bez kontinua po odstránení "kopcov" s vyznačeným spektrálnymi čiarami (dolu).

Aby sme znížili úroveň šumu, spriemerovali sme spektrá, ktoré boli pozorované v rámci jednej minúty. Pred analýzou bola zo spektier erupcie odpočítaná lineárna aproximácia kontinua. V spektre však zostali podivné zvyšky kontinua, 3 tzv. "kopce". Predpokladali sme, že ide o nejaký inštrumentálny efekt, pravdepodobne spôsobený flurescenciou. "Kopce" sme aproximovali Gaussom a zo spektra sme ich odstránili (obr.4). Výsledné čiarové spektrum v oblasti 5.15-6.0 Å bolo aproximované sériou Gaussových profilov, aby bolo možné zahrnúť vplyv čiar nachádzajúcich sa v blízkosti Si čiar použitých na diagnostiku. Z parametrov Gaussovských profilov bol vypočítaný tok v jednotlivých čiarach.

Výsledky

Zo zmeraných tokov v jednotlivých čiarach boli vypočítané pomery tokov a zistený parameter n . Ukázalo sa, že parameter n power distribúcie strmo narastá počas impulznej fázy, dosahuje svoju maximálnu hodnotu 11 v maxime erupcie a potom sa erupčná plazma termalizuje (**obr. 5**). V oblasti maxima erupcie boli zároveň pozorované rádiové vzplanutia typu 3, ktoré sú spojené s urýčlenými zväzkami častíc. To zodpovedá predpokladu, že prítomnosť netermálnej distribúcie elektrónov v plazme je spojená s urýčľovaním častíc počas rekonexie.



Obr. 5. Časová závislosť parametrov n (vľavo) a τ (vpravo) pre analyzovanú erupciu. Maximálna hodnota n je dosiahnutá počas maxima erupcie.

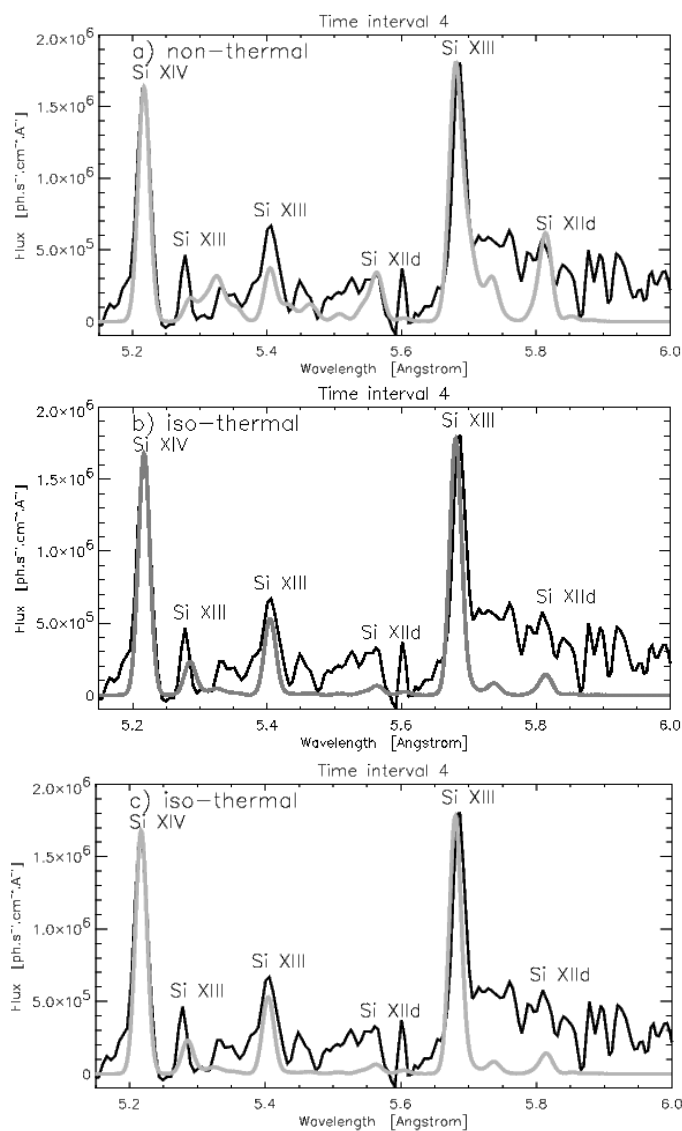
Pozorovaný pomer čiar Si XIV 5.22 Å/Si XIII 5.68 Å najlepšie vystihuje model netermálneho spektra s diagnostikovaným parametrom n (**obr. 6a**). Netermálne spektrum zároveň veľmi dobre reprodukuje tok v satelitných čiarach Si XII d 5.56 Å a Si XII d 5.82 Å, ale má problém reprodukovat' tok v dovolených čiarach Si XIII 5.28 Å a Si XIII 5.40 Å.

Model multitermálneho spektra (**obr. 6b**) pri danom pomere tokov Si XIV 5.22 Å/Si XIII 5.68 Å síce podhodnocuje pozorovaný tok v satelitných čiarach Si XII d 5.56 Å a Si XII d 5.82 Å, ale najlepšie reprodukuje tok pozorovaný v čiarach Si XIII 5.28 Å a Si XIII 5.40 Å. Model izotermálneho spektra (**obr. 6c**) pre pozorovaný pomer Si XIV 5.22 Å/Si XIII 5.68 silne podhodnocuje tok v satelitných čiarach Si XII d 5.56 Å a Si XII d 5.82 Å a lepšie reprodukuje tok v čiarach Si XIII 5.28 Å a Si XIII 5.40 Å.

Naväčšie problémy v modelovaní pozorovaného spektra boli pre všetky tri typy modelov (izotermálny, multitermálny aj netermálny) so spektrom číslo 6. Okrem veľmi vysokého toku v satelitných čiarach boli pozorované veľké posuvy vlnovej dĺžky spektrálnych čiar. Posuv vo vlnovej dĺžke by mal byť rovnaký pre všetky čiary, ktoré sú formované pri tej istej teplote a v tom istom objeme plazmy. V prípade spektra č. 6 to napr. neplatí pre satelitné čiary Si XII d, najmä Si XII d 5.82 Å, ktorá je na rozdiel od dovolenej čiary Si XIII 5.68 Å výrazne posunutá.

Diskusia

Na základe analýzy bolo zistené, že odchýlky distribučnej funkcie voľných elektrónov od Maxwellovho rozdelenia sa vyskytujú počas impuznej fázy erupcie. Výsledok je konzistentný so zisteniami Seely a kol. (1987). Erupčné spektrá je teda možné s dostatočnou presnosťou reprodukovat' spektrami vypočítanými za predpokladu existencie netermálnej power distribúcie s diagnostikovanými parametrami n a \square . Ukázalo sa, že pomocou power distribúcie sme schopní modelovat' naraz vysoké intenzity Si XIV a Si XIII čiar spolu s vysokými intenzitami satelitných čiar, čo nie je možné urobiť pre Maxwellovo rozdelenie elektrónov ani za predpokladu prítomnosti multitermálnej plazmy. Priemerná chyba vstupných dát je asi 26 percent. Okrem toho je tu ešte niekoľko ďalších zdrojov nepresností a problémov, ktoré ovplyvňujú výsledok. Jedným z nich je separácia kontinua, v súčasnosti nie sme schopní vypočítať kontinuum za predpokladu netermálnej distribúcie elektrónov. Ďalším problémom je zahrnutie intenzity blendov do intenzít spektrálnych čiar, napr. v blízkosti čiary Si XIII 5.681 Å je viac ako 20 Si XII d satelitných čiar a dôležitosť týchto čiar rastie s rastom paramtra n . Navyše, v spektre sa nachádza veľké množstvo čiar, ktoré zatiaľ nedokážeme identifikovat', pretože k nim neexistujú atómové dáta. Poslednou komplikáciou je prirodzená nehomogénosť fyzikálnych parametrov erupčnej plazmy.



Obr. 6. Porovnanie pozorovaného spektra a syntetických spektier: a) model s neternálnou distribúciou, b) multitermálny model, c) izotermálny model.

Záver

Analýza RTG spektier erupcie zo dňa 7. januára 2002 ukázala, že na začiatku erupcie rastie priemerná energia plazmy spolu s odchýlkou distribučnej funkcie elektrónov od Maxwellovho rozdelenia. Termalizácia plazmy začína približne po maxime erupcie podľa GOES. Priebeh teploty získanej z termálnej a multi-termálnej analýzy ako aj jej ekvivalentu pseudoteploty pre neternálne distribúcie má rovnaký tvar ako teploty získané z priebehu spojitého X - spektra za predpokladu Maxwellovho rozdelenia.

Literatúra:

Seely, J. F., Feldman, U. a Doschek, G. A.: 1987, *Astrophys. Journal*, **319**, 541

Sylwester a kol.: 2005, *Solar Phys.*, **226**, 45

RESIK: <http://www.cbk.pan.wroc.pl/>

RHESSI: <http://hesperia/gsf.nasa.gov/hessi/>

SOHO: <http://sohowww.nascom.nasa.gov>

CHIANTI je spoločný projekt NRL (USA), RAL (UK), MSSL (UK), Universities of Florence (Italy) a Cambridge (UK), a George Mason University (USA). Sofvér je distribuovaný ako súčasť SolarSoft.