

Vplyv kappa-distribúcie na ionizačnú rovnováhu uhlíka a kyslíka v slnečnej koróne

Dzifčáková, Elena, *Astronomický ústav, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Komenského Univerzity, Mlynská Dolina, 842 48 Bratislava, dzifcakova @fmph.uniba.sk*

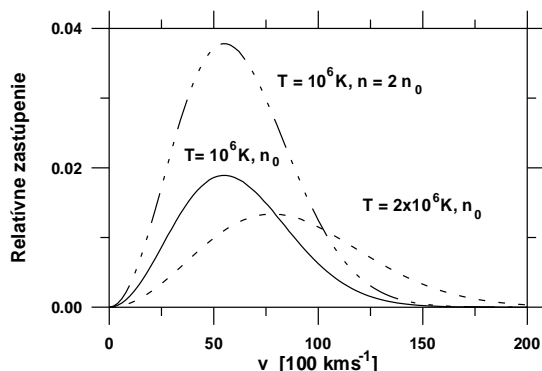
Abstrakt

V práci je študovaný vplyv κ -distribúcie na rýchlosti elementárnych procesov ovplyvňujúcich ionizačnú rovnováhu C v slnečnej koróne. Je ukázané, že so zmenou tvaru elektrónovej distribúcie sa mení aj ionizačná rovnováha. Prítomnosť rastu odchýlky distribúcie od Maxwellovho rozdelenia rastú aj rozdiely v iónovom zložení. Výsledky sa dajú použiť v špecifických aplikáciách v slnečnej koróne, pri analýze iónového zloženia slnečného vetra a všade tam, kde odchýlky distribúcie častíc od Maxwellovho rozdelenia môžu byť značné.

1. ÚVOD

Netepelné distribúcie elektrónov možno nájsť v plazme s nízkou koncentráciou častíc v prípade, že:

- V plazme je veľký gradient teploty alebo hustoty. Vznik netepelnej elektrónovej distribúcie je spôsobený poklesom zrážkového prierezu elektrónu pri raste jeho rýchlosti, čo mu umožňuje dostať sa bez straty energie do oblastí s nižšou hustotou alebo teplotou, kde zvyšuje počet častíc s vysokou energiou. Distribúcia má vyšší počet častíc vo vysoko-energetickom časti distribúcie ako Maxwellova rozdeľovacia funkcia (obr. 1).
- Do časti distribúcie je dodávaná energia rýchlosťou, ktorá prevyšuje rýchlosť rovnovážnych procesov. V tomto prípade je dôležitá prítomnosť magnetického poľa, ktoré spomaľuje termalizačné procesy. Distribúcia má užší a vyšší pík ako Maxwellova rozdeľovacia funkcia a pravdepodobne je charakteristická pre impulznú fázu slnečných erupcií.



Obr. 1. Maxwellova rozdeľovacia funkcia pre $T = 10^6 \text{ K}$, $n = n_0$ (plná čiara), pre $T = 10^6 \text{ K}$, $n = 2n_0$ (bodko-bodko-bodkočiarkovaná čiara) a pre $T = 2 \times 10^6 \text{ K}$, $n = n_0$ (čiarkovaná čiara).

Prvý typ distribúcie sa môže vyskytovať v slnečnej koróne, prechodnej oblasti a slnečnom vetre

Predkladaná práca sa zaoberá vplyvom takéhoto typu distribúcie na ionizačnú rovnováhu uhlíka a kyslíka a možnosťou detekcie tohoto typu distribúcie z relatívneho zastúpenia iónov.

2. DISTRIBUČNÁ FUNKCIA

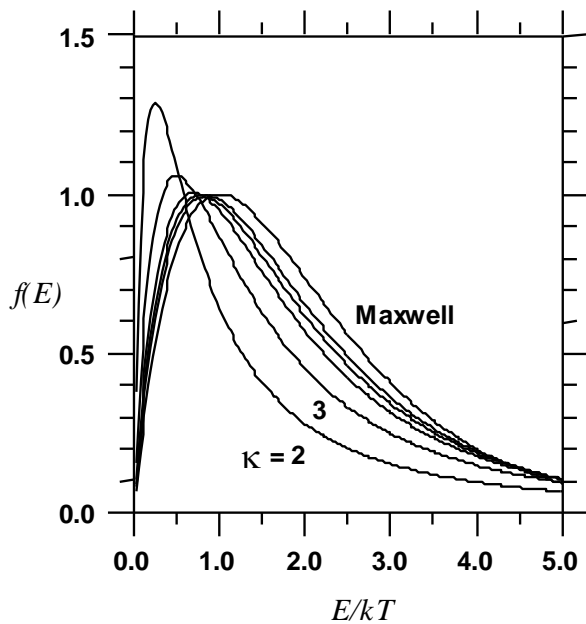
Keďže nepoznáme exaktný tvar distribučnej funkcie, k analýze bol použitý parametrizovaný tvar distribučnej funkcie, tzv. κ -distribúcia. Tento typ distribúcie bol použitý v práci by Owocki and Scudder (1983) na vysvetlenie pomerov iónov O VII / O VIII a Fe XII / Fe XIII, ktoré boli pozorované v slnečnom vetre a líšili sa od klasickej teórie. Ko et al. (1996) zistil na základe meraní družice ULYSIS, že iónové zloženie slnečného vetra najlepšie zodpovedá elektrónovej distribúcii so stredne zvýšeným počtom elektrónov vo vysokoenergetickej časti. Aj Esser et al. (1997) diskutovali vplyv nemaxwellovskej distribúcie na iónové zloženie Fe v slnečnom vetre.

Pre netepelnú κ -distribúciu je možné ľahko modelovať relatívne odchýlky od Maxwellovho rozdelenia zmenou parametra κ .

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

kde E je energia, A_{κ} je konštanta distribúcie, m hmotnosť a T je teplota

Priemerná energia κ -distribúcie je $E = 3kT/2$ a je funkciou iba teploty T . Poklesom κ rastie podiel vysokoenergetických častíc v distribúcii a maximum distribúcie sa posúva smerom k nižším energiám, takže zmenou κ je možné meniť tvar distribúcie (obr. 2). Silne netermálne rozdelenie dostávame pre $\kappa \rightarrow 1.5$. Ak



Obr.2. Distribúcia častíc ako funkcia κ . Všetky distribúcie majú rovnakú priemernú energiu. $\kappa = 2, 3, 5, 7, 10, \infty$ (Maxwell).

$\kappa \rightarrow \infty$, tak distribúcia sa blíži k Maxwellovmu rozdeleniu.

Rýchlosť elementárnych procesov je pre ľubovoľnú distribúciu daná integráciou zrážkového prierezu σ cez distribučnú funkciu

$$\langle \sigma v \rangle = (8\pi/m^2) \int_0^{\infty} \sigma f(E) E^{1/2} dE.$$

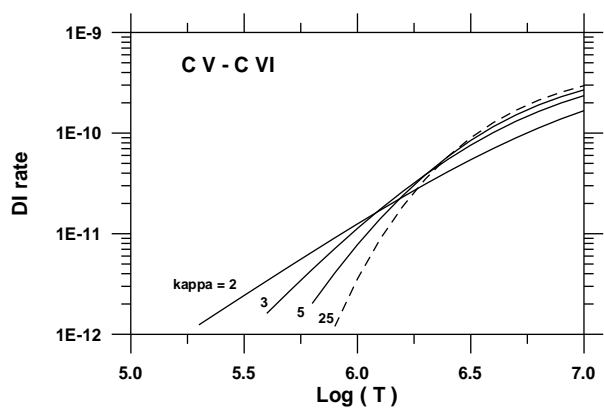
3. PREDPOKLADY

Pri výpočte ionizačnej rovnováhy uhlíka a kyslíka boli urobené nasledujúce predpoklady :

- distribučná funkcia voľných elektrónov má tvar κ -distribúcie s teplotou T ,
- na ionizácii sa podieľajú dva procesy: ionizácia pri zrážke s elektrónom a autoionizácia,
- na rekombinácii sa podieľa dielektrónová a žiarivá rekombinácia,
- všetky ostatné ionizačné a rekombinačné procesy je možné zanedbať vzhľadom na nízku hustotu častíc a vysokú teplotu plazmy.

4. IONIZÁCIA

Analytickú aproximáciu závislosti zrážkového prierezu ionizácie a autoionizácie na energii interagujúceho elektrónu spolu s konštantami pre jednotlivé ióny uvádzajú Arnaud and Rothenflug (1985). Rýchlosť ionizácie zrážkou s elektrónom aj autoionizácie po integrácii cez κ -distribúciu závisí nielen na teplote ale aj na hodnote κ (obr. 3).

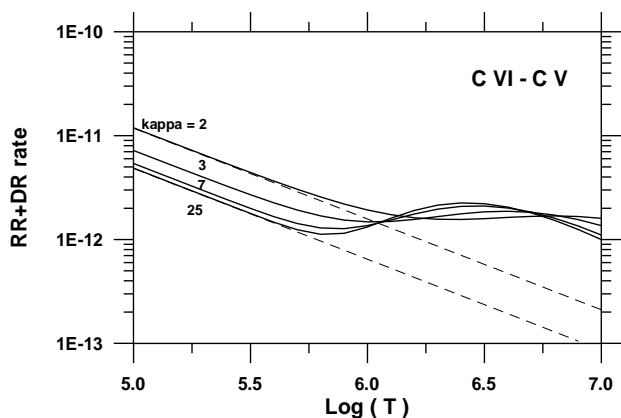


Obr. 3. Rýchlosť ionizácie zrážkou s elektrónom z C V na C VI v závislosti na teplote T pre rôzne κ -distribúcie. Silne netepelná distribúcia má $\kappa=2$, distribúcia veľmi blízka Maxwellovej distribúcii má $\kappa=25$. Závislosť je veľmi podobná pre všetky ióny, detaily závisia na atómových konštantách. Rýchlosť autoionizácie sa vzhľadom na T a κ chová veľmi podobne ako rýchlosť ionizácie zrážkou s elektrónom.

Rýchlosť ionizácie pri nižších teplotách rastie s rastom odchýlky elektrónovej distribúcie od Maxwellovho rozdelenia, pri vyšších teplotách naopak klesá. Závislosť na teplote sa stáva menej strmá pri raste κ , veľkosť zmeny závisí na atómových konštantách

4. REKOMBINÁCIA

Konštanty pre výpočet radiatívnej rekombinácie a dielektrónovej rekombinácie boli prevzaté z prác: Shull and van Steenberg (1982) a Verner and Ferland (1996). Vzťahy pre výpočet rýchlostí rekombinácie boli prevzaté z práce Dzifčáková (1992). Súčet rýchlostí radiatívnej a dielektrónovej rekombinácie v závislosti na teplote a κ je na obr. 4:



Obr. 4. Závislosť rýchlostí rekombinácie na teplote pre rôzne κ -distribúcie. Plnou čiarou je vyznačený súčet dielektrónovej a radiatívnej rekombinácie, čiarkovane rýchlosť radiatívnej rekombinácie.

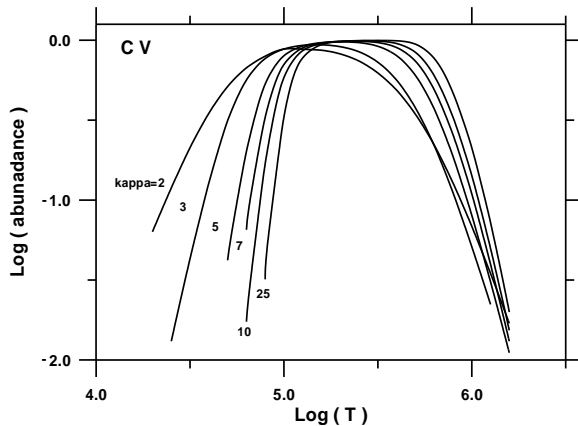
Nárast počtu vysokoenergetických elektrónov je sprevádzaný posunom maxima distribúcie smerom k nižším energiám a nárast počtu nízkoenergetických elektrónov. To má za následok rast rýchlosti radiatívnej rekombinácie s poklesom κ . Chovanie rýchlosti dielektrónovej rekombinácie je podstatne komplikovanejšie. Maximum sa posúva smerom k vyšším teplotám a stáva sa plochejšie. Presný charakter chovania celkovej rýchlosti rekombinácie pre každý ión závisí na atómových konštantách.

5. IONIZAČNÁ ROVNOVÁHA

Ionizačná rovnováha je v koronálnych podmienkach popísaná rovnicou

$$n_i / n_{i+1} = (RR + DR)_{i+1} / (DI + AI)_i,$$

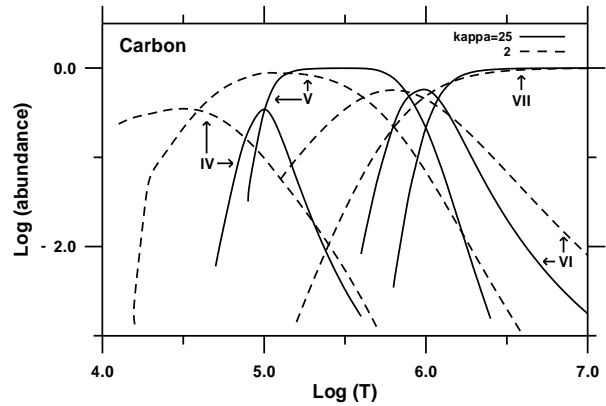
kde n_i (n_{i+1}) je relatívna koncentrácia i -krát ($i+1$ -krát) ionizovaných iónov, RR a DR sú rýchlosti radiatívnej rekombinácie z $i+1$ -krát ionizovaného iónu a DI a AI sú rýchlosti ionizácie zrážkou s elektrónom a dielektrónovej rekombinácie z i -krát ionizovaného iónu. V dôsledku zmien v rýchlostiach ionizácie a rekombinácie sa pri raste počtu vysokoenergetických elektrónov posúva maximum výskytu iónu smerom k nižším teplotám a rozširuje sa oblasť teplôt, kde má ión vysoké zastúpenie.



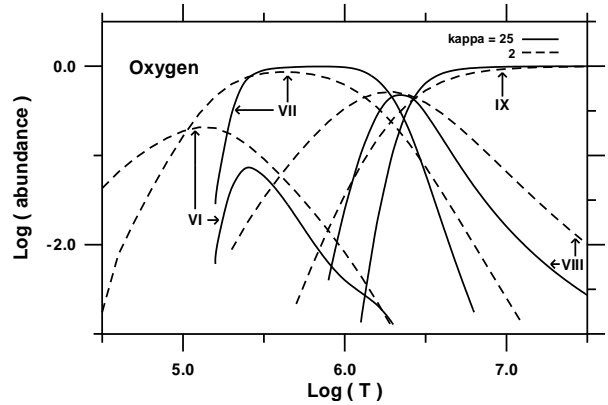
Obr. 5. Relatívne zastúpenie iónu O V v závislosti na teplote pre $\kappa=2, 3, 5, 7, 10, 25$. Zmeny v abundancii sú podobné pre všetky ióny.

Obr. 5 zobrazuje detailne zmeny relatívneho zastúpenia iónu O V pri zmene teploty a κ . Takéto zmeny sú typické pre každý ión. Posuv maxima smerom k nižším teplotám a rozšírenie intervalu teplôt v ktorom má ión vysokú abundanciu vedie k nárastu počtu súčasne pozorovaných iónov pri poklese κ .

Na obr. 6 a 7 je závislosť iónového spektra uhlíka a kyslíka na teplote pre silne ne-Maxwellovskú distribúciu ($\kappa = 2$) a pre takmer Maxwellovo rozdelenie ($\kappa = 25$). Je zrejme, že také relatívne zastúpenie viacerých iónov súčasne aké umožňuje ne-tepelná distribúcia nie je možné pre Maxwellovo rozdelenie elektrónov.



Obr. 6. Relatívne zastúpenie iónov C IV - C VII ako funkcia teploty T pre $\kappa=2$ (silne netepelná distribúcia) a pre $\kappa=25$ (takmer Maxwellovo rozdelenie).

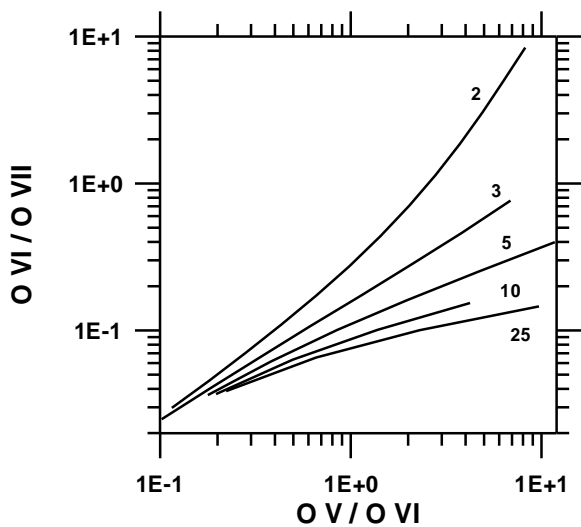


Obr. 7. Relatívne zastúpenie iónov O VI - O IX ako funkcia teploty T pre $\kappa=2$ (silne netepelná distribúcia) a pre $\kappa=25$ (takmer Maxwellovo rozdelenie).

6. DIAGNOSTIKA

Rozličný tvar závislosti relatívneho iónového zastúpenia pre rozdielne κ vyplýva z rozdielov v rýchlosti elementárnych procesov ktoré prispievajú k celkovej rýchlosti ionizácie a rekombinácie.

Relatívny príspevok každého procesu tiež závisí na tvare distribúcie. Veľkosť zmeny závisí na atómových parametroch každého iónu, aj keď môže byť podobná pre ióny s rovnakým počtom elektrónov, napr. C VII a O IX, C VI a O VIII a pod. Pomery zastúpenia iónov teda závisia nielen na Teplote ale aj na κ . To nám v niektorých prípadoch umožňuje zistiť tvar distribučnej funkcie. Keďže potrebuje určiť dva parametre, teplotu a κ , potrebujeme aspoň dva pomery zastúpenia iónov v troch po sebe idúcich stupňoch ionizácie. Ako príklad boli vzaté pomery iónov O V / O VI a O VII / O VIII (obr. 8). Na základe tohoto obrázku je možné o známych pomeroch určiť κ a potom z ionizačnej rovnováhy pre toto κ určiť teplotu.



Obr. 8. Závislosť pomeru $O\ VII / O\ VII$ na pomere $O\ V / O\ VI$ pre $\kappa=2, 3, 5, 10$ a 25 . Vyšší pomer $O\ VII / O\ VII$ znamená nižšiu teplotu.

Je zrejmé, že možnosť určiť κ z tohoto obrázku alebo podobných obrázkov závisí na rozdieloch v abundancii iónov pre rozdielne κ . Pre ióny na obrázku je veľmi dobrá. Samozrejme, presnosť diagnostiky závisí na znalosti atómových konštánt a na možnosti presne určiť iónové frakcie. Ale obecné platí, že veľký počet súčasne pozorovaných iónov toho istého prvku indikuje netepelnú distribúciu so zvýšeným počtom častíc vo vysoko-energetickej časti.

7. ZÁVER

V článku sa podarilo sa ukázať akým spôsobom zmena distribučnej funkcie elektrónov mení rýchlosti elementárnych procesov ovplyvňujúcich ionizáciu a rekombináciu iónov a teda aj ionizačnú rovnovahu uhlíka a kyslíka. Bola nájdená jednoduchá metodika na určenie parametra distribúcie κ a teploty z pomerov iónových frakcií iónov v troch následných stupňoch ionizácie. Výsledky môžu byť použité pre analýzu koronálnej plazmy alebo pre diagnostiku iónového zloženia slnečného vetra.

LITERATÚRA

- Arnaud, M. and Raymond, J.: 1992, *Astrophys. J.*, **398**, 394
 Arnaud, M. and Rothenflug, R.: 1985, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **60**, 425
 Dzifčáková, E.: 1992, *Solar Phys.*, **178**, 317
 Esser, R., Edgar, R. J. and Brickhouse, N. S.: 1998, *Astrophys. J.*, **498**, 448
 Ko, Y. -K., Fisk, L. A., Gloeckler, G. and Geiss, J.: 1996, *J. Geophys. Res. Lett.*, **23**, 2785
 Mazzotta, P.; Mazzitelli, G.; Colafrancesco, S. and Vittorio, N.: 1998, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **133**, 403
 Owocki, S. P. and Scudder J. D.: 1983, *Astrophys. J.*, **270**, 758
 Shull, J. M. and van Steenberg, M.: 1982, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **48**, 95
 Verner, D.A. and Ferland, G.J.: 1996, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **103**, 467