

Excitačná rovnováha Fe IX - XV v slnečnej koróne pre mocninné rozdelenie elektrónov.

Dzifčáková, Elena, Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava, dzifcakova @fmph.uniba.sk

Tóthová, Danica, Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie, FMFI UK, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava

Abstrakt

V článku je demonštrovaný vplyv netepelnej distribúcie elektrónov (tzv. power distribúcie) na excitačnú rovnováhu iónov Fe IX až XV v slnečnej koróne. Je tiež ukázaný vplyv takéhoto rozdelenia na tvar syntetického spektra v oblasti 160 - 290 Å pre čiary patriace týmto iónom. Výsledky môžu byť použité na modelovanie spektier koronálnej plazmy v miestach, kde môžu byť značné odchýlky distribúcie častíc od Maxwellovho rozdelenia.

1. ÚVOD

Netepelné distribúcie elektrónov s užším a vyšším píkom ako Maxwellova distribúcia sa môžu vyskytovať v plazme s nízkou hustotou častíc vtedy, ak do plazmy je dodávaná energia do časti distribúcie s rýchlosťou, ktorá je vyššia ako rýchlosť rovnovážnych procesov. Netepelné distribúcie tohoto typu môžu byť použité napr. k popisu plazmy slnečných erupcií počas ich impulznej fázy.

Seely, Feldman and Doschek (1987) študovali tento typ netepelnej distribúcie častíc počas slnečných erupcií z intenzít rezonančnej čiary Fe XXV a satelitných čiar Fe XXVI. Diagnostikú metódu prevzali z práce Gabriel and Phillips (1979). Zistili značné odchýlky distribučnej funkcie elektrónov od Maxwellovej.

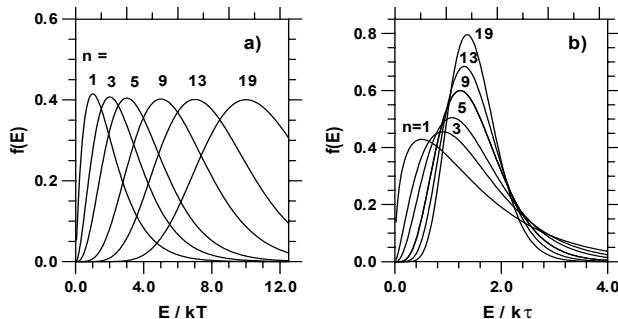
Predkladaná práca sa zaoberá vplyvom netepelnej distribúcie na excitačnú rovnováhu Fe IX - XV a na tvar syntetického UV spektra iónov Fe v oblasti 160 - 290 Å, kde čiary Fe dominujú.

2. DISTRIBUČNÁ FUNKCIA

K analýze vplyvu netepelnej distribúcie na elementárne procesy a charakter spektra bol použitý parametrizovaný tvar distribučnej funkcie, tzv. mocninová distribúcia. Pre tento typ distribúcie je možné ľahko modelovať relatívne odchýlky od Maxwellovho rozdelenia zmenou parametra n (Seely, Feldman and Doschek, 1987)

$$f(E) dE = 1/\Gamma(n/2+1) E^{n/2} (kT)^{-(n/2+1)} \exp(-E/kT) dE.$$

Priemerná energia power distribúcie je $E=(n/2+1)kT$ a energia elektrónov s najpravdepodobnejšou rýchlosťou je $E=(n/2)kT$, kde n a T sú parametre rozdelenia. Rastom n sa zväčšuje odchýlka od Maxwellovho rozdelenia a rastie priemerná energia distribúcie (obr. 1a). Maxwellovo rozdelenie má $n=1$. Pretože parametre n a T sú navzájom závislé a zaoberáme sa štúdiom vplyvu tvaru distribúcie na excitačnú rovnováhu, bol zavedený nový parameter, tzv. pseudoteplota τ , (Dzifčáková, 1998). Pseudoteplota je teplota Maxwellovho rozdelenia, ktorého priemerná energia sa rovná priemernej energii mocninovej distribúcie (obr. 1b).



Obr.1. Power distribúcia ako funkcia teploty T (a) a pseudoteploty τ (b). Distribučné funkcie na obr. 1b majú rovnakú priemernú energiu.

3. PREDPOKLADY

Pri výpočte excitačnej rovnováhy Fe IX - XV boli urobené nasledujúce predpoklady :

- voľné elektróny majú mocninovú distribúciu s parametrom n a T ,
- plazma je homogénna a opticky tenká pre všetky žiarivé prechody medzi hladinami a pre spojité žiarenie,
- uvažuje sa excitácia a deexcitácia hladín zrážkou s elektrónom,
- nezapočítavajú sa zrážky s protónmi a alfa časticami.

4. ŠTATISTICKÁ ROVNOVÁHA

Aby bolo možné započítať vplyv abundancie iónu na intenzitu spektrálnych čiar je potrebné poznať ionizačnú rovnováhu železa pre mocninové distribúcie. Ionizačná rovnováha bola prevzatá z práce Dzifčáková (1998). Pri jej výpočte bola uvažovaná ionizácia zrážkou s elektrónom, auto-ionizácia a žiarivá a dielektrónová rekombinácia. Ukázalo sa, že mocninová distribúcia ovplyvňuje rýchlosť všetkých týchto procesov. Posúva maximum výskytu iónu pri raste parametra n smerom k nižším hodnotám teploty a smerom k vyšším hodnotám pseudoteploty. Zároveň sa mení tvar závislosti abundancie iónu na teplote alebo pseudoteplote.

Obsadenie hladín iónov Fe IX - XV dominantne určujú dva hlavné elementárne procesy: excitácia zrážkou s elektrónom a deexcitácia spontánnou emisiou. Rýchlosť excitácie a deexcitácie je pre ľubovoľnú distribúciu daná vzťahom

$$\langle \sigma v \rangle = (2/m)^{1/2} \int_{E_0}^{\infty} \sigma f(E) E^{1/2} dE.$$

Pre zrážkový prierez σ platí vzťah

$$\sigma_{ij} = \Omega_{ij}(E_i) h^2 / (g_i E_i 8 m \pi),$$

Kde Ω_{ij} je sila zrážky.

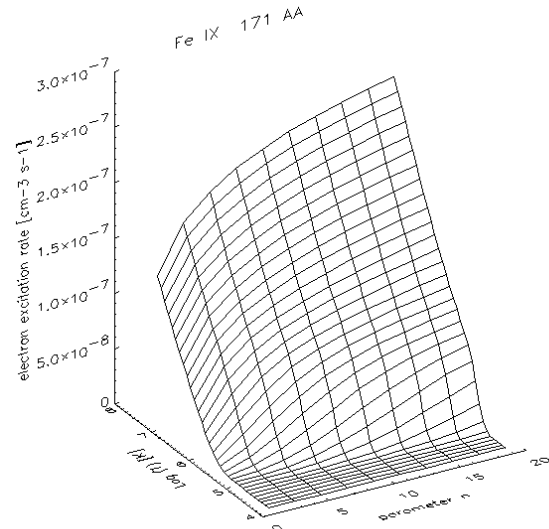
Pre výpočet rýchlosti excitácie a deexcitácie sme použili dáta z databázy CHIANTI a využili metódu Burgessa a Tullyho (1990).

5. VÝSLEDKY

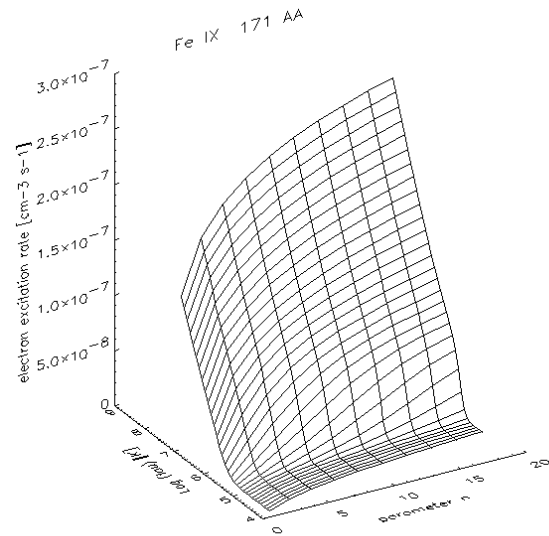
Vplyv tvaru distribúcie na elektrónovú excitáciu

Rýchlosť elektrónovej excitácie rastie, ak rastie odchýlka tvaru distribučnej funkcie elektrónov od Maxwellovho rozdelenia, teda ak zvyšujeme hodnotu parametra n . Tento rast je charakteristický

pre daný ión a daný prechod, závisí na energii a type prechodu a je výraznejší pri nižších teplotách (obr. 2a). Keďže stredná hodnota energie elektrónov závisí na oboch parametroch n a T , zavedenie pseudoteploty lepšie vystihuje samotný vplyv tvaru distribúcie na rýchlosť excitácie (obr. 2b, 3). Konkrétny tvar závislosti pritom závisí na danom prechode (obr. 2b, 3).

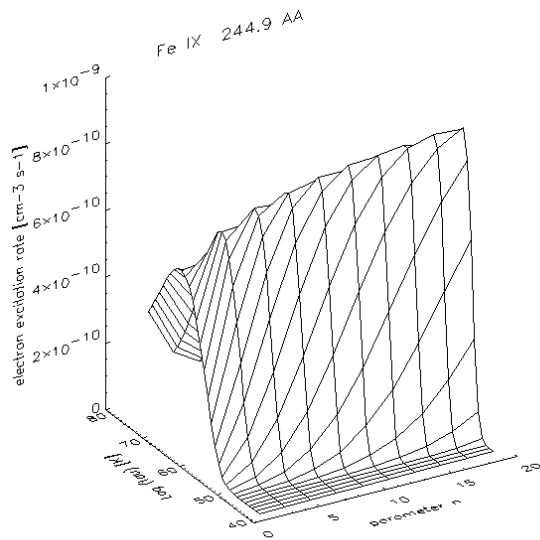


a)



b)

Obr.2. Rýchlosť elektrónovej excitácie zo základnej hladiny $i=1$ na hladinu $j=13$ odpovedajúca dovolenému prechodu $3p^6 \ ^1S_0 - 3p^5 3d \ ^1P_1$ iónu Fe IX v závislosti na logaritme teploty a parametri n (a) a v závislosti na logaritme pseudoteploty a parametri n (b).



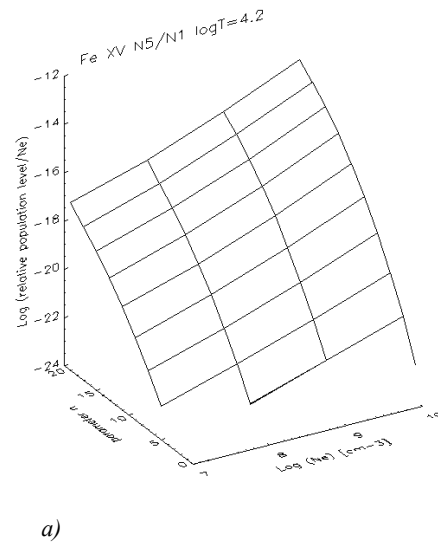
Obr.3. Rýchlosť elektrónovej excitácie zo základnej hladiny $i=1$ na hladinu $j=3$ odpovedajúca prechodu $3p^6\ ^1S_0 - 3p^5.3d\ ^1P_1$ iónu Fe IX v závislosti na logaritme pseudoteploty a parametri n . Rýchlosť excitácie je maximálna približne pri rovnakej pseudoteploty $\tau = 10^{6.3} \text{ K}$.

Obsadenie energetických hladín iónov

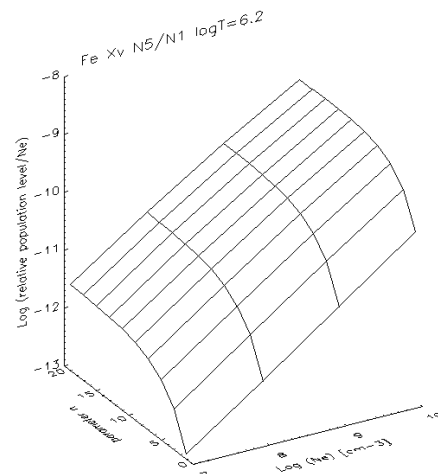
Dôsledkom rastu rýchlosti excitácie s parametrom n je nárast relatívneho obsadenia hladín iónov pri konštantnej teplote T (obr. 4a, b) a veľmi mierny nárast populácie hladín s parametrom n pri konštantnej pseudoteploty τ (obr. 4c). Nárast populácie hladín iónov s hustotou elektrónov je dôsledkom priamej úmernosti pravdepodobnosti excitácie na elektrónovej hustote a je mierne výraznejší pri nižších teplotách a väčších odchýlkach mocninového rozdelenia elektrónov od Maxwellovho.

Vplyv tvaru distribúcie na syntetické spektrum

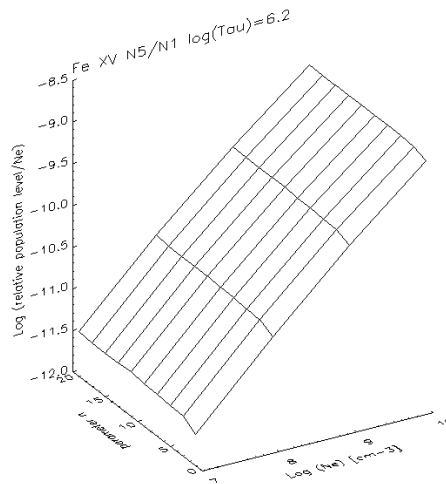
V syntetickom spektre iónov Fe IX až XV pre Maxwellovo rozdelenie ($n=1$) pri konštantnej hustote vidno výrazný pokles výskytu čiar iónov v nižšom stupni ionizácie a naopak nárast výskytu a intenzity čiar iónov vo vyššom ionizačnom stupni pri zvyšovaní teploty, čo je dôsledkom jednak zvýšenia počtu iónov na danom ionizačnom stupni a jednak rastu obsadenia danej excitačnej hladiny s teplotou (obr. 5a, b, c).



a)

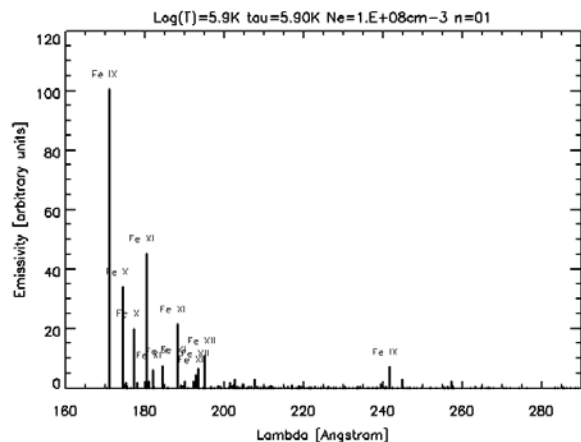


b)

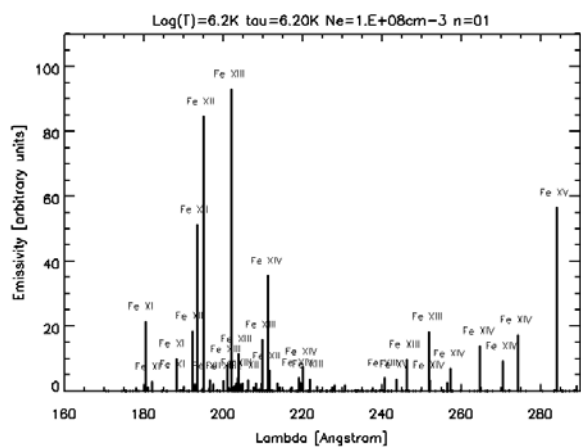


c)

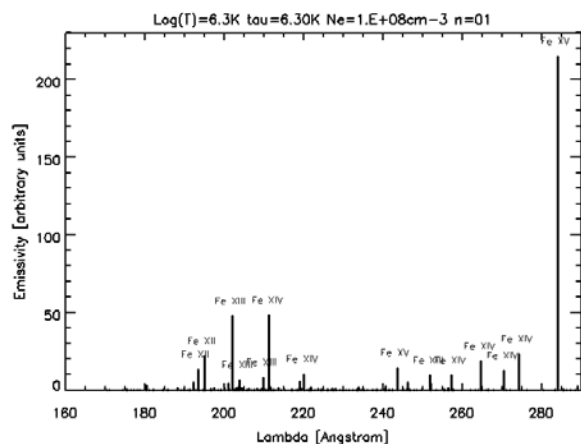
Obr. 4. Relatívne obsadenie hladiny $j=5$ iónu Fe XV v závislosti na logaritme hustoty a parametri n pre teplotu $T=10^{4.2} \text{ K}$ (a) $T=10^{6.2} \text{ K}$ (b) a pseudoteplotu $\tau=10^{6.2} \text{ K}$ (c).



a)



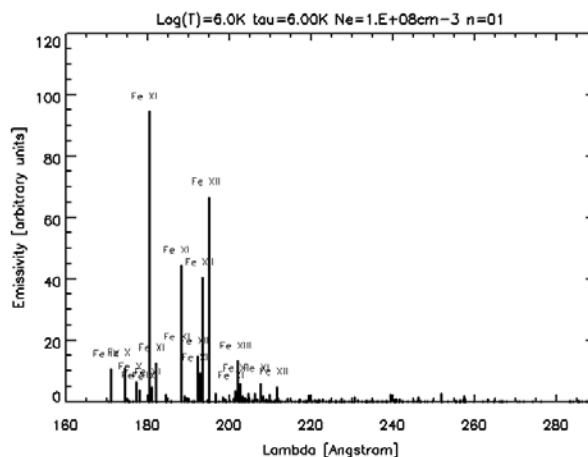
b)



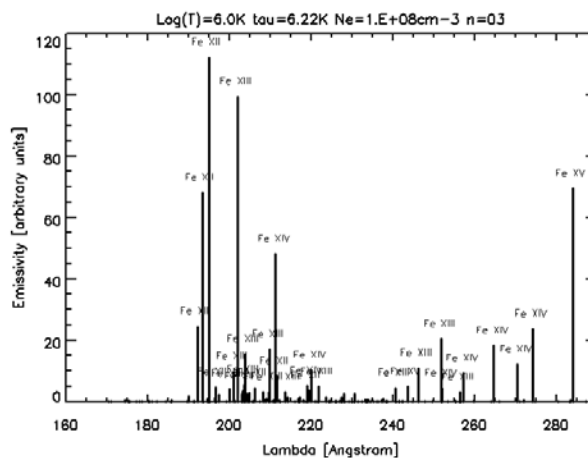
c)

Obr. 5. Syntetické spektrum iónov Fe IX až Fe XV pri teplote $T=10^{5.9}K$ (a), $T=10^{6.2}K$ (b) a $T=10^{6.3}K$ (c) pre Maxwelllovo rozdelenie ($n=1$).

Ak narastá parameter n pri konštantnej teplote, pribúda počet emisných čiar patriacich iónom vo vyššom stupni ionizácie, pretože rastie abundancia takýchto iónov a klesá počet čiar patriacich iónom vo nižšom stupni ionizácie. Efekt je podobný nárastu teploty pre Maxwelllovo rozdelenie, ale vo všeobecnosti intenzity čiar patriace iónom s nízkou abundanciou pri vyššom n sú nižšie v porovnaní s ich intenzitou pre Maxwelllovu distribúciu, pretože s rastom n sa zužuje teplotný interval, v ktorom majú ióny vysokú mieru výskytu (obr. 6). Vyplýva to najmä z ionizačnej rovnováhy (Dzifčáková, 1997).



a)

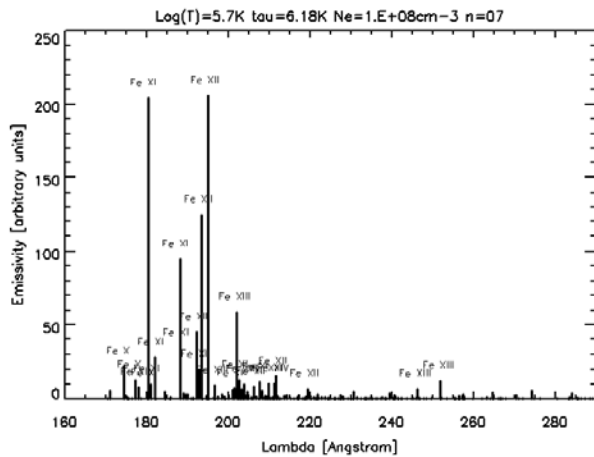


b)

Obr.6. Syntetické spektrum iónov Fe IX až Fe XV pri konštantnej teplote $T=10^6 K$ pre mocinné rozdelenie s hodnotami parametr $n=1$ (a) a $n=3$ (b).

Pri konštantnej pseudoteplote a hustote je lepšie viditeľný samotný vplyv excitačnej rovnováhy na emisivitu daných čiar, pretože, ako vyplýva z ionizačnej rovnováhy (Dzifčáková, 1998), pri

zmeny parametra n je abundancia iónu maximálna pre približne rovnakú pseudoteplotu, kým relatívne obsadenie excitovaných hladín mierne rastie. Pseudoteplota je zároveň lepším približením ako teplota, lebo odpovedá strednej hodnote energie elektrónov a zmeny parametra n len odrážajú vplyv tvaru distribúcie. Na obrázkoch 6b, 7b a 8 sú syntetické spektrá Fe IX až Fe XV pri približne konštantnej pseudoteplote $\tau=10^{6.2}\text{K}$ pre parametre $n=1$ (obr. 5b), $n=3$ (obr. 6b) a $n=7$ (obr. 7). Z obrázkov je zrejmé, že pri konštantnej pseudoteplote a raste parametra n rastie aj intenzita spektrálnych čiar v okolí maxima abundancie daného iónu a tiež klesá interval pseudoteplôt, v ktorom sú spektrálne čiary daného iónu pozorovateľné. Zároveň sa menia relatívne intenzity spektrálnych čiar, čo sa bude dať využiť na diagnostiku tvaru distribučnej funkcie.



Obr. 7. Syntetické spektrum iónov Fe IX až Fe XV pri pseudoteplote $\tau = 10^{6.2}\text{K}$ pre mocinné rozdelenie s parametrom $n=7$.

6. DISKUSIA

Podarilo sa nám ukázať, že zmena tvaru distribučnej funkcie elektrónov mení rýchlosti excitácie, relatívne zastúpenia hladín a intenzity spektrálnych čiar iónov Fe IX až XV. Zostáva ešte nájsť spektrálne čiary, vhodné pre diagnostiku tvaru netepelnej distribúcie, strednej hodnoty energie rozdelenia a hustoty elektrónov. Tieto spektrálne čiary by mali mať dostatočnú intenzitu a mali by byť pozorovateľné družicovým spektrografom. Ale aj po zvládnutí diagnostiky netermálnych distribúcií v koróne zostáva otvorených veľa otázok. Väčšina z nich sa viaže k štandardným problémom diagnostiky nehomogénnej plazmy. K nim sa pridáva fakt, že nepoznáme skutočný tvar netepelnej

distribučnej funkcie elektrónov, ktorá sa môže vyskytovať v koróne, mocninová distribúcia bola prijatá na základe analógie fyzikálnych podmienok v plazme slnečných erupcií s podmienkami v tokamaku, kde sa mocninová distribúcia používa. Zatiaľ bol urobený len prvý krok, boli vypočítané syntetické spektrá pre mocninové distribúcie, ktoré je možné porovnať s pozorovaniami. To môže pomôcť pri budovaní diagnostiky tvaru distribúcií v koróne a prípadne viesť k lokalizácii ich výskytu, čo by umožnilo upresniť fyzikálne podmienky, pri ktorých môžu tieto distribúcie v koróne existovať aj pri nižších teplotách, než aké sú typické pre slnečné erupcie.

POĎAKOVANIE

Táto práca vznikla vďaka podpore grantu VEGA 1/9168/02.

LITERATÚRA

- Burgess, A.; Tully, J. A.: 1992, *Astron. and Astrophys.*, **254**, 436-453, On the Analysis of Collision Strengths and Rate Coefficients
 Džifčáková, E., 1998, *Solar Phys.* **178**, 317
 Gabriel, A. H.; Jordan, C.: 1969, *Monthly Notices Roy. Astr. Soc.* **145**, 241
 Gabriel, A. H.; Phillips, K. J. H.: 1979, *Monthly Notices Roy. Astr. Soc.* **189**, 319
 Mewe, R.: 1972, *Astron. Astrophys.* **20**, 215
 Mewe, R.; Schrijver, J.: 1978, *Astron. Astrophys.* **65**, 99
 Seely, J. F.; Feldman, U.; Doschek, G. A.: 1987, *Astrophys. J.* **319**, 541