

Teze disertace
k získání vědeckého titulu "doktor věd"
ve skupině věd fyzikálně-matematických

**Ne-maxwellovské distribuce elektronů
ve sluneční koróně a přechodové oblasti:
diagnostika a nerovnovážné efekty**

Komise pro obhajoby doktorských dizertací v oboru
astronomie a astrofyzika

Jméno uchazeče Doc. RNDr. Elena Dzifčáková, CSc.

Pracoviště uchazeče Astronomický ústav AV ČR, v.v.i.
Fričova 298
251 65 Ondřejov

Místo a datum Ondřejov, srpen 2017

1. Úvod

Predkladaná doktorská dizertačná práca predstavuje súbor prác, ktoré sú venované vplyvu ne-maxwellovských distribúcií v slnečnej koróne a prechodovej oblasti na ionizačnú a excitačnú rovnováhu, možnostiam ich diagnostiky, schopnosti vysvetliť niektoré pozorovania, ktoré nedokážeme vysvetliť za predpokladu Maxwellovej distribúcie, ako i modelovaniu nerovnovážnych javov pomocou takýchto distribúcií.

Jedným zo základných predpokladov pri interpretácii spektroskopických pozorovaní slnečnej koróny a prechodovej oblasti je Maxwellova distribúcia častíc. Fyzikálne vlastnosti tejto časti slnečnej atmosféry, nízka hustota častíc ($10^{10} - 10^8 \text{ cm}^{-3}$), málopočetné zrážky a vysoká teplota ($10^4 - 10^6 \text{ K}$), však robia tento predpoklad problematický.

Analýza vplyvu netermálnych distribúcií elektrónov na pozorované opticky tenké spektrá emisných čiar predstavuje nový smer výskumu v spektroskopii slnečnej koróny a prechodovej oblasti. Netermálne distribúcie sa v koróne a prechodovej oblasti môžu tvoriť v dôsledku veľkých rozdielov v hustote alebo teplote, ohrevom koronálnej plazmy rekonexiou v erupciách alebo mikroerupciách, niektorými typy vlnení alebo inými fyzikálnymi procesmi. Sú dva typy netermálnych distribúcií. Prvý typ má obvykle termálne jadro a vysokoenergetický chvost a môže sa vyskytovať od prechodovej oblasti, korónu až po erupcie. Modelovať je ich možné buď Maxwellovou distribúciou a mocninovým chvostom alebo tzv. κ -distribúciou (kap. 2). Naopak, druhý typ distribúcií má výrazne užší tvar, vyskytuje sa iba v slnečných erupciách a je reprezentovaný n -distribúciou (kap. 3), často v kombinácii s iným typom distribúcie. Tvar elektrónovej distribúcie silne ovplyvňuje charakter emitovaných opticky tenkých spektier cez zmeny v ionizačnej a excitačnej rovnováhe. Interpretácia takýchto spektier za predpokladu rovnovážnych Maxwellových distribúcií môže viesť k značne rozdielnym výsledkom pri diagnostikovaní parametrov plazmy, predovšetkým teploty.

V prvá časť súboru prác je venovaná κ -distribúciám, ich vplyvu na ionizačnú a excitačnú rovnováhu, diagnostike a ich využitiu k modelovaniu efektov elektrónového zväzku na spektrum. Druhá časť sa zaoberá n -distribúciami, ich vplyvu na ionizačnú a excitačnú rovnováhu, diagnostikou takýchto distribúcií a modelovaním erupčných spektier pre n -distribúcie alebo ich kombinácie s inými typmi distribúcií. Citácie na články zaradené do súboru prác sú označené tučne.

2. Kappa-distribúcie

Priame merania distribučnej funkcie elektrónov družicami dokázali prítomnosť vysoko energetického chvosta v slnečnom vetre a že tieto distribúcie je možné popísať tzv. κ -distribúciami (rovnica 1). Vznik takýchto distribúcií v slnečnom vetre by mohol byť vysvetlený prítomnosťou netermálnych distribúcií v kľudnej koróne alebo v koronálnych dierach, alebo dokonca v prechodovej oblasti (Olbert, 1981). Naznačujú to aj nezrovnalosti v spektroskopických a rádiových pozorovaniach koróny (Pinfield a kol., 1999; Esser a Edgar, 2000; Chiuderi a Chiuderi Drago, 2004; Doyle a kol., 2003, 2004, 2006). Ako ukázali napr. Kašparová a Karlický (2009), Oka a kol. (2013, 2015) emisiu koronálnych RTG zdrojov v slnečných erupciách je tiež možné popísať κ -distribúciou. Vznik κ -distribúcií za prítomnosti turbulencie v slnečných erupciách bol teoreticky odvodený v práci Bian a kol. (2014).

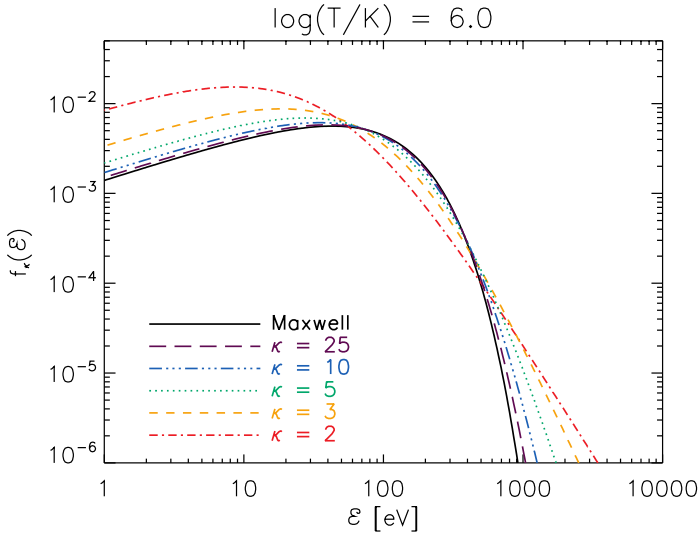
Teoretický základ pre výskum κ -distribúcií v slnečnej koróne položil už Olbert (1968) a Vasyliunas (1968). Shoub (1977a, b, 1983) analyzoval oprávnenosť predpokladu Maxwellovej distribúcie elektrónov v prechodovej oblasti a koróne a ukázal, že tieto distribúcie sa môžu významne líšiť od Maxwellovej distribúcie tak, že vykazujú zvýšený počet častíc vo vysokoenergetickom chvoste. Vznik takejto distribúcie pri nízkych hustotách v nehomogénnej plazme súvisí s rastom strednej voľnej

dráhy elektrónu s druhou mocninou jeho energie. Stredná voľná dráha tak pre vysokorýchlostné elektróny ľahko môže byť dlhšia ako je výšková škála v horných vrstvách slnečnej atmosféry a takéto elektróny môžu prakticky bez zrážky prenikať do oblastí s inou hustotou a teplotou. Formovanie netermálnych distribúcií v prechodovej oblasti a koróne bolo skúmané v prácach Scudder a Olbert (1979), Cupperman, Weis a Dryer (1983), Ljepojevic a MacNiece (1988), Scudder (1992a, b, 1994), Scudder a Karimabadi (2013). Ukázali, že v závislosti na fyzikálnych podmienkach sa tvar distribučnej funkcie elektrónov mení a tiež závisí na polohe a čase.

Fyzikálny základ a vývoj teórie κ -distribúcií je prehľadne podaný napr. v prácach Tsallis (1988, 2009), Collier (2004), Leubner (2004), Livadiotis (2015a, b), Livadiotis a McComas (2009, 2010, 2011, 2013). Kappa-distribúciu je možné popísať rovnicou (napr. Livadiotis a McComas, 2011, Dzifčáková a Dudík, 2013)

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

kde E je energia častice, k_B Boltzmannova konštanta, κ parameter distribúcie a A_{κ} je normalizačná konštanta, $A_{\kappa} = \Gamma(\kappa + 1) / (\Gamma(\kappa - 1.5)(\kappa - 1.5)^{3/2})$. Teplota T v κ -distribúcii má ten istý vzťah k strednej energii distribúcie ako Maxwelllova distribúcia, $\langle E \rangle = 3k_B T / 2$ a parameter κ modeluje tvar distribúcie. Silne nemaxwellovská distribúcia je pre $\kappa \rightarrow 1.5$ a κ -distribúcia prechádza na Maxwelllovu distribúciu v limite pre $\kappa \rightarrow \infty$. S poklesom κ rastie počet vysokoenergetických častíc, maximum distribúcie sa posúva k nižším energiám ($E_{max} = k_B T(\kappa - 1.5) / \kappa$), rastie aj počet nízkoenergetických častíc, ale stredná energia častíc zostáva konštantná (Obr. 1).



Obr. 1. Porovnanie Maxwellovej distribúcie s κ -distribúciami pre $\kappa = 25, 10, 5, 3$ a 2 . Všetky distribúcie majú tú istú hodnotu strednej energie častíc odpovedajúcu $T = 10^6$ K.

2.1. Ionizačná rovnováha

Owocki a Scudder (1983) ako prví použili κ -distribúciu na vysvetlenie pomeru iónov O VII / O VIII a Fe XII / Fe XIII v slnečnom vetre. Ionizačná rovnováha železa pre kappa-distribúcie v slnečnej koróne a prechodovej oblasti bola prvýkrát publikovaná v Dzifčáková (1992). Práce Dzifčáková (2002), **Dzifčáková a Kulinová (2003)**, Wannawichian a kol., 2003, **Dzifčáková a Dudík (2013)** a Hahn a Savin (2015) na túto prácu naväzujú. Reagujú na nové atómové dáta a rozširujú rozsah parametrov κ . Kým staršie práce obsahuje len abundancie iónov železa (Dzifčáková, 2002), resp. uhlíka a kyslíka (**Dzifčáková a Kulinová, 2003**), novšie výpočty (napr. **Dzifčáková a Dudík,**

2013) pokrývajú prvky od vodíka až po zinok a elektronické súbory majú formát, ktorý používa CHIANTI. CHIANTI je široko používaný software a databáza na výpočet maxwellovských spektier (Dere a kol., 1997; Landi a kol., 2013, Del Zanna a kol., 2015).

V koronálnych podmienkach je ionizačná rovnováha daná rovnováhou medzi priamou ionizáciou elektrónom s auto-ionizáciou na jednej strane a žiarivou a dielektronickou rekombináciou na strane druhej. Rýchlosti jednotlivých procesov procesov sú obecné definované ako integrál súčinu zrážkového prierezu s rýchlosťou cez distribučnú funkciu.

Prítomnosť kappa-distribúcie silne ovplyvňuje najmä rýchlosť ionizácie, efekt závisí na teplote, ióne a hodnote parametra κ . K najväčšiemu nárastu rýchlosti ionizácie, až o niekoľko rádov, dochádza pri teplotách niekoľkonásobne nižších ako je teplota odpovedajúca maximu výskytu daného iónu pre Maxwellovo rozdelenie. Je to spôsobené vysokoenergetickým chvostom κ distribúcie a teda nárastom počtu elektrónov, ktoré sú schopné ionizovať. Rýchlosť rekombinácie žiarením je ovplyvnená menej, typický je nárast asi na dvojnásobok pre silne nemaxwellovskú κ -distribúciu s $\kappa = 2$. Vysvetlenie je jednoduché. Zrážkový prierez pre tento proces klesá s energiou elektrónov a keďže v κ -distribúcii je viac nízkoenergetických elektrónov v porovnaní s Maxwellovou distribúciou s tou istou strednou energiou častíc (obr. 1), rýchlosť rekombinácie žiarením je pre κ -distribúcie vyššia. Zmeny v dielektronickej rekombinácii tiež súvisia s tvarom distribučnej funkcie, pre κ distribúcie je jej pík širší a nižší.

Vypočítané ionizačné rovnováhy pre κ -distribúcie vykazujú rozšírenie abundančného píku iónu. To znamená, že jednotlivé ióny môžu existovať v širšom intervale teplôt s relatívne vysokými abundanciami v porovnaní s Maxwellovou distribúciou. Maximá abundancií iónov tiež môžu byť posunuté. Posun k nižším teplotám je veľmi výrazný v prechodovej oblasti, aj viac ako pol rádu pre $\kappa = 2$. Naopak v koróne, pre teploty vyššie

ako 10^6 K, môžeme typicky pozorovať malé posuny abundančných maxím jednak k nižším teplotám, najmä pre menšie odchýlky od Maxwellovej distribúcie, ale aj k vyšším teplotám, typicky pre veľké odchýlky od Maxwellovej distribúcie a pre vysoké teploty.

2.2 Excitačná rovnováha

Vplyv netermálnych κ -distribúcií na excitačnú rovnováhu bol študovaný v prácach **Dzifčáková a Kulinová (2003)**, **Dzifčáková (2006)**, **Dzifčáková a Mason (2008)**, **Dzifčáková a kol. (2015)**, diagnostike sú venované práce **Dzifčáková a Kulinová (2010)**, **Dzifčáková a Kulinová (2011)**, **Mackovjak, Dzifčáková a Dudík (2013)**, Dudík a kol., (2015). Ucelený prehľad je publikovaný v **Dudík, Dzifčáková a kol. (2017)**.

Pri teplotách (rádovo 10^4 - 10^8 K) a hustotách elektrónov (10^{12} - 10^8 cm^{-3}) odpovedajúcim prechodovej oblasti a koróne, vrátane erupcií, dominuje excitácia zrážkou s elektrónom a de-excitácia spontánnym vyžiarením fotónu. Distribučná funkcia vplýva na rýchlosť excitácie, resp. de-excitácie zrážkou s velektrónom.

Hlavným problémom pri výpočte excitačnej rovnováhy pre netermálne distribúcie býva, až na výnimky, nedostupnosť väčšiny zrážkových prierezov, resp. z nich odvodených síl zrážky, a to najmä z dôvodu ich nárokov na veľkosť súborov. Preto sú obvykle publikované iba integrály súčinu zrážkového prierezu s rýchlosťou cez Maxwellovu distribúciu, rýchlosti excitácie. To je aj prípad najrozsiahlejšej a slnečnými astronómami najčastejšie používanej databázy a softvéru CHIANTI. Preto **Dzifčáková (2000)**, **Dzifčáková (2006)**, **Dzifčáková a kol. (2015)** vyvinula unikátnu inverznú metódu, vďaka ktorej je možnéj aproximovať silu zrážky analytickou funkciou z jeho integrálov. Metóda využíva typické chovanie síl zrážky v limitách pre jednotlivé typy prechodov medzi hladinami atómu, resp. iónu. Bola testovaná v **Dzifčáková a Mason (2008)** a **Dzifčáková a kol. (2015)**.

Porovnanie výpočtov excitačných rýchlostí pomocou aproximácie s výpočtami priamo zo známej sily zrážky ukázalo, že vo väčšine prípadov je presnosť vyššia ako niekoľko percent, odchýlky narastajú s poklesom κ , pričom pre $\kappa=2$ extrémne odchýlky nepresahujú 10 %, čo je typická presnosť atómových dát.

Prítomnosť κ -distribúcie mení rýchlosť excitácie, pričom zmeny závisia na type atómového prechodu, jeho excitačnej energii, teplote a parametre κ (**Dzifčáková a Kulinová, 2003, Dzifčáková, 2006, Dzifčáková a kol., 2015**). Typický je veľký nárast rýchlosti excitácie pre nízke teploty, až o niekoľko rádov pre $\kappa=2$ v porovnaní s Maxwellovou distribúciou a nižšie rýchlosti excitácie v porovnaní s Maxwellom pre vyššie teploty. (**Dzifčáková, 2006**). Riešenie rovníc štatistickej rovnováhy potom umožňuje vypočítať intenzity spektrálnych čiar ako integrál z emisivity pozdĺž zorného lúča, ktorý v rovnovážnom stave závisí jednak na ionizačnej a jednak na excitačnej rovnováhe v plazme.

2.3 Efekty a diagnostika

Znalosť aproximácie zrážkových prierezov, resp. síl zrážok umožnila naviazať na existujúci Maxwellovský softvér a databázu CHIANTI a vytvoriť databázu a softvér KAPPA, ktoré umožňujú výpočet syntetických spektier pre κ -distribúcie (**Dzifčáková a kol. 2015**). Znalosť intenzít spektrálnych čiar pre κ -distribúcie umožnila navrhovať diagnostiku parametrov plazmy a distribučnej funkcie z pomerov intenzít spektrálnych čiar. Ako ukázala napr. **Dzifčáková a Kulinová (2010)**, diagnostiku elektrónovej hustoty je možné v koróne urobiť nezávisle na κ a T a väčšina pomerov čiar iónov, ktoré sa takto v spektroskopii slnečnej koróny využívajú, nie je príliš citlivá na prítomnosť κ -distribúcií, takže chyba v určení hustoty spôsobená neznalosťou distribúcie je obvykle menšia ako chyba spôsobená nepresnosťou pomeru intenzít použitých spektrálnych čiar. Diagnostika hustoty predstavuje prvý krok k diagnostike ostatných parametrov plazmy,

pretože prakticky všetky pomery intenzít spektrálnych čiar iónov vyskytujúcich sa v koróne pri teplotách niekoľko miliónov K sú citlivé aj hustotu. Výnimku z tohoto pravidla predstavujú čiary iónu Fe XVII a niektorých ďalších Fe iónov vo vysokom stupni ionizácie, ktoré pozorujeme v slnečných erupciách pri teplotách vyšších ako 10^7 K.

Ďalšie dva parametre, teplota a κ , sú spolu zviazané a je ich nutné diagnostikovať zároveň. K tomu sa používajú dva nezávislé pomery intenzít spektrálnych čiar, čo vyžaduje znalosť intenzity minimálne troch spektrálnych čiar. Jeden z pomerov musí byť citlivý hlavne na κ -distribúciu. Obvykle sú to čiary vznikajúce z energetických hladín iónu s rozdielnou excitačnou energiou. U druhého pomeru by mala dominovať citlivosť na teplotu. Je možné použiť jednak čiary jediného iónu, jednak čiary iónov v rozličných stupňoch ionizácie. Prvý typ diagnostiky je menej citlivý na multitermalitu pozorovanej plazmy a odchýlky od ionizačnej rovnováhy napr. pri dynamických javoch, ale zmeny pomerov intenzít čiar s distribúciou sú väčšinou malé v porovnaní s chybami v určení pomerov pozorovaných intenzít. Druhý typ diagnostiky využíva fakt, že ku zmenám v excitačnej rovnováhe sa pridávajú zmeny v ionizačnej rovnováhe, čím narastá rozsah zmien s distribučnou funkciou. Takáto diagnostika je však citlivejšia na multitermalitu a odchýlky od ionizačnej rovnováhy v plazme. Návrh a možnosti EUV diagnostiky κ -distribúcií spektrometrom EIS na družici Hinode pre Fe boli prvýkrát analyzované v **Dzifčáková a Kulinová (2010)**, a pre ostatné prvky v **Mackovjak, Dzifčáková a Dudík (2013)**. Prezentované možnosti diagnostiky využívali rovnaké atómové dáta ako CHIANTI ver. 7.1. Pre novšie atómové dáta bola ďalšia diagnostika navrhnutá a úspešne použitá v práci Dudík a kol. (2015), kde pre koronálnu slučku bola diagnostikovaná hodnota $\kappa \leq 2$.

Obecne platí, že k úspešnej diagnostike κ distribúcie je potrebná veľká presnosť intenzít pozorovaných čiar, čo vyžaduje jednak kvalitnú fotónovú štatistiku a jednak veľkú presnosť kalibrácie spektrografu. Vzhľadom na relatívne veľkú, až 20%

chybu kalibrácie EUV spektrometra EIS na družici Hinode, ktorý je hlavným zdrojom v súčasnosti používaných spektroskopických dát, predstavuje takýto druh diagnostiky aj problém (**Dzifčáková a Kulinová, 2010, Mackovjak, Dzifčáková a Dudík, 2013, Dudík, a kol., 2015**). Aj s použitím špeciálne navrhnutého EIS pozorovania je možné spoľahlivo diagnostikovať iba veľmi nízke hodnoty parametra κ blízke hodnote 2 (Dudík a kol. 2015).

Kappa-distribúcie sú schopné vysvetliť niektoré pozorované anomálne zvýšenia intenzít čiar v prechodovej oblasti. Pinfield a kol. (1999) prišli k záveru, že pomery intenzít čiar Si III pozorovaných spektrografom SUMER na družici SoHO (Wilhelm et al., 1995) vykazujú znaky prítomnosti netermálnej distribúcie. **Dzifčáková a Kulinová (2011)** využili tieto pozorovania a ukázali, že pozorované relatívne intenzity čiar Si III odpovedajú κ -distribúcii, pričom stupeň odchýlky od Maxwelllovej distribúcie závisí na type študovanej oblasti na Slnku. Najvyššia odchýlka je v aktívnej oblasti ($\kappa \approx 7$) a najnižšia v koronálnej diere ($\kappa \approx 11$). Zároveň poukázali na dôležitosť započítania fotoexcitácie do výpočtu teoretických intenzít spektrálnych čiar v prechodovej oblasti. Neskôr ale Del Zanna a kol. (2015) ukázali, že nové atómové dáta pre Si III vedia vysvetliť pozorované intenzity čiar Si III v koronálnej diere a kľudnom Slnku, ale pre aktívnu oblasť to nedokázali a prítomnosť κ -distribúcie zostáva stále aktuálnym vysvetlením pozorovania.

Kappa-distribúcie, resp. distribúcie s vysoko-energetickým chvostom tiež dokážu ozrejmiť prekvapujúce pozorovanie 3-min. oscilácií nad slnečnými škvrnami v čiarach Fe IX pozorovaných družicou TRACE filtrom 171 Å (**Doyle, Dzičáková, Madjarska, 2003**). V intenzitách žiadneho iného koronálneho iónu takéto oscilácie neboli pozorované. Vysvetlením môže byť posun abundančného maxima Fe IX so zmenou distribučnej funkcie elektrónov. Kým pre Maxwellovu distribúciu maximum výskytu iónu Fe IX odpovedá koronálnej teplote $\approx 10^6$ K, pre $\kappa=2$ sa maximum výskytu iónu Fe IX posúva na nižšiu teplotu v prechodovej oblasti, 5×10^5 K, a zosúladňuje toto pozorovanie s ostatnými pozorovaniami oscilácií v prechodovej oblasti Slnka.

Okrem výpočtu intenzít spektrálnych čiar, ktoré je možné použiť na skúmanie vplyvu κ -distribúcií na vzhľad spektra a návrh diagnostiky distribúcií, KAPPA softvér umožňuje aj výpočet netermálneho kontinua (**Dzifčáková a kol., 2015**). Vplyv netermálnych distribúcií na tvar kontinua bol detailne popísaný v Dudík a kol. (2012). Pre teploty vyskytujúce sa v slnečných erupciách a v RTG oblasti, κ -distribúcie spôsobujú výrazný nárast intenzity spojitého brzdného žiarenia a vytvárajú výrazný vysokoenergetický chvost. S poklesom hodnoty κ sa maximum brzdného žiarenia posúva k vyšším vlnovým dĺžkam a zároveň rastie výška ionizačných hrán vo voľno-viazanom kontinuu.

Znalosť intenzít spektrálnych čiar a kontinua pre κ -distribúcie umožňuje určiť vplyv elektrónovej distribúcie na žiarivé straty plazmy (**Dudík a kol., 2011**). Až na výnimky (vysoké teploty a nízke hodnoty κ), pre danú teplotu sú žiarivé straty väčšinou nižšie a ich maximá sú pre κ -distribúciu plochejšie než vykazuje funkcia žiarivých strát pre Maxwellovu distribúciu. Zmeny v čiarovej emisii a kontinuu sa tiež premietajú do teplotných odoziev EUV filtrov. Tie boli počítané v práci Dudík a kol. (2009) pre EUV filtre na družici TRACE a v **Dzifčáková a kol. (2015)** pre AIA filtre na družici Hinode. V porovnaní s Maxwellovou distribúciou, teplotné odozvy EUV filtrov pre κ -distribúcie sú viac vyhladené, majú plochejšie maximá a sú posunuté smerom k vyšším teplotám s poklesom hodnoty κ . Tak isto môžu miznúť niektoré sekundárne maximá. Je to spojené s vplyvom κ -distribúcií na ionizačnú rovnováhu, ktorá rozširuje abundančné maximá jednotlivých iónov.

Prítomnosť κ -distribúcií má veľký vplyv najmä na diagnostiku teploty. Pre opticky tenkú nehomogénnu multitermálnu plazmu je možné z pozorovaných intenzít spektrálnych čiar odvodiť tzv. diferenciálnu mieru emisie (DEM), ktorá popisuje distribúciu teploty v pozorovanej plazme. K tomu sa využíva závislosť intenzít spektrálnych čiar na teplote. Keďže elektrónová distribúcia mení túto závislosť, distribučná funkcia mení aj tvar DEM. V práci **Mackovjak, Dzifčáková a Dudík**

(2014) boli dvoma nezávislými metódami vypočítané DEM pre aktívne oblasti a oblasť kľudného Slnka za predpokladu jednak Maxwellovej distribúcie a jednak κ -distribúcií s rozličnými hodnotami parametra κ . Pre aktívne oblasti bolo ukázané, že závislosť DEM na teplote je pre κ -distribúcie širšia a plochejšia s maximom posunutým k vyšším teplotám než DEM pre Maxwellovu distribúciu. Naopak, v oblasti kľudného Slnka je DEM pre $\kappa = 2$ veľmi úzke a plazma sa javí viac-menej izotermálna v porovnaní s multitermálnym DEM pre Maxwellovu distribúciu.

Dudík a kol. (2014) ukázali, že čiary v prechodovej oblasti pozorovateľné družicou IRIS sú citlivé na κ -distribúciu a navrhli aj diagnostiku parametra κ . Pre teoreticky vypočítané distribučné funkcie to bolo urobené v prácach **Vocks, Dzifčáková a Mann (2016)** a **Dzifčáková, Vocks a Dudík (2017)**, ktoré využívajú model prechodovej oblasti na Slnku k výpočtu elektrónových distribúcií pomocou Boltzmann-Vlasovovej rovnice a pre tieto distribúcie modelujú syntetické spektrá. Elektróny s nadteplnými rýchlosťami môžu prechádzať cez strmý teplotný gradient prechodovej oblasti smerom do chromosféry prakticky bez zrážky a formujú vysokorýchlostný chvost. Množstvo častíc vo chvoste a ich distribučná funkcia závisí na výške v prechodovej oblasti a na parametroch samotného modelu, najmä strmosti teplotného gradientu. Už relatívne malý počet elektrónov vo vysokoenergetickom chvoste (niekoľko %) vedie k veľkým zmenám v ionizačnej rovnováhe, ionizačné píky sú výrazne rozšírené a posunuté smerom k nižším teplotám v porovnaní s Maxwellovou distribúciou. Výpočet syntetických intenzít spektrálnych čiar pre tento model v spektrálnej oblasti, ktorú môže pozorovať družica IRIS, ukázal relatívne zvýšenie intenzít čiar Si IV vzhľadom k čiarom O IV v porovnaní s Maxwellom, čo je v súlade s pozorovaniami. Je zrejmé, že prítomnosť vysokoenergetického chvosta je vhodným vysvetlením viacerých problematických pozorovaní v prechodovej oblasti (napr. **Dzifčáková a Kulinová, 2011, Doyle, Džifčáková, Madjarska, 2003, Doyle a kol., 2004, Dudík a kol., 2014, 2017**). Ukazuje sa,

že okrem netermálnej distribúcie elektrónov tam môže byť prítomná aj netermálna distribúcia iónov, keďže pozorovania profilov spektrálnych čiar v prechodovej oblasti vykazujú typické vysoké krídla odpovedajúce κ -distribúcii iónov s hodnotami $\kappa \approx 2$ (Jeffrey a kol. 2016, Dudík a kol., 2017).

2.4 Nerovnovážna ionizácia

Kappa-distribúcie spolu s KAPPA softvérom a databázou umožňujú aj úspešné modelovanie efektov krátkodobej prítomnosti elektrónového zväzku v maxwellovskej plazme na spektrum. Všeobecne sa predpokladá, že k ohrevu koróny dochádza prostredníctvom nanoerupcií, ktoré môžu byť rekurentné. Ďalší z možných mechanizmov ohrevu koróny predstavujú najrozličnejšie typy vlnení. Nanoerupcie a aj niektoré typy vln produkujú vysokoenergetické častice, ktoré v pôvodne maxwellovskej plazme vytvárajú vysokoenergetický chvost. Takáto maxwellovská plazma spolu s elektrónovým zväzkom je podobná erupčnej plazme a môže byť modelovaná kappa-distribúciou. **Dzifčáková, Dudík a Mackovjak (2016)** modelovali spektrá Fe iónov v typických podmienkach slnečnej koróny za predpokladu prítomnosti periodického elektrónového zväzku. Predpokladali, že jednu polperiódu je plazma maxwellovská a druhú polperiódu je zväzok elektrónov spolu s maxwellovskou plazmou modelovaný pomocou κ -distribúcie. Parameter κ pritom modeluje množstvo častíc vo zväzku a podiel energie zväzku k celkovej energii častíc v distribúcii. Vybrané boli periódy niekoľko desiatok sekúnd, čo je podobný, alebo kratší čas ako je typická expozičná doba družicových spektrometrov. Časovo závislé nerovnovážne ionizačné stavy boli použité na výpočet okamžitých spektier a ich priemerov cez zvolenú periódu, ako ukážka spektier, ktoré by bolo možné pozorovať napr. prístrojom EIS. Výsledné spriemerované spektrá sa takmer vždy javili ako multitermálne, bez ohľadu na to, či boli interpretované za predpokladu Maxwellovej alebo κ -distribúcie. Charakter

multitermality v modeli bol pritom podobný typickým pozorovaniam koronálnych slučiek. Výnimkou boli takmer izotermálne spektrá pre kombinácie niektorých nízkych hodnôt κ s krátkymi periódami. Okamžité spektrá pritom vykazovali rýchle zmeny v intenzitách spektrálnych čiar. Modelovanie ukázalo, že ak sa plazma v koronálnych štruktúrach javí ako multitermálna, môže to byť dôsledok nerovnovážnej ionizácie spôsobenej ohrevom alebo chladnutím koronálnej plazmy.

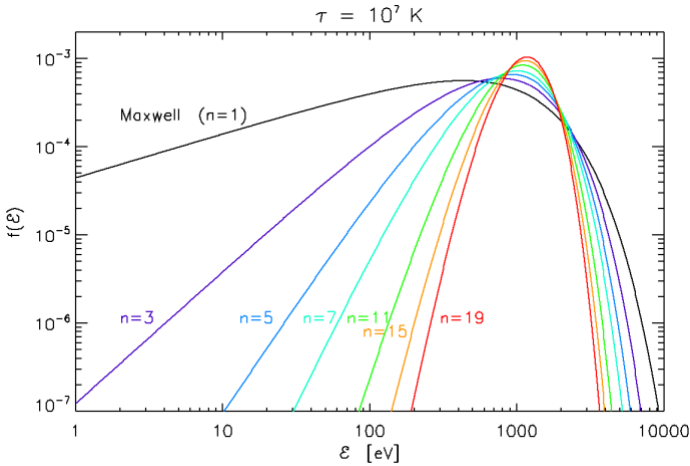
3. *N*-distribúcia

Netermálna *n*-distribúcia je predstaviteľom druhej skupiny netermálnych distribúcií, ktoré sú v porovnaní s Maxwellovou distribúciou užšie, viac monoenergetické a majú vyššie maximum (obr. 2). Ako prvý použili tento typ distribúcie Seely, Feldman a Doshek (1987) pri analýze spektier troch slnečných erupcií na vysvetlenie relatívnych intenzít satelitných čiar Fe XXIVd ku rezonančnej čiare Fe XXV. Využili ideu z práce Gabriel a Phillips (1979) ktorí ukázali, že distribučnú funkciu elektrónov je možné diagnostikovať z pomerov dovolených a satelitných čiar, ktoré vznikajú pri dielektronickej rekombinácii. Kým u dovolených čiar je rýchlosť excitácie daná integrálom od excitačnej energie, intenzita satelitných čiar okrem atómových parametrov závisí na priamo na počte elektrónov s energiou rovnajúcou sa energii dvakrát excitovaného stavu, takže satelitné čiary "vzorkujú" distribučnú funkciu. Táto ich vlastnosť je veľmi výhodné pre diagnostiku tvaru distribučnej funkcie. Keďže satelitné čiary sú obvykle pozorovateľné v RTG oblasti pre hélia alebo lítiu podobné ióny, tento typ diagnostiky sa používa hlavne v slnečných erupciách.

N-distribúciu je možné popísať rovnicou (napr. **Dzifčaková a Dudík, 2015**):

$$f(E)dE = B_n \frac{2}{k_B T \sqrt{\pi}} \left(\frac{E}{k_B T} \right)^{n/2} \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) dE, \quad (2)$$

kde $B_n = \sqrt{\pi}/(2\Gamma(1 + n/2))$ je normalizačná konštanta a n a T sú parametre distribúcie. Pre $n = 1$ n -distribúcia prechádza na Maxwellovu distribúciu a T je jej teplota. S rastom hodnoty n rastie odchýlka n -distribúcie od Maxwellovej. Stredná energia n -distribúcie rastie s hodnotou n , $\langle E \rangle = (1 + n/2)k_B T$. Preto Dzifčaková (1998) zaviedla tzv. pseudoteplotu $\tau = T(n + 2)/3$, ktorá má rovnaké vyjadrenie strednej energie ako Maxwellova distribúcia, $\langle E \rangle = \frac{3}{2}k_B \tau$.



Obr. 2. Porovnanie Maxwellovej distribúcie ($n = 1$) s n -distribúciami pre $n = 3, 5, 7, 11, 15$ a 19 . Všetky distribúcie majú tú istú hodnotu strednej energie častíc odpovedajúcu $\tau = 10^7$ K.

Znalosť ionizačnej rovnováhy pre n -distribúcie je dôležitá hlavne pri analýze spektier slnečných erupcií a pre Fe bola prvý

raz publikovaná v Dzifčáková (1998). Neskôr bola dopočítavaná pre niektoré ďalšie ióny (Dzifčáková 2005, Dzifčáková a Kulinová, 2006), hlavne z diagnostických dôvodov. Až **Dzifčáková a Dudík (2015)** vypočítali ionizačnú rovnovahu v slnečnej koróne pre n -distribúcie od $n = 1$ (maxwellovská distribúcia) až po $n = 19$ (silne ne-maxwellovská distribúcia) pre všetky prvky od vodíka až po zinok a pre posledné atómové dáta. Ionizačné rýchlosti pre n -distribúcie majú oveľa strmší nárast pre nízke pseudoteploty v porovnaní s maxwellovskými. Keďže n -distribúcie majú nižší počet častíc s nízkymi energiami, s rastom n klesá rýchlosť žiarivej rekombinácie. Výsledkom je, že iónové abundančné piky sú typicky užšie a strmšie ako maxwellovské a tiež môžu byť posunuté, väčšinou k vyšším teplotám. Výnimkou sú ióny hélia, ktoré môžu byť formované v širšom intervale teplôt ako pre Maxwellovu distribúciu, čo je dôležité najmä pri analyzovaní spektroskopických pozorovaní erupcií. Elektronický formát výsledkov má opäť CHIANTI formát.

Vplyv n -distribúcie na rýchlosť excitácie zrážkou s elektrónom bol študovaný v Dzifčáková (2000), Dzifčáková a Kulinová (2001) a **Dzifčáková a Tóthová (2007)**. Rýchlosť excitácie v závislosti na pseudo-teplote pre n -distribúcie má vyššie a ostrejšie maximum ako pre Maxwellovu distribúciu. **Dzifčáková a Tóthová (2007)** vypočítali aj excitačnú rovnovahu iónov Fe pre n -distribúciu. Ukázali, že čiary iónov s vysokou intenzitou sa vyskytujú v užších intervaloch pseudo-teploty a ukázali zmeny v syntetických spektrách s distribučnou funkciou. Tiež navrhli diagnostiku pre dovolené čiary Fe v pozorovateľné spektrometrom Hinode/EIS v slnečnej koróne.

Pre slnečné erupcie **Dzifčáková a kol. (2008)** navrhli diagnostiku distribučnej funkcie z čiar Si XIV, Si XIII a Si XII_d, ktoré boli pozorované vo 4. kanáli RTG spektrografu RESIK (Sylwester a kol., 2005), ktorý pokrýval oblasť 5 - 6 Å. Analyzovali erupciu zo 7./8. januára 2003 pozorovanú RESIK-om. Počas impulznej fázy erupcie boli pozorované veľmi vysoké intenzity satelitných čiar Si XII_d v porovnaní s maxwellovským spektrom a v závere erupcie sa spektrum stávalo maxwellovské.

Podarilo sa im tiež ukázať, že spektrá pre n -distribúciu oveľa lepšie odpovedajú pozorovaným relatívnym intenzitám čiar Si než spektrá vypočítané za predpokladu multitermálnej maxwellovskej plazmy. Problematické zostali len intenzity dovolených čiar Si XIII 5.28 Å a Si XIII 5.40 Å vznikajúce z vyššie položených excitačných hladín, tam n -distribúcia predpovedala nižšie intenzity ako boli pozorované. Kulínová a kol. (2011) nadviazali na túto prácu a ukázali, že v spojitom RTG spektre pozorovanom družicou RHESSI je možné v rámci chyby diagnostikovať n -distribúciu s rovnakými parametrami ako z čiarového spektra spektrografu RESIK. Tento výsledok reprezentuje silný argument pre prítomnosť n -distribúcií v impulznej fáze slnečných erupcií.

Diagnostika založená na čiarových spektrách pozorovaných spektrometrom RESIK je citlivá a v mäkkej RTG oblasti okolo 1 - 7 keV. Spojité RHESSI spektrá pozorované v oblasti vyšších energií, nad 10 keV, však dokazujú prítomnosť mocninového vysokoenergetického chvosta, čo je úplne iný typ distribúcie ako je n -distribúcia. Zdá sa, že v erupciách je možný súčasný výskyt oboch typov distribúcií.

Prítomnosť n -distribúcie počas slnečných erupcií je obvykle spojená s prítomnosťou zväzku elektrónov. Tento zväzok elektrónov predstavuje elektrický prúd, ktorý by mal byť neutralizovaný tzv. spätným prúdom. **Dzifčáková a Karlický (2008)** preto navrhli jednoduchý model, v ktorom je elektrónový zväzok modelovaný ako monoenergetický a v miestach, ktorými prechádza cez korónu a prechodovú oblasť, je kompenzovaný spätným prúdom, ktorý je formovaný všetkými elektrónmi v plazme s rovnakou driftovou rýchlosťou. Vzhľadom na konštantnú hustotu elektrónového zväzku a poklesu elektrónovej hustoty s výškou v slnečnej atmosfére, efekty spätného prúdu sú najsilnejšie v slnečnej koróne. Elektrónový zväzok spolu so spätným prúdom mení relatívne zastúpenie iónov a intenzity spektrálnych čiar v koróne aj prechodovej oblasti. Obecne rastie stupeň ionizácie, ktorý je silne ovplyvnený hlavne prítomnosťou elektrónového zväzku. To vedie k extrémnemu nárastu intenzít niektorých spektrálnych čiar prechodovej oblasti, napr. čiar C IV,

ktoré sú typicky pozorované počas erupcií. Tento nárast intenzity môže byť až o niekoľko rádov a je podobný vplyvu κ -distribúcie na spektrá. V slnečnej koróne výrazne zmenený tvar distribučnej funkcie elektrónov so spätným prúdom, podobný n -distribúcii, zvyšuje relatívne intenzity satelitných čiar. Syntetické spektrá Si vypočítané pre RTG oblasť, v ktorej pozoroval RESIK, majú vysoké relatívne intenzity satelitných čiar vzhľadom k dovoleným čiarom v porovnaní s maxwellovskými spektrami a odpovedajú pozorovaniu počas impulznej fázy erupcií.

Kombinácia mocninového vysokoenergetického chvosta a n -distribúcie na pozorované spektrum bola analyzovaná v práci **Dzifčáková, Homola a Dudík (2011)**, kde bola študovaná ionizačná rovnováha a počítané syntetické erupčné spektrá pre takto zložené distribúcie. Predpokladalo sa, že jadro distribúcie je tvorené buď Maxwellovou alebo n -distribúciou a počet elektrónov vo vysokoenergetickom chvoste klesá s mocninou energie. Tvar distribúcie bol modelovaný zmenou pomeru hustoty jadra distribúcie k vysokoenergetickému chvostu. Vypočítané ionizačné rovnováhy boli ovplyvnené jednak tvarom jadra distribúcie ako aj vysokoenergetickým chvostom. Ukázalo sa však, že kým vysokoenergetický chvost ionizačnú rovnováhu iba posúva k nižším teplotám, n -distribúcia mení aj tvar abundančných píkov a relatívne pomery iónov. Podarilo sa dokázať, že n -distribúcia v kombinácii s vysokoenergetickým chvostom je schopná produkovať spektrá so zvýšenými intenzitami satelitných čiar odpovedajúce pozorovaniu, pričom tento efekt takmer nezávisí na smernici vysokoenergetického chvosta. Maxwellova distribúcia s vysokoenergetickým chvostom takéto spektrá vyprodukovať nedokáže.

Fyzikálne podmienky formovania n -distribúcie sú stále neznáme. Karlický, Dzifčáková a Dudík (2012) analyzovali vzťah medzi n -distribúciou a posunutou Maxwellovou distribúciou formovanou spätným prúdom, a našli aj vzťah medzi parametrom n a driftovou rýchlosťou. Problém ale predstavujú vysoké hodnoty parametra n diagnostikované v RESIK spektrách, ktoré v posunutej Maxwellovej distribúcii vyžadujú driftovú rýchlosť

niekoľkonásobne vyššiu ako je tepelná rýchlosť pôvodnej Maxwellovej distribúcie. V takýchto prípadoch je posunutá Maxwellova distribúcia nestabilná, formuje sa tzv. Bunemanova nestabilita, ktorá výrazne mení tvar distribúcie. Z toho vyplýva, že ak je n -distribúcia formovaná spätným prúdom, musia existovať nejaké stabilizačné procesy.

Ďalší pokus vysvetliť n -distribúciu predstavujú práce Karlický (2012) a **Dzifčáková, Karlický a Dudík (2013)**. Karlický (2012) ukázal, že distribúcia podobná n -distribúcii sa môže formovať v blízkosti elektrickej dvojvrstvy, kde dochádza k urýchľovaniu elektrónov. **Dzifčáková, Karlický a Dudík (2013)** potom numericky počítali syntetické čiarové spektrá Si XII d - Si XIV v RTG oblasti 5 - 6 Å pozorovateľné spektrogramom RESIK pre distribúcie zložené z elektrónov urýchlených na elektrickej dvojvrstve a maxwellovského pozadia. Charakter spektra a zvýšenie intenzít satelitných čiar závisí na relatívnej hustote maxwellovského pozadia k hustote elektrónov urýchlených v elektrickej dvojvrstve. Najväčší súhlas modelovaných RTG spektier s pozorovaním bol dosiahnutý pre hustoty maxwellovského pozadia na úrovni 50% - 10% hustoty elektrónov urýchlených v elektrickej dvojvrstve.

Oba pokusy vysvetliť n -distribúciu sú síce schopné vysvetliť niektoré vlastnosti n -distribúcie, hlavne tvar jej vysokoenergetickej časti, ale oba narážajú na určité problémy. Vysvetlenie cez spätný prúd má problém so stabilitou riešenia, keďže vyžaduje vysoké driftové rýchlosti. Vysvetlenie cez urýchľovanie na elektrickej dvojvrstve čaká na potvrdenie prítomnosti takejto vrstvy v erupciách. Možným riešením by bolo urýchľovanie elektrónov pri odraze na rázových vlnách, ktoré sa prirodzene formujú v erupciách. Vandas a Karlický (2016) ukázali, že distribúcia elektrónov urýchlených pri odraze na rázových vlnách sa veľmi podobá na n -distribúciu. Efekt takejto distribúcie na pozorované spektrá bol potom skúmaný v práci **Dzifčáková, Vandas a Karlický (2017)**. Urýchlené a usmernené elektróny sa odrážajú od rázovej vlny naspäť do prúdu plazmy s pôvodnou Maxwellovou distribúciou. Hustota maxwellovskej

plazmy priamo pred čelom rázovej vlny je oveľa vyššia ako hustota elektrónov odrazených od rázovej vlny, takže tam dominuje maxwellovská plazma. Takéto urýchlené a usmernené elektróny sa ale ľahko môžu dostať do oblastí s nižšími hustotami a s inými teplotami maxwellovského pozadia. Syntetické RTG spektrá v oblasti 5 - 6 Å ukázali, že spektrá s zvýšenými intenzitami satelitných čiar môžu byť formované pri nízkych hustotách maxwellovského pozadia. Efekt pritom závisí na energii elektrónov odrazených od rázovej vlny a rastie s teplotou Maxwellovského pozadia. Veľmi nízke teploty maxwellovského pozadia môžu mať dokonca opačný efekt na spektrum, elektróny odrazené od rázovej vlny formujú vysokoenergetický chvost, čo má za následok zníženie intenzít satelitných čiar v porovnaní s maxwellovským spektrom. Vysoké hustoty maxwellovského pozadia majú zase za následok maxwellovské spektrum. Takže v závislosti na fyzikálnych vlastnostiach maxwellovského pozadia je formované spektrum s vysokými, nízkymi alebo maxwellovskými intenzitami satelitných čiar.

4. Záver

Práce predložené v tejto dizertácii sú súčasťou nového smeru vo výskume Slnka, systematicky sa zaoberajú efektami netermálnych distribúcií na spektrum prechodovej oblasti, slnečnej koróny a erupcií. Vypočítané boli ionizačné rovnováhy pre rôzne typy distribúcií a ukázaný ich vplyv na spektrá pozorovateľné v UV a RTG oblasti. Navrhnutá bola diagnostika týchto distribúcií, ktorá vytvorila základ pre úspešné diagnostikovanie κ -distribúcií v koróne a prechodovej oblasti a n -distribúcií v plazme slnečných erupcií. Ukázaný bol vplyv netermálnych distribúcií na diagnostikovanú teplotnú štruktúru pozorovanej opticky tenkej plazmy a na žiarivé straty. Netermálne distribúcie tiež umožnili vysvetliť niektoré pozorovania, ktoré nebolo možné vysvetliť za predpokladu Maxwellovej distribúcie.

Diagnostika netermálnych distribúcií z pomerov intenzít spektrálnych čiar naráža na tie isté problémy ako každá diagnostika opticky tenkej, nehomogénnej plazmy, takže treba poznať distribúciu teploty a hustoty a spoľahlivo odseparovať pozadie. Navyše vyžaduje vysokú presnosť v určovaní intenzít spektrálnych čiar, ktorá v praxi naráža na presnosť kalibrácie družicových spektrografov, tá je v súčasnosti typicky 20% (Hinode/EIS). Takáto presnosť však v najlepšom prípade obvykle postačuje len na diagnostiku silne netermálnych distribúcií.

Na výpočet syntetických spektier pre netermálne distribúcie bol vyvinutý rozsiahly softvér a databáza. Jeho časť určená pre κ -distribúcie, KAPPA package, je voľne prístupná na <http://kappa.asu.cas.cz>. Okrem analýzy spektier a navrhovania novej diagnostiky, možnosti KAPPA package demonštruje aj jeho využitie pri výpočtoch nerovnovážnej ionizácie počas periodickej interakcie elektrónového zväzku s okolitou maxwellovskou plazmou.

Práce v dizertácii a nadväzujúce práce boli citované v medzinárodnej literatúre a autorka o nich prednášala na medzinárodných konferenciách. Uznaním jej práce bola aj ponuka na napísanie kapitoly "Kappa Distributions and the Solar Spectra: Theory and Observations" v knihe "Kappa Distributions - Theory and Applications in Plasmas" editovanej Georgom Livadiotisom. Kniha vyšla v roku 2017 v nakladateľstve Elsevier.

Literatúra

- Bian, N.H., Emslie, A.G., Stackhouse, D.J., Kontar, E.P.: 2014, The Formation of Kappa-distribution Accelerated Electron Populations in Solar Flares, *Astrophys. J.* 796, 142
- Chiuderi, C., Chiuderi Drago, F.: 2004, Effect of suprathermal particles on the quiet Sun radio emission, *Astron. Astrophys.* 422, 331
- Collier, M.R.: 2004, Are magnetospheric suprathermal particle distributions (kappa functions) inconsistent with maximum entropy considerations? *Advances in Space Research* 33, 2108
- Cuperman, S.; Weiss, I.; Dryer, M.: 1983, Theoretical non-Maxwellian particle velocity distribution functions for spherically symmetric solar wind-like plasma systems and consequences, *Astrophys. J.* 273, 363
- Del Zanna, G.; Fernández-Menchero, L.; Badnell, N. R.: 2015, Benchmarking atomic data for astrophysics: Si III, *Astron. & Astrophys.*, 574, A99
- Dere, K. P.; Landi, E.; Mason, H. E.; Monsignori Fossi, B. C.; Young, P. R.: 1997, *Astron. Astrophys. Suppl.*, 125, 149
- Doyle, J. G.; Dzifčáková, E.; Madjarska, M. S.: 2003, Coronal Oscillations above Sunspots? *Solar Phys.* 218, 79
- Doyle, J.G., Madjarska, M.S., Dzifčáková, E., Dammasch, I.E.: 2004, Coronal response of Bi-directional Jets, *Solar Phys.* 221, 51
- Doyle, J. G.; Ishak, B.; Madjarska, M. S.; O'Shea, E.; Dzifčáková, E.: 2006, Dynamic features in the solar atmosphere with unusual spectral line enhancements and Doppler-shifts, *Astron. Astrophys.* 451, L35
- Dudík, J.; Kulinová, A.; Dzifčáková, E.; Karlický, M.: 2009, EUV filter responses to plasma emission for the nonthermal κ -distributions, *Astron. Astrophys.*, 505, 1255-1264
- Dudík, J.; Dzifčáková, E.; Karlický, M.; Kulinová, A.: 2011, The bound-bound and free-free radiative losses for the nonthermal distributions in solar and stellar coronae, *Astron. & Astrophys.*, 529, A103,
- Dudík, J.; Del Zanna, G.; Dzifčáková, E.; Mason, H. E.; Golub, L.: 2014, Solar Transition Region Lines Observed by the Interface Region Imaging

Spectrograph: Diagnostics for the O IV and Si IV Lines, *Astrophys. J. Letters*, 780, L12

Dudík, J.; Mackovjak, .; Dziřčáková, E.; Del Zanna, G.; Williams, D. R.; Karlický, M.; Mason, H. E.; Lörinčík, J.; Kotrč, P.; Fárník, F.; Zemanová, A.: 2015, Imaging and Spectroscopic Observations of a Transient Coronal Loop: Evidence for the Non-Maxwellian K Distributions, *Astrophys. J.*, 807, 123

Dudík, J.; Polito, V.; Dziřčáková, E.; Del Zanna, G.; Testa, P." 2017, Non-Maxwellian analysis of the transition-region line profiles observed by the Interface Region Imaging Spectrograph, *Astrophys. J.*, 842,19

Dziřčáková, E.: 1992, The ionization balance of the Fe in the solar corona for a non-Maxwellian electron distribution function, *Solar Phys.* 140, 247

Dziřčáková, E.: 1998, The Ionization Equilibrium in the Solar Corona for the Electron Power Distribution, *Solar Phys.* 178, 317

Dziřčáková, E.: 2000, Electron Excitation Rates in the Solar Corona for non-Maxwellian Electron Distributions, *Solar phys.*, 196, 113

Dziřčáková, E., Kulinová, A.: 2001, THE Fe XXV Excitation Equilibrium in the Solar Corona for the Electron Power Distributions Using a Pseudo-Temperature, *Solar Phys.* 203, 53

Dziřčáková, E.: 2002, The Updated Fe Ionization Equilibrium for the Electron κ -Distributions, *Solar Phys.* 208, 91

Dziřčáková, E., Kulinová, A.: 2003, Carbon and Oxygen Coronal Line Intensities for the Electron κ -Distribution, *Solar Phys.*, 218, 41

Dziřčáková, E.: 2005, The Excitation Equilibrium of SI XII and C a XIX in the Solar Corona for Electron Power Distribution, in Proceedings of the 11th European Solar Physics Meeting "The Dynamic Sun: Challenges for Theory and Observations, (ESA SP-600). Editors: D. Danesy, S. Poedts, A. De Groof and J. Andries, 119

Dziřčáková, E., Kulinová, A.: 2006, X-Ray Diagnostics of the Non-Thermal Electron Distribution, in SOHO-17, 10 Years of SOHO and Beyond, Edited by H. Lacoste and L. Ouwehand, ESA SP-617, European Space Agency, 88

- Dzifčáková, E.: 2006, The Influence of the Electron -Distribution in the Solar Corona on the Fe VIII - Fe XV Line Intensities, *Solar Phys.* 234, 243
- Dzifčáková, E., Tothová, D.: 2007, Synthetic Spectra of the Fe VIII Fe XVI Emission Lines for Electron Non-Thermal Distributions, *Solar Phys.* 240, 211
- Dzifčáková, E.; Karlický, M.: 2008, Influence of the Return Current on the EUV and X-Ray Flare Line Emissions, *Solar Phys.*, 250, 329
- Dzifčáková, E., Kulinová, A., Chifor, C., Mason, H.E., Del Zanna, G., Sylwester, J., Sylwester, B.: 2008, Nonthermal and thermal diagnostics of a solar flare observed with RESIK and RHESSI, *Astron. Astrophys.* 488, 311
- Dzifčáková, E., Mason, H.E.: 2008, Computation of non-Maxwellian Electron Excitation Rates for Ions of Astrophysical Interest: Fe XV - a Test Case, *Solar Phys.* 247, 301
- Dzifčáková, E., Kulinová, A.: 2010, The Diagnostics of the Kappa-distributions from EUV Spectra, *Solar Phys.* 263, 25
- Dzifčáková, E., Homola, M., Dudík, J.: 2011, The ionization equilibrium and arc line spectra for the electron distribution with a power-law tail, *Astron. Astrophys.* 531, A111
- Dzifčáková, E., Kulinová, A.: 2011, Diagnostics of the κ -distribution using Si III lines in the solar transition region. *Astron. Astrophys.* 531, A122
- Dzifčáková, E., Dudík, J.: 2013, H to Zn Ionization Equilibrium for the Non-Maxwellian Electron κ -distributions: Updated Calculations, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 206, 6
- Dzifčáková, E., Karlický, M., Dudík, J.: 2013, Dielectronic satellite lines and double layers in solar flares, *Astron. Astrophys.* 550, A60
- Dzifčáková, E., Dudík, J.: 2015, Ionisation Equilibrium for the Non-Maxwellian Electron n -Distributions in Solar Flares: Updated Calculations, *Solar Phys.* 290, 3545
- Dzifčáková, E., Dudík, J., Kotrc, P., Farnk, F., Zemanová, A.: 2015, KAPPA: A Package for Synthesis of Optically Thin Spectra for the Non-Maxwellian-distributions Based on the Chianti Database, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 217, 14

Dzifčáková, E., Dudík, J., Mackovjak, S.: 2016, Non-equilibrium ionization by a periodic electron beam. I. Synthetic coronal spectra and implications for interpretation of observations, *Astron. Astrophys.* 589, A68

Dzifčáková, E., Vandas, M., Karlický, M.: Shock-reflected electrons and X-ray line spectra, *Astron. Astrophys.* 603,17

Dzifčáková, E., Vocks, C., Dudík, J.: Synthetic IRIS spectra of the solar transition region: Effect of high-energy tails, *Astron. Astrophys.* 603,14

Esser, R., Edgar, R.J.: 2000, Reconciling Spectroscopic Electron Temperature Measurements in the Solar Corona with In Situ Charge State Observations, *Astrophys. J. Lett.* 532, L71

Gabriel, A. H.; Phillips, K. J. H.: 1979, Dielectronic satellite spectra for highly charged helium-like ions. IV - Iron satellite lines as a measure of non-thermal electron energy distributions, *Month. Not. Royal Astron. Soc.*, 189, 319

Hahn, M., Savin, D.W.: 2015, A Simple Method for Modeling Collision Processes in Plasmas with a Kappa Energy Distribution, *Astrophys. J.* 809, 178

Jeffrey, N. L. S.; Fletcher, L.; Labrosse, N.: 2016, First evidence of non-Gaussian solar flare EUV spectral line profiles and accelerated non-thermal ion motion, *Astron. & Astrophys.*, V 590, A99

Karlický, M.: 2012, The n -distribution of Electrons and Double Layers in the Electron-beam-Return-current System of Solar Flares, *Astrophys. J.*, 750, 49

Karlický, M.; Dzifčáková, E.; Dudík, J.: 2012, On the physical meaning of n -distributions in solar flares, *Astron. Astrophys.*, 537, A36

Kašparová, J., Karlický, M.: 2009, Kappa distribution and hard X-ray emission of solar flares, *Astron. Astrophys.* 497, L13

Kulinová, A.; Kašparová, J.; Dzifčáková, E.; Sylwester, J.; Sylwester, B.; Karlický, M.: 2011, Diagnostics of non-thermal distributions in solar flare spectra, observed by RESIK and RHESSI, *Astron. Astrophys.*, 533, id. A81, 16 pp.

Landi, E., Young, P. R., Dere, K. P., Del Zanna, G., & Mason, H. E. 2013, CHIANTI—An Atomic Database for Emission Lines. XIII. Soft X-Ray Improvements and Other Changes, *Astrophys. J.*, 763, 86

- Leubner, M.P.: 2004, Core-Halo Distribution Functions: A Natural Equilibrium State in Generalized Thermostatistics, *Astrophys. J.* 604, 469
- Livadiotis, G.: 2015a, Introduction to special section on Origins and Properties of Kappa Distributions: Statistical Background and Properties of Kappa Distributions in Space Plasmas. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 120, 1607
- Livadiotis, G.: 2015b, Kappa and q indices: dependence on the degrees of freedom, *Entropy* 17, 2062
- Livadiotis, G., McComas, D.J.: 2009, Beyond kappa distributions: Exploiting Tsallis statistical mechanics in space plasmas, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 114, 11105
- Livadiotis, G., McComas, D.J.: 2010, Exploring Transitions of Space Plasmas Out of Equilibrium, *Astrophys. J.* 714, 971
- Livadiotis, G., McComas, D.J.: 2011, Invariant Kappa Distribution in Space Plasmas Out of Equilibrium, *Astrophys. J.* 741, 88
- Livadiotis, G., McComas, D.J.: 2013, Understanding Kappa Distributions: A Toolbox for Space Science and Astrophysics, *Space Sci. Rev.* 175, 183
- Ljepojevic, N.N., MacNeice, P.: 1988, Non-Maxwellian distribution functions in flaring coronal loops - Comparison of Landau-Fokker-Planck and BGK solutions, *Solar Phys.* 117, 123
- Mackovjak, S., Dzifčáková, E., Dudík, J.: 2013, On the Possibility to Diagnose the Non-Maxwellian Kappa-Distributions from the Hinode/EIS EUV Spectra, *Solar Phys.* 282, 263
- Mackovjak, S., Dzifčáková, E., Dudík, J.: 2014, Differential emission measure analysis of active region cores and quiet Sun for the non-Maxwellian -distributions, *Astron. Astrophys.* 564, A130
- Oka, M., Ishikawa, S., Saint-Hilaire, P., Krucker, S., Lin, R.P.: 2013, Kappa Distribution Model for Hard X-Ray Coronal Sources of Solar Flares, *Astrophys. J.* 764, 6
- Oka, M., Krucker, S., Hudson, H.S., Saint-Hilaire, P.: 2015, Electron Energy Partition in the Above-the-looptop Solar Hard X-Ray Sources, *Astrophys. J.* 799, 129

- Olbert, S.: 1968, Summary of Experimental Results from M.I.T. Detector on IMP-1. In: Carovillano, R.D.L., McClay, J.F. (eds.) *Physics of the Magnetosphere*, Astrophysics and Space Science Library 10, 641
- Olbert, S.: 1981, Inferences about the solar wind dynamics from observed distributions of electrons and ions. In: Guyenne, T.D., Levy, G. (eds.) *ESA Special Publication* 161, 135
- Owocki, S.P., Scudder, J.D.: 1983, The effect of a non-Maxwellian electron distribution on oxygen and iron ionization balances in the solar corona, *Astrophys. J.* 270, 758
- Pinfield, D.J., Keenan, F.P., Mathioudakis, M., Phillips, K.J.H., Curdt, W., Wilhelm, K.: 1999, Evidence for Non-Maxwellian Electron Energy Distributions in the Solar Transition Region: Si III Line Ratios from SUMER, *Astrophys. J.* 527, 1000
- Scudder, J.D., Olbert, S.: 1979, A theory of local and global processes which affect solar wind electrons. I - The origin of typical 1 AU velocity distribution functions - Steady state theory, *J. Geophys. Res.* 84, 2755
- Scudder, J.D.: 1992a, On the causes of temperature change in inhomogeneous low-density astrophysical plasmas, *Astrophys. J.* 398, 299
- Scudder, J.D.: 1992b, Why all stars should possess circumstellar temperature inversions, *Astrophys. J.* 398, 319
- Scudder, J.D.: 1994, Ion and electron suprathermal tail strengths in the transition region: Support for the velocity filtration model of the corona, *Astrophys. J.* 427, 446
- Scudder, J.D., Karimabadi, H.: 2013, Ubiquitous Non-thermals in Astrophysical Plasmas: Restating the Difficulty of Maintaining Maxwellians, *Astrophys. J.* 770, 26
- Seely, J.F., Feldman, U., Doschek, G.A.: 1987, Observation of nonthermal energy distributions during the impulsive phase of solar ares, *Astrophys. J.* 319, 541
- Shoub, E. C.: 1977a Departures of the electron energy distribution from a Maxwellian in hydrogen. I - Formulation and solution of the electron kinetic equation, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 34, 259

Shoub, E. C.: 1977b Departures of the electron energy distribution from a Maxwellian in hydrogen. II - Consequences, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 34, 277

Shoub, E.C.: 1983, Invalidity of local thermodynamic equilibrium for electrons in the solar transition region. I - Fokker-Planck results, *Astrophys. J.* 266, 339

Sylwester, J., Gaicki, I., Kordylewski, Z., Kowalinski, M., Nowak, S., Plocieniak, S., Siarkowski, M., Sylwester, B., Trzebinski, W., Baka la, J., Culhane, J.L., Whyndham, M., Bentley, R.D., Guttridge, P.R., Phillips, K.J.H., Lang, J., Brown, C.M., Doschek, G.A., Kuznetsov, V.D., Oraevsky, V.N., Stepanov, A.I., Lisin, D.V.: 2005, Resik: A Bent Crystal X-ray Spectrometer for Studies of Solar Coronal Plasma Composition. *Solar Phys.* 226, 45

Tsallis, C.: 1988, Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics, *Journal of Statistical Physics* 52, 479.

Tsallis, C.: 2009, Nonadditive entropy: The concept and its use, *The European Physical Journal A* 40, 257

Vandas, M., Karlický, M.: 2016, Shock-drift accelerated electrons and n-distribution, *Astron. Astrophys.* 591, 127

Vasyliunas, V. M.: 1968, Low-Energy Electrons in the Magnetosphere as Observed by OGO-1 and OGO-3, *Physics of the Magnetosphere, Based on Proceedings of a Conference, held at Boston College, June 19-28, 1967*, Dordrecht: Reidel, 1968, edited by Robert D. L. Carovillano, and John F. McClay. *Astrophysics and Space Science Library*, Vol. 10, p.622

Vocks, C., Dzifčáková, E., Mann, G.: 2016, Suprathermal electron distributions in the solar transition region, *Astron. Astrophys.* 596, 41

Wannawichian, S., Ruffolo, D., Kartavykh, Y.Y.: 2003, Ionization Fractions of Slow Ions in a Plasma with Kappa Distributions for the Electron Velocity, *Astrophys. J. Suppl.* 146, 443

Wilhelm, K., Curdt, W., Marsch, E., Schüle, U., Lemaire, P., Gabriel, A., Vial, J. C., Grewing, M., Huber, M. C. E., Jordan, S. D., Poland, A. L., Thomas, R. J., Kuhne, M., Timothy, J. G., Hassler, D. M., and Siegmund, O. H. W.: 1995, SUMER - Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation, *Solar Phys.* 162, 189.

Zoznam prác zahnutých do dizertácie

Invited Review

1. Dudík, J., Dzifčáková, E., Meyer-Vernet, N., Del Zanna, G.; Young, Peter R.; Giunta, A.; Sylwester, B. Sylwester, J.; Oka, M.; Mason, H. E.; Vocks, C. Matteini, L.; Krucker, S. Williams, D. R.; Mackovjak, Š.: 2017, "Non-Equilibrium Processes in the Solar Corona, Transition Region, Flares, and Solar Wind" (Invited Review), *Solar Phys.*, **292**, 100

Kappa-distribution

2. Doyle, J. G.; Dzifčáková, E.; Madjarska, M. S.: 2003, "Coronal oscillations above sunspots?", *Solar Physics*, Vol. **218**, 79-84

3. Dzifčáková, E.: 2003, "Carbon and oxygen coronal line intensities for the electron κ -distribution", *Solar Physics*, **218**, 41-62

4. Dzifčáková, E.: 2006, "The Influence of the Electron κ -Distribution in the Solar Corona on the Fe VIII - Fe XV Line Intensities", *Solar Physics*, **234**, 243-256

5. Dzifčáková, E.; Mason, H.: 2008, "Computation of Non-Maxwellian Electron Excitation Rates for Ions of Astrophysical Interest: Fe xv A Test Case", *Solar Physics*, **247**, 301-320

6. Dzifčáková, E.; Kulinová, A.: 2010, "The Diagnostics of the κ -Distributions from EUV Spectra", *Solar Physics*, **263**, 25-41

7. Dudík, J.; Dzifčáková, E.; Karlický, M.; Kulinová, A.: 2011, "The bound-bound and free-free radiative losses for the non-thermal distributions in solar and stellar coronae", *Astron. Astrophys.*, **529**, A103

8. Dzifčáková, E.; Kulinová, A.: 2011, "Diagnostics of the κ -distribution using Si III lines in the solar transition region", *Astron.*

Astrophys., **531**, A122

9. Džifčáková, E., Dudík, J.: 2013, "H to Zn Ionization Equilibrium for the Non-Maxwellian Electron κ -distributions: Updated Calculations", *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **206**, 6

10. Mackovjak, Š., Džifčáková, E., Dudík, J.: 2013, "On the Possibility to Diagnose the Non-Maxwellian κ -Distributions from the Hinode/EIS EUV Spectra", *Solar Physics*, **282**, 263

11. Mackovjak, Š., Džifčáková, E., Dudík, J.: 2014, "Differential emission measure analysis of active region cores and quiet Sun for the non-Maxwellian κ -distributions", *Astron. Astrophys.*, **564**, A130

12. Dudík, J.; Del Zanna, G.; Džifčáková, E.; Mason, H. E.; Golub, L.: 2014, "Solar Transition Region Lines Observed by the Interface Region Imaging Spectrograph: Diagnostics for the O IV and Si IV Lines", *Astrophys. J. Lett.*, **780**, L12

13. Džifčáková, E., Dudík, J., Kotrč, P., Fárník, F., Zemanová, A.: 2015, "KAPPA: "Optically thin spectra synthesis for non-Maxwellian kappa-distributions", *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 217, 14

14. Džifčáková, E., Dudík, J., Mackovjak, Š.: 2016, "Non-equilibrium ionization by a periodic electron beam. I. Synthetic coronal spectra and implications for interpretation of observations", *Astron. Astrophys.*, **589**, A68

15. Vocks, C.; Džifčáková, E.; Mann, G.: 2016, "Suprathermal electron distributions in the solar transition region", *Astron. Astrophys.*, **596**, A41

Džifčáková, E., Vocks, C.; Dudík, J.: 2017, "IRIS spectra of the solar transition region: Effect of high-energy tails", *Astron. Astrophys.*, **603**, A14

***N*-distribution**

17. Dzifčáková, E.; Tóthová, D.: 2007, "Synthetic Spectra of the Fe VIII Fe XVI Emission Lines for Electron Non-Thermal Distributions", *Solar Physics*, **240**, 211-226
18. Dzifčáková, E.; Karlický, M.: 2008, "Influence of the Return Current on the EUV and X-Ray Flare Line Emissions", *Solar Physics*, **250**, 329-338,
19. Dzifčáková, E.; Kulinová, A.; Chifor, C.; Mason, H. E.; Del Zanna, G.; Sylwester, J.; Sylwester, B.: 2008, "Nonthermal and thermal diagnostics of a solar flare observed with RESIK and RHESSI", *Astron. Astrophys.*, **488**, 311-321
20. Dzifčáková, E.; Homola, M.; Dudík, J.: 2011, "The ionization equilibrium and flare line spectra for the electron distribution with a power-law tail", *Astron. Astrophys.*, **531**, A111
21. Dzifčáková, E., Karlický, M., Dudík, J.: 2013, "Dielectronic satellite lines and double layers in solar flares", *Astron. Astrophys.*, **550**, A60
22. Dzifčáková, E., Dudík, J.: 2015, "Ionisation Equilibrium for the Non-Maxwellian Electron n-Distributions in Solar Flares: Updated Calculations", *Solar Physics*, **290**, 35-45
23. Dzifčáková, E., Vandas, M.; Karlický, M.: 2017, "Shock reflected electrons and X-ray line spectra", *Astron. Astrophys.*, **603**, A17

Resumé

This thesis is a selection of peer-reviewed papers studying the effects of the non-Maxwellian electron distributions in the solar corona and transition region. These papers are a part of a new trend in the solar research that try to explain peculiarities in solar spectra that cannot be explained under an assumption of the Maxwellian distribution of particles.

Non-Maxwellian distributions can be formed by a strong gradient of density or temperature, plasma heating by reconnection during the solar flares or micro-flares, some types of wave-particle interactions, or the other physical processes such as turbulence. The first part of this thesis deals with the non-Maxwellian distributions that have a thermal core and a high-energy tail. They can occur everywhere from the transition region to solar flares and can be represented by a κ -distributions. The κ -distributions influence the ionization and recombination rates, as well as the ionization equilibrium. Freely available database and software KAPPA has been developed to facilitate calculation of the excitation equilibrium and synthetic line and continuum spectra for the κ -distributions. The influence of the κ -distributions on the line intensities were used to propose diagnostics of κ and for the first successful attempts to diagnose them. The influence of the κ -distributions on radiative losses, responses of EUV filters, and temperature distribution of the coronal plasma were analyzed as well. The κ -distributions and the KAPPA package were also used for the simulation of non-equilibrium ionization caused by switching on an electron beam in a Maxwellian background plasma.

The second part of thesis deals with n -distributions. The n -distributions have a narrower shape than a Maxwellian and are observed during solar flares. The influence of the n -distributions on the ionization and excitation equilibrium was calculated.

Subsequently, the diagnostics of n -distributions from X-ray flare spectra based on the behaviour of dielectronic satellite lines was proposed and applied successfully on flare spectra observed by RESIK, which yielded highly non-Maxwellian values of up to $n = 11$. Furthermore, it was demonstrated that the combination of the electron beam with return current is able to form enhanced intensities of the satellite lines in X-ray flare spectra as well as extreme increases of some spectral line intensities in the transition region. Investigation of the origin of the n -distributions led to modelling of the flare spectra for the distributions similar to n -distributions, or their combinations with the other types of distributions in different physical conditions. It was shown that observed relative intensities of X-ray satellite lines depend not only on the parameters of the n -distribution but also on the physical properties of the Maxwellian background.

The papers included in this thesis were published and cited in international astronomical journals. The author presented these results at many international conferences. The results are also included in a book chapter "Kappa Distributions and the Solar Spectra: Theory and Observations" written by Elena Dzifčáková and Jaroslav Dudík. The chapter is a part of the book "Kappa Distributions - Theory and Applications in Plasmas" edited by George Livadiotis. The book was published by Elsevier in spring 2017.