

## Formiranje emisije D2 linije natrijuma u atmosferi komete

---

*U ovom radu ispitana je zavisnost fluksa linije natrijuma formirane u komi od heliocentrične udaljenosti komete. Kometa je modelirana pod pretpostavkom globalne termodinamičke ravnoteže. Korišćen je Haserov model kome i modelirani su osnovni termodinamički procesi na površini jezgra. Rešavanjem jednačine prenosa zračenja, pod pretpostavkom da funkcijom izvora dominira rasejanje, dobijeni su profili linija natrijuma za različite udaljenosti komete od Sunca. Sa porastom heliocentrične udaljenosti fluks linije naglo opada. U trenucima kada se kometa nalazi na udaljenostima od 1 AU i 3 AU fluks linije se razlikuje za oko dva reda veličine.*

---

### Uvod

Komete su mala tela Sunčevog sistema koja se kreću po veoma ekscentričnim orbitama, sa periodom od nekoliko godina do nekoliko miliona godina. Skoro sva masa komete nalazi se u jezgru, koje predstavlja mešavinu leda, prašine, kamenja i gasova. Dimenzije jezgra su male (od nekoliko stotina metara do desetine kilometara) u odnosu na ostala tela Sunčevog sistema, pa kometa postaje vidljiva tek kada se dovoljno približi Suncu. Zagrevanjem komete čestice leda i prašine napuštaju površinu jezgra u procesu sublimacije i stvaraju atmosferu komete – komu. Dimenzije kome mogu biti od nekoliko desetina hiljada do preko milion kilometara (Atanacković i Vukićević-Karabin 2010).

Koma je vidljiva u optičkom delu spektra zato što rasejava Sunčevu svetlost. Ukoliko se Sunce, kometa i Zemlja nalaze u kolinearnoj poziciji, uočavaju se apsorpcione linije, a inače emisione linije. One potiču od organskih molekula, ali i nekih metala (Na, Hg, Ca, Mg).

Ovaj rad bavi se rasejanjem Sunčevog zračenja u komi. Konkretno, razmatra se promena oblika emisije linije natrijuma na 589 nm (D2 linije) u zavisnosti od heliocentrične udaljenosti komete. Natrijum je izabran pošto je jedan od najzastupljenijih elemenata u komi (Combi *et al.* 1007). Cilj rada je da se ispita zavisnost fluksa D2 linije od rastojanja Sunce–komete, pod pretpostavkom da se kometa nalazi u nekolinearnoj poziciji sa Suncem i posmatračem.

---

*Nastasija Petković (1997), Kragujevac, Josipa Pančića 5/II, učenica 3. razreda Prve kragujevačke gimnazije*

*Milan Kresović (1998), Novi Sad, Jove Vučerića 19, učenik 3. razreda Gimnazije „Isidora Sekulić” u Novom Sadu*

#### MENTORI:

*Ivan Milić, Maks Plank institut za istraživanja Sunčevog sistema u Getingenu*

*Dušan Vukadinović, student Matematičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu*

# Teorijske osnove modela

## Zračenje kome u vidljivom delu spektra

Profil linije zavisi od koncentracije čestica, koje rasejavaju svetlost i ulaznog intenziteta zračenja. Formalno rešenje jednačine prenosa zračenja (JPZ) koje daje izlazni intenzitet je (Rutten 2003: 15):

$$I_{em} = I_0 e^{-T_u} + \int_0^{T_u} S(\tau) e^{\tau - T_u} d\tau, \quad (1)$$

gde je  $I_{em}$  intenzitet zračenja koji izlazi iz kome,  $I_0$  intenzitet koji pada na komu,  $T_u$  ukupan optički put na datoj talasnoj dužini, a  $S$  funkcija izvora.

Prvi član u jednačini predstavlja oslabljeni ulazni intenzitet, usled apsorpcije fotona od strane čestica sredine, dok drugi član opisuje doprinos sredine intenzitetu. Funkcija izvora ( $S$ ) je parametar sredine i definiše se kao količnik koeficijenta emisije i koeficijenta apsorpcije u nekoj tački sredine. Što je kometa bliža Suncu, to će biti više fotona koji dolaze do kome i rasejavaju se u njoj. Funkcija izvora je srazmerna ukupnom zračenju koje pada na element površine, što je obrnuto srazmerno kvadratu heliocentrične udaljenosti. Samim tim, funkcija izvora opada sa kvadratom heliocentrične udaljenosti. Konkretno, u ovom radu funkcija izvora je normalizovana tako da ima vrednost 1 na rastojanju od 1 AU i da je ista u svakoj tački kome i za sve talasne dužine:

$$S = \frac{1}{r_h^2} \quad (2)$$

gde je  $r_h$  heliocentrična udaljenost komete u AU.

Kada se jednačina (2) uvrsti u jednačinu (1) i ako se uzme pretpostavka da se kometa, posmatrač i Sunce nalaze u nekolinernoj poziciji, kada je  $I_0 = 0$ , jednačina (1) se rešava analitičkim putem i dobija se izraz za izlazni intenzitet duž zadatog pravca kroz komu:

$$I_{em} = \frac{1 - e^{-T_u}}{r_h^2}. \quad (3)$$

Izlazni intenzitet zavisi od ukupnog optičkog puta zraka  $T_u$ . To je veličina koja opisuje koliko je neka sredina između dve tačke neprozirna na datoj frekvenciji. Optički put zavisi od koeficijenta apsorpcije na određenoj frekvenciji i geometrijskog puta između dve tačke u toj sredini (Rutten 2003: 15)

$$T_u = \int_A^B \chi_v ds \quad (4)$$

gde je  $\chi_v$  koeficijent apsorpcije.

Koeficijent apsorpcije direktno zavisi od koncentracije apsorbera  $n$  unutar sredine, tako što rastom koncentracije apsorbera raste koeficijent apsorpcije. Jednačina za koeficijent apsorpcije u liniji Na je (Rutten 2003: 23):

$$\chi_v = B_{3s-3p} n \cdot \frac{h\nu\varphi_v}{4\Delta\nu_D} \quad (5)$$

gde je  $B_{3s-3p}$  Ajnštajnov koeficijent apsorpcije za prelaz  $3s-3p$  elementarnog Na,  $\nu$  frekvencija zračenja,  $\varphi_v$  Fojtov profil, a  $\Delta\nu_D$  Doplerova širina. Ajnštajnov koeficijent apsorpcije za prelaz  $3s-3p$  elementarnog Na određuje se kao (Prodanović 2010: 68):

$$B_{3s-3p} = \frac{c^2 A_{3p-3s} g_p}{8\pi h\nu^3 g_s},$$

gde je  $A_{3p-3s}$  Ajnštajnov koeficijent spontane emisije za prelaz  $3s-3p$  elementarnog Na i određuje se eksperimentalno (Kelleher i Podobedova 2008; Sansonetti 2008),  $g_p$  i  $g_s$  su statističke težine energetskih nivoa  $p$  i  $s$ ,  $c$  je brzina svetlosti,  $h$  Plankova konstanta, a  $\nu$  frekvencija zračenja. Statistička težina opisuje degenerisanost energetskog nivoa. Doplerova širina ima oblik (Prodanović 2010: 87):

$$\Delta\nu_D = \frac{v_0}{c} \sqrt{\frac{2RT}{M}},$$

gde je  $\nu_0$  centralna frekvencija u liniji,  $M$  molarna masa natrijuma,  $R$  gasna konstanta,  $c$  brzina svetlosti, a  $T$  je temperatura. Fojtov profil se računa kao (*ibid.* 90):

$$\varphi_v = \frac{1}{\sqrt{\pi}\Delta\nu_D} \cdot \frac{a}{\pi} \Phi(a, \nu),$$

gde je  $a$  Fojtov koeficijent,  $\Delta\nu_D$  Doplerova širina, a  $\Phi(a, \nu)$  Fojtova funkcija, koja se računa numerički. Fojtov profil predstavlja konvoluciju Gausovog i Lorencovog profila i opisuje zajednički uticaj prirodnog, termalnog i sudarnog širenja linije. Prirodno širenje linije je posledica neodređenosti energetskih nivoa, koja sledi iz Hajzenbergove relacije neodređenosti i opisuje se Lorencovim profilom. Termalno (Doplerovo) širenje nastaje zbog haotičnog kretanja čestica gasa na nekoj temperaturi i opisuje se Gausovim profilom. Tada neke čestice dovode do crvenog, a neke do plavog pomaka, što zajedno rezultira celokupnim širenjem linije. Sudarno širenje ili širenje usled pritiska nastaje kao posledica (elastičnih i neelastičnih) sudara među česticama, pri čemu dolazi do perturbacije energetskih nivoa u vidu njihovog širenja. Kako je koma izuzetno retka, sudari čestica unutar kome mogu se zanemariti, a samim tim i sudarno širenje.

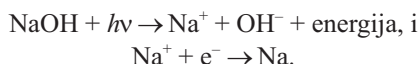
Da bi se izračunao koeficijent apsorpcije, neophodno je znati raspodelu koncentracije apsorbera u koma, tj. zavisnost koncentracije Na od rastojanja od centra jezgra, za šta je potreban model kome.

## Haserov model kome

Koma nastaje kada jezgro komete počne da sublimuje i tada dolazi do produkcije gasa. Jedan od modela koji opisuje ovu produkciju gasa je Haserov model (Haser 1957, prema Helbert 2002). U okviru ovog modela

pretpostavlja se da je izbacivanje gasa izotropno i da mlazevi gasa imaju konstantnu radijalnu brzinu.

Koncentracija posmatranog molekula/atoma zavisi od kog molekula iz jezgra on potiče. Početni, tj. stariji molekuli (engl. parent species) nalaze se u jezgru komete, a kada budu izbačeni iz jezgra u vidu gasa, dolazi do njihove fotodisocijacije (disocijacija posredstvom zračenja), pa prelaze u mlađi molekul ili atom (engl. daughter species). U razmatranom slučaju apsorber u komi je neutralni atom Na u osnovnom stanju. To je mlađi atom, koji potiče od starijeg molekula NaOH (Kupperman *et al.* 1998). Hemijska reakcija nastajanja elementarnog Na podrazumeva učešće svetlosti i procese rekombinacije:



Haserov model predviđa koncentraciju Na u zavisnosti od rastojanja od centra jezgra (Helbert 2002: 73):

$$n(\rho) = \frac{Q}{4\pi v \rho^2} \cdot \frac{l_p}{l_p - l_d} \cdot \left( e^{\frac{\rho_n}{l_p}} - e^{\frac{\rho_n}{l_d}} \right) \quad (6)$$

gde je  $\rho$  udaljenost od centra jezgra,  $\rho_n$  redukovana udaljenost (definisana kao  $\rho_n = \rho - R_n$ , pri čemu je  $R_n$  poluprečnik jezgra komete),  $l_p$  srednji slobodni put za stariji molekul (u konkretnom slučaju: pređeni put NaOH do fotodisocijacije),  $l_d$  srednji slobodni put za mlađi atom (u konkretnom slučaju: pređeni put atoma Na do jonizacije),  $Q$  stopa produkcije gasa, a  $v$  radijalna brzina gasa, koja se može aproksimirati termalnom brzinom gasa (Ma i Williams 2002).

Karakteristične dužine iz Haserovog modela zavise od prirode molekula/atoma (vremena raspada), ali i od brzine širenja kome. Vreme raspada (engl. lifetime against destruction) predstavlja vreme potrebno da se stariji molekul fotodisocijuje, a mlađi atom fotojonizuje. Karakterističan je za svaki molekul/atom i uzima se eksperimentalno dobijena vrednost (Kupperman *et al.* 1998; Festou 2005). Za sve molekule/atome životni vek je srazmeran kvadratu heliocentrične udaljenosti komete. Tada se za srednji slobodni put dobija (Helbert 2002):

$$l_{(p/d)} = \tau_{0(p/d)} \cdot \left( \frac{r_h}{1 \text{ AU}} \right)^2 \cdot v$$

gde je  $\tau_0$  vreme raspada molekula/atoma na 1 AU.

## Termodinamički procesi na površini jezgra

U ovom radu uzima se da je jezgro sfernog oblika i da se primarno sastoji od vodenog leda. Ukupna produkcija gasovitog Na data je kao:

$$Q = Z_{\text{Na}}(T) \cdot 4R_n^2 \pi,$$

gde je  $Z_{\text{Na}}(T)$  sublimacioni fluks Na (broj atoma Na koji sublimuju u jedinici vremena sa jedinične površine) kao funkcija od temperature površine jezgra  $T$ .

Može se pretpostaviti da je na površini jezgra broj sublimovanih čestica jednak broju kondenzovanih, odnosno da vlada ravnotežni pritisak. Ako se posmatraju i sudari čestica sa površinom jezgra (Delsemme i Miller 1971) i za srednju brzinu uzme srednja brzina iz Maksvelove raspodele, dolazi se do zavisnosti sublimacionog fluksa Na od temperature:

$$Z(T) = P_r \sqrt{\frac{1}{2m\pi kT}},$$

gde je  $P_r$  ravnotežni pritisak,  $m$  masa atoma Na, a  $k$  Bolcmanova konstanta.

Ravnotežni pritisak ili pritisak zasićene pare opisuje Klauzijus-Klapejronova jednačina. Iz početne pretpostavke da se jezgro pretežno sastoji od vodenog leda dobija se temperaturna zavisnost ravnotežnog pritiska za vodeni led (Fernandez 2005: 46):

$$P_r = 1.2 \times 10^{12} \times \exp\left(-\frac{6 \times 10^3}{T}\right),$$

gde je ravnotežni pritisak dat u paskalima, a temperatura u kelvinima.

Srednji slobodni put zavisi od trenutne udaljenosti komete od Sunca, a svi ostali parametri koji opisuju jezgro, komu i profil linije – od temperature. Zbog ovoga je potrebno naći korelaciju heliocentrične udaljenosti i temperature. U ovom radu cela kometa (jezgro i koma) je modelirana pod pretpostavkom globalne termodinamičke ravnoteže. Zavisnost heliocentrične udaljenosti komete od temperature se izvodi iz zakona održanja energije. Naime, fluks zračenja koji jezgro prima od Sunca jednim delom odlazi na sublimaciju leda, a drugim na termalno zračenje jezgra (opisano Štefan-Bolcmanovim zakonom). Ostali efekti, kao što su efekat albeda i kondukcija jezgra, mogu se zanemariti u prvoj aproksimaciji (Fernandez 2005). Heliocentrična udaljenost i temperatura su u tom slučaju povezani kao:

$$r_h = \sqrt{\frac{S_c}{\sigma T^4 + L(T)Z(T)}},$$

gde je  $S_c$  solarna konstanta,  $\sigma$  Štefan-Bolcmanova konstanta,  $L(T)$  latentna toplota sublimacije leda, a  $Z(T)$  sublimacioni fluks leda. Proizvod  $L(T)Z(T)$  čini sublimacioni član u zakonu održanja energije a  $\sigma T^4$  termalni član.

## Određivanje koncentracije elementarnog natrijuma u komi u osnovnom stanju

Kada su poznate karakteristične dužine, produkcija gasa i povezanost temperature i udaljenosti, može se proceniti koncentracija elementarnog Na u svakom sloju kome. Međutim, među česticama Na ima onih koje su u osnovnom i onih koje su u pobuđenom stanju, a u formiranju D2 linije učestvuje samo Na u osnovnom stanju. Da bi se pronašla koncentracija Na

u osnovnom stanju, koristi se Maksvel-Bolcmanova statistika, koja opisuje distribuciju klasičnih čestica u termodinamičkoj ravnoteži po energiji. Maksvel-Bolcmanova statistika (Glazer i Wark 2001) je data kao:

$$n_i = \frac{n}{Z} \cdot g_i \cdot \exp(-E_i / kT),$$

gde je  $n_i$  koncentracija čestica na energetsom nivou  $E_i$ ,  $n$  ukupna koncentracija čestica,  $g_i$  statistička težina  $i$ -tog nivoa, a  $Z$  je particiona funkcija. Particiona funkcija je definisana kao (*ibid.*):

$$Z = \sum_i g_i \exp(-E_i / kT).$$

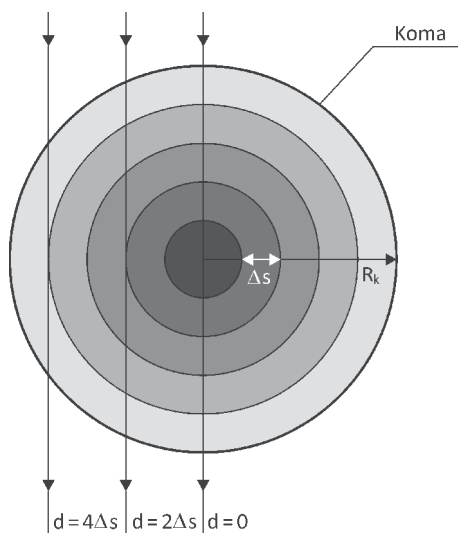
Pošto je temperatura kome dovoljno mala, može se uzeti (Gray 2005) da je particiona funkcija Na jednaka dvostrukoj statističkoj težini osnovnog energetskog nivoa. Koncentracija atoma Na u osnovnom stanju sa energijom  $E_0$  je onda data sa:

$$n_0 = \frac{n}{2} \exp(-E_0 / kT).$$

Kada su svi članovi jednačine (5) poznati, može se izračunati koeficijent apsorpcije, neprozračnost i dobiti profil linije Na duž pravca koji prolazi kroz komu. Dužina optičkog puta (4) izračunata je numerički, metodom pravougaonika.

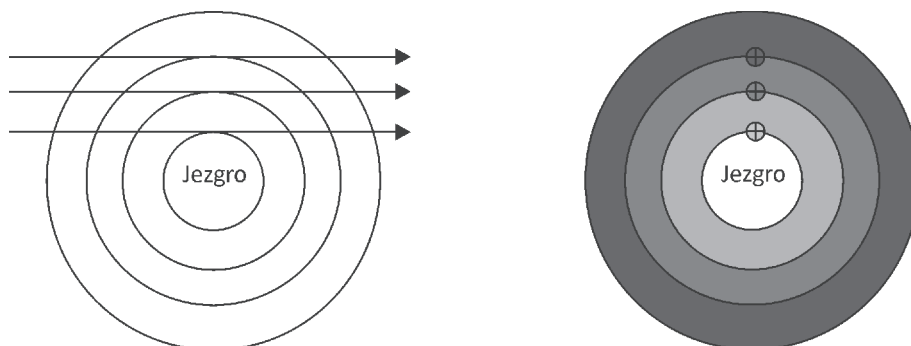
## Ukupan izlazni intenzitet

Za različite pravce izlazni intenzitet zračenja ima različite vrednosti jer prolazi kroz različite slojeve kome, pa optička dubina nije ista. U ovom radu koma je predstavljena u obliku sfere i podeljena na više ekvidistantnih slojeva u okviru kojih važe lokalna svojstva sredine (slika 1). Svakom sloju pridružena je karakteristična koncentracija apsorbera iz Haserovog modela.



Slika 1. Sferni model kome podeljen na slojeve:  $\Delta s$  je rastojanje između dva susedna sloja,  $R_k$  radijus kome, a  $d$  rastojanje pravca ulaznog zraka svetlosti od centra kome. Veća koncentracija Na u komi prikazana je tamnijom nijansom sive boje, a manja svetlijom.

Figure 1. Spherical model of coma divided into equidistant layers:  $\Delta s$  is distance between two adjacent layers,  $R_k$  is radius of coma,  $d$  is distance between the incoming beam of light and center of coma. As the concentration of Na increases the shade of gray gets darker.



Slika 2. Poprečni presek kome u pravcu vizure i pravcu normalnim na pravac vizure. Elementarne površine predstavljene su različitim nijansama. Svakom pravcu odgovara izlazni intenzitet na određenom odstojanju od jezgra komete.

Figure 2. Cross section of coma viewed from the viewpoint direction and viewed from the direction perpendicular to the viewpoint direction. Elementary surfaces are represented in different shades.

Pošto koma nije beskonačno malih dimenzija, na ukupan intenzitet (tj. onaj koji se dobija snimanjem spektra kome) utiče zajednički doprinos intenziteta više međusobno paralelnih pravaca. Ukupan izlazni intenzitet dobija se integraljenjem izlaznih intenziteta na datoj talasnoj dužini po elementarnim površinama kome  $dP = 2\pi r dr$  (slika 2).

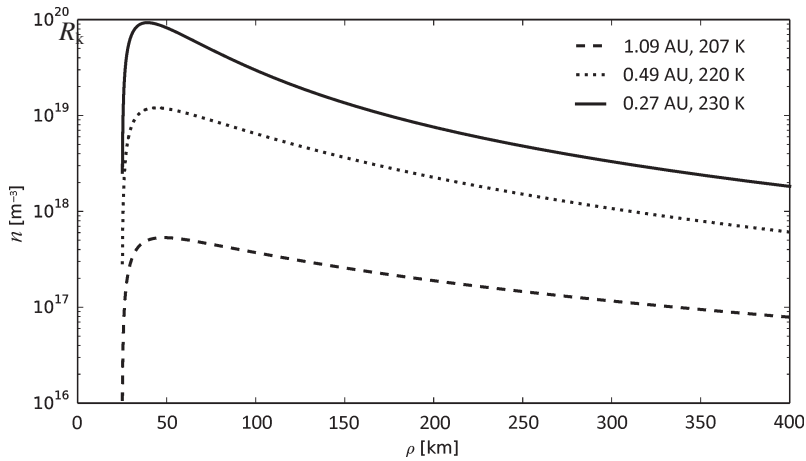
Iz prointegraljenog izlaznog intenziteta može se izračunati fluks emisiona linije Na, koji predstavlja površinu krive ispod grafika zavisnosti intenziteta linije od talasne dužine. Integral je izračunat numerički, metodom pravougaonika.

## Rezultati i diskusija

U ovom modelu komete uzete su fiksne vrednosti za poluprečnik ( $R_n = 25$  km) i gustinu jezgra ( $\rho = 100$  kg/m<sup>3</sup>), a poluprečnik kome  $R_k = 400$  km. Koma je podeljena na 100 ekvidistantnih slojeva. Talasna dužina D2 linije Na iznosi 589.2 nm. Jednačina prenosa zračenja rešena je analitički pod pretpostavkom da funkcijom izvora dominira rasejanje. Zbog nulte vrednosti gradijenta temperature u koma, funkcija izvora bila je konstantna za celu koma i jedino se menjala sa promenom heliocentrične udaljenosti.

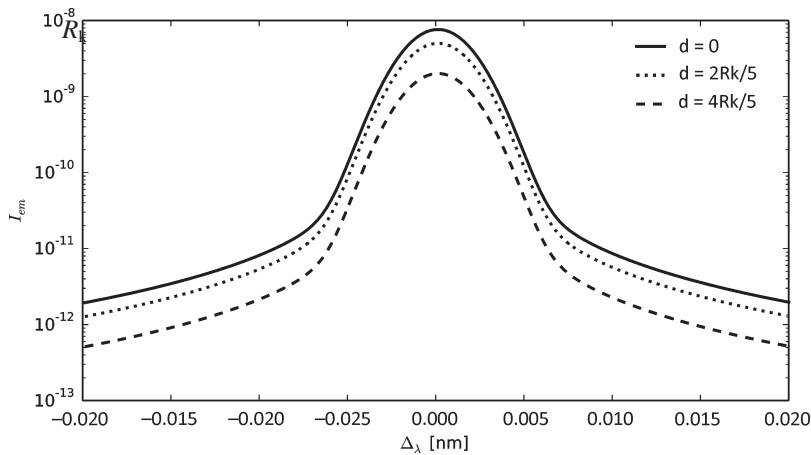
Izračunavanjem parametara Haserovog modela i iz jednačine (6) dobijena je raspodela koncentracije Na u koma za različite temperature (slika 3).

Na malim radijusima gotovo i da nema čestica Na, jer se u tom delu nalazi jezgro komete. Na većoj udaljenosti od jezgra stvara se sve više elementarnog Na, sve dok koncentracija ne dostigne maksimalnu vrednost. Ovo se dešava jer postoji rastojanje od centra na kojem dolazi do zasićenja natrijumom. Elementarni Na se jonizuje, čime se smanjuje njegova koncentracija. Sa povećanjem temperature jezgra (odn. smanjivanjem njegove heliocentrične udaljenosti) raste i koncentracija Na, jer čestice leda počinju sve više da sublimuju i izbacuju gasove (između ostalih i Na).



Slika 3.  
Koncentracije Na u koma  
u zavisnosti od  
rastojanja od centra  
jezgra za različite  
temperature

Figure 3.  
Concentration of Na in  
the coma as a function of  
the distance from the  
nucleus for different  
temperatures



Slika 4.  
Profil linije Na za  
različite pravce.  $R_k$  –  
radijus kome je 400 km.  
Kometa je na udaljenosti  
od 1 AU.

Figure 4.  
Line profile of sodium  
for different directions.  
 $R_k$  – radius of coma is  
400 km. Distance of the  
comet is 1 AU.

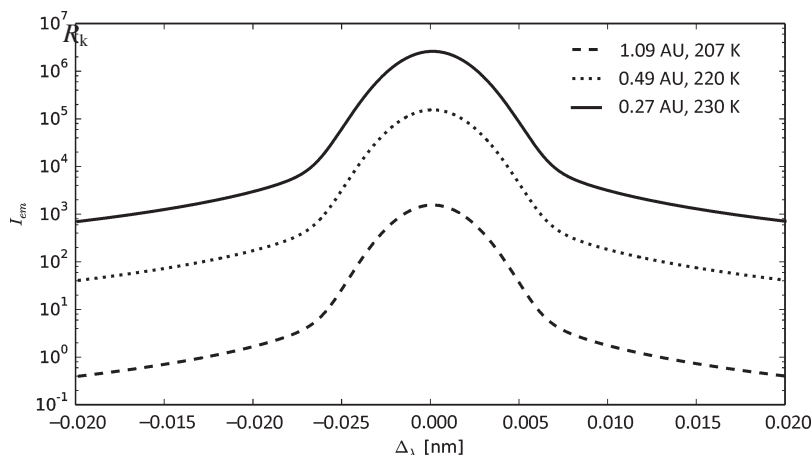
Za nekolinearni položaj Sunca, komete i posmatrača, dobijen je izlazni intenzitet za različite talasne dužine. Na slici 4 prikazana je spektralna linija Na za tri različite udaljenosti pravca prostiranja zraka od jezgra, na rastojanju komete od 1 AU.

Što je zrak bliži jezgru, to će prolaziti kroz više slojeva, ujedno gušćih, pa će optički put biti veći. Samim tim, intenzitet linije je veći, odnosno linija će biti izraženija.

Ukupan izlazni intenzitet dobija se integraljenjem izlaznog intenziteta po površini kome. Na slici 5 prikazane su spektralne linije koje potiču od cele kome za tri heliocentrične udaljenosti.

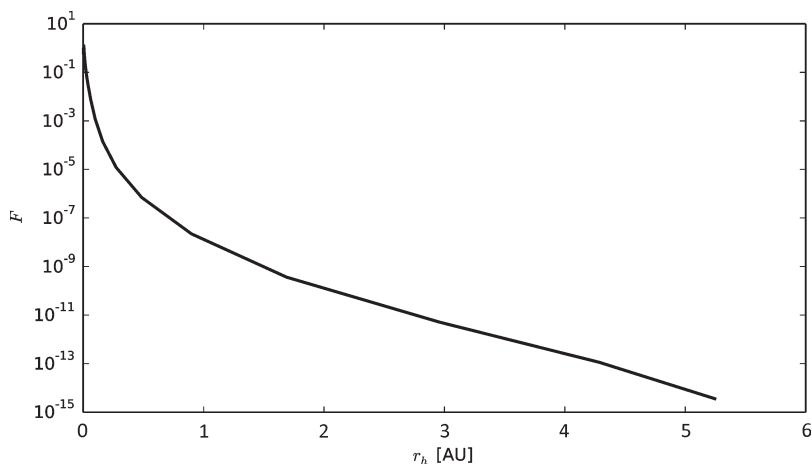
Što je manja udaljenost komete od Sunca, to je koncentracija Na u svakom sloju veća (u skladu sa slikom 3), pa je veći i optički put. Takođe, i funkcija izvora raste, jer će biti više fotona koje koma može da raseje. Promena ovih fizičkih veličina dovodi do naglog povećanja ukupnog izlaznog intenziteta, pa i fluksa linije. Zavisnost fluksa linije Na od heliocentrične udaljenosti prikazana je na slici 6.





Slika 5.  
 Profil linije Na koji  
 potiču od cele  
 kome/ukupan profil

Figure 5.  
 Line profile of sodium  
 formed in coma



Slika 6.  
 Zavisnost fluksa linije od  
 heliocentrične  
 udaljenosti

Figure 6.  
 Flux of the sodium line  
 as a function of the  
 heliocentric distance

Fluks linije opada, u skladu sa slikom 5, sa udaljavanjem komete od Sunca, odnosno linija postaje manje izražena.

## Zaključak

U ovom radu predstavljena je teorijska analiza formiranja emisione linije D2 narijuma u atmosferi komete za nekolinearni položaj posmatrača, komete i Sunca. Za različite udaljenosti komete od Sunca dobijeni su profili i izračunati fluksevi D2 linije. Kada se kometa nalazi na udaljenostima od 1 AU i 3 AU, vrednosti fluksa linije se međusobno razlikuju za oko dva reda veličine. Na osnovu dobijenih rezultata zaključeno je da postoji jednoznačna veza fluksa linije D2 i udaljenosti komete od Sunca, pa bi ovo istraživanje moglo da posluži kao metod za procenjivanje heliocentrične udaljenosti komete na osnovu fluksa linije natrijuma u komi.

Jedna od aproksimacija u ovom radu je ta da je kometa modelirana pod pretpostavkom termodinamičke ravnoteže. Da bi se dobio relevantniji opis fizike stanja kome i fotohemijjskih procesa, neophodno bi bilo rešavanje

sistema od 4 diferencijalne jednačine (Crovisier 1984) koje opisuju ekspanziju brzinu gasa, pritisak, temperaturu i gustinu kome. Kada postoji gradijent temperature kome, funkcija izvora nije konstantna za celu komu, pa bi jednačina prenosa zračenja morala da se rešava numeričkim metodama.

Na kraju, bilo bi korisno ovaj postupak primeniti i na organske molekule u komi (CN, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>), s obzirom da njih ima najviše u kometi.

**Zahvalnost.** Autori rada se zahvaljuju mentoru Ivanu Miliću na izdvojenom vremenu i strpljenju, ali i na literaturi koju im je obezbedio, Dušanu Vukadinoviću takođe na strpljenju i pomoći oko izrade rada, kao i Lazaru Živadinoviću na pomoći oko programerskog dela rada. Autori se takođe zahvaljuju rukovodiocu seminara, Mateji Boškoviću, na dostavljenoj literaturi i Andriji Kostiću na konsultacijama u vezi sa njegovim petničkim radom.

---

## Literatura

- Atanacković O., Vukićević-Karabin M. 2010. *Opšta astrofizika*. Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva
- Crovisier J. 1984. The water molecule in comets: fluorescence mechanisms and thermodynamics of the inner coma. *Astronomy and astrophysics*, **130**: 361.
- Delsemme A. H., D. C. Miller D. C. 1957. Physico-chemical phenomena in comets – III The continuum of comet Burnham (1960 II). *Planetary and Space Science*, **19**: 1229.
- Fernandez J. A. 2005. *Comets: Nature, Dynamics, Origin, and their Cosmogonical Relevance*. Springer
- Festou M., Keller H. U., Weaver H. A. 2005. *Comets II*. Tucson: The University of Arizona press
- Glazer A. M., Wark J. S. 2001. *Statistical Mechanics: A Survival Guide*. Oxford University Press
- Gray D. 2005. *The observation and analysis of stellar photospheres*. Cambridge University Press.
- Haser L. 1957. Distribution d'intensite dans la tete d'une comete. *Bulletin de l'Académie Royale des Sciences de Belgique Classe des Sciences*, **43** (5): 740.
- Helbert J. 2002. Studying the longterm evolution of gas activity in the coma of Comet C/1995 O1 (Hale-Bopp), with a special focus on the chemistry of carbon bearing molecules. PhD thesis, University of Berlin
- Kelleher D. E. Podobedova L. I. 2008. Atomic transition probabilities of sodium and magnesium. A critical compilation. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, **37**: 267.

- Kupperman D. G., Paxton L. J., Carbary J., Romick G. J., Anderson D. E., Meng C-I. 1998: On the sodium tail of comet Hale-Bopp (C/1995 O1). *Geophysical research letters*, **25** (17): 3261.
- Ma Y., Williams I. P. 2002. Cometary Ejection and Meteoroid Streams. U *The Proceedings of the IAU 8th Asian-Pacific Regional Meeting, Volume II* (ur. S. Ikeuchi *et al.*) Tokyo: The Astronomical Society of Japan, str. 49-50.
- Prodanović T. 2010. *Uvod u spektroskopiju za astronome*. Novi Sad: Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Novom Sadu
- Rutten R. J. 2003. *Radiative Transfer in Stellar Atmospheres*. Utrecht University lecture notes, 8th edition.  
Dostupno na: [http://www.staff.science.uu.nl/~rutte101/rrweb/rjr-edu/coursenotes/rutten\\_rtsa\\_notes\\_2003.pdf](http://www.staff.science.uu.nl/~rutte101/rrweb/rjr-edu/coursenotes/rutten_rtsa_notes_2003.pdf)
- Sansonetti J. E. 2008. Wavelengths, transition probabilities, and energy levels for the spectra of sodium (Na I–Na XI). *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, **37**: 1659.

---

*Nastasija Petković and Milan Kresović*

## Forming of the D2 Emission Line of Sodium at 589 nm in the Comet's Atmosphere

In this paper we examined the relation between the flux of the sodium line formed in a coma and the heliocentric distance of a comet. We assumed that the comet is in the global thermodynamic equilibrium. We used the modified Whipple model for the nucleus and the Haser model for the coma. Solving the radiative transfer equation, under the assumption that the dominant process in the source function is scattering, we generated the sodium line profiles for the different heliocentric distances of the comet. Our results suggest the existence of correlation between the flux of the line and the comet's distance from the Sun.

