

Raspodela temperature u Sunčevim protuberancama

Na osnovu karakteristika snimljenih vodonikovih H α linija iz emisionog spektra Sunčevih protuberanci, određene su njihove temperature na raznim mestima vidljive površine, pri čemu je pretpostavljen plan-paralelni model protuberanci. Dobijene temperature su predstavljene na slikama protuberanci. Ovako dobijene raspodele temperatura su potom diskutovane gradijentom temperature tipičnih oblasti protuberance.

Uvod

Sunčeva aktivnost se manifestuje raznim formama u površinskim slojevima i atmosferi Sunca. Iako fenomenološki mogu biti veoma raznovrsne, svima je uzrok magnetno polje. Jedan od oblika Sunčeve aktivnosti su tzv. Sunčevi filamenti. To su objekti hromosferske plazme koji potiču iz hromosfere, a zalaze u koronu. Oni mogu biti iznad sjajnog Sunčevog diska, kada izgledaju kao tamna vlakna, i van diska kada se na tamnoj pozadini vide u emisiji i kao ovakvi nazvani su protuberance (slika 1).

Protuberance su svetli objekti koji mogu biti lučnog oblika ako se pružaju u ravni upravnoj na pravac posmatranja, ili u obliku mlaza ako se pružaju upravno na tu ravan. Mogu biti i odvojene od Sunca. Kako su sličnog sastava kao hromosfera, oko 100 puta su gušće i hladnije od okruženja, tj. korone. Dele se na mirne i aktivne, u zavisnosti od njihove dinamičnosti.

Mirne protuberance traju od nekoliko dana do više meseci i nalaze se uglavnom izvan aktivnih regiona. Dugačke su oko 10^4 - 10^5 km a debljina im je oko 10^3 - 10^4 km. Iako su mirne, i one ispoljavaju varijacije u finoj strukturi materije u skali od par minuta. Aktivne protuberance se nalaze u okolini

aktivnih regiona. Uslovi za stabilnost protuberanci su povezani sa magnetnom konfiguracijom.

Cilj ovog rada je da se na osnovu H α linija vodonika iz emisionog spektra protuberanci odredi raspodela njihovih temperatura.

Materijal i metode

Teorijske osnove metoda

Radi dobijanja formule za izlazni intenzitet zračenja protuberance (koji dolazi do posmatrača) potrebno je rešiti jednačinu prenosa zračenja u sredini koja zrači. Pre rešavanja jednačine radi pojednostavljenja problema uvedene su sledeće pretpostavke:

- Sredina je planparalelna odnosno sastoji se od niza beskonačno tankih homogenih slojeva koji su međusobno paralelni. Neka je z-osa osa koja je normalna na pretpostavljene plan-paralelne ravni a potiče iz izvora i ima smer prema spoljašnjoj sredini (prema posmatraču).
- Fizičke veličine kojima opisujemo sredinu su vremenski nezavisne.
- Intenzitet posmatramo u pravcu vizure

Uz navedene pretpostavke jednačina prenosa zračenja se može napisati u obliku

$$\frac{dI_v(\tau_v)}{d\tau_v} = I_v(\tau_v) - S_v(\tau_v). \quad (1)$$

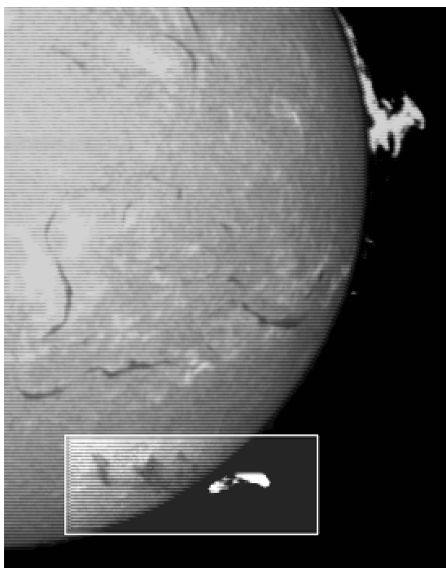
U ovoj formuli τ_v je optička dubina definisana formulom:

$$\tau_v = \int_0^{\xi} \alpha_v z dz,$$

gde je α_v koeficijent apsorpcije. $S_v(\tau_v)$ funkcija izvora definisana kao količnik koeficijenata emisije i apsorpcije.

Filip Živanović (1992), Beograd, Borska 13a, učenik 2. razreda Matematičke gimnazije u Beogradu

MENTOR: Ivan Milić, student astrofizike na Matematičkom fakultetu u Beogradu



Slika 1.
Sunčevi filamenti i protuberance snimljeni u H_{α} filteru

Figure 1.
Solar filaments and prominences recorded in H_{α} filter

Uz pretpostavke da koeficijenti apsorpcije i emisije ne zavise od pravca i da je funkcija izvora u protuberanci konstantna, nakon formalnog rešavanja jednačine (1) dobija se zavisnost izlaznog intenziteta od talasne dužine:

$$I_{\lambda}(0) = I_{\lambda} = S(1 - e^{-\tau_{\lambda}})$$

Na ovaj intenzitet treba dodati i kontinuum koji potiče od rasejane svetlosti Sunca, pa ova jednačina dobija oblik:

$$I(\lambda) = I_0 + S(1 - e^{-\tau_{\lambda}})$$

Optička debljina linije u zavisnosti od talasne dužine po definiciji je jednaka:

$$\tau_{\lambda} = \tau \varphi_D(\lambda),$$

gde je $\varphi_D(\lambda)$ profil koeficijenta apsorpcije, odnosno normalizovana zavisnost koeficijenta apsorpcije u liniji od talasne dužine

Pretpostavlja se da je jedini efekat koji utiče na širenje spektralne linije u ovom slučaju termalno širenje, usled Doplerovog efekta na emitere u plazmi. Ovo se može pretpostaviti jer su ostali uzroci širenja (prirodno, sudarno, rotaciono, instrumentalno) u ovom slučaju zanemarljivi. Takođe se pretpostavlja da važi

Maksvelova raspodela atoma po brzinama. Profil spektralne linije proširene Doplerovim efektom je Gausova kriva tj.

$$\varphi_D(\lambda) = e^{-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda_D}\right)^2},$$

pri čemu je λ_0 talasna dužina koja odgovara maksimumu linije, a $\Delta\lambda_D$ Doplerova poluširina profila linije (polovina širine na visini koja je e puta manja od maksimuma).

Zavisnost parametra $\Delta\lambda_D$ od temperature data je relacijom:

$$\Delta\lambda_D = \sqrt{\frac{2kT}{mc^2}} \lambda_0$$

gde je k Bolcmanova konstanta, c brzina svetlosti u vakuumu, T temperatura gasa u protuberanci, a m masa jednog atoma/molekula gasa koji zrači.

Neka je w polu-poluširina posmatrane linije (polovina širine na polovini visine). Ona se može izraziti preko $\Delta\lambda_D$ kao:

$$w = 0.984\Delta\lambda_D = \beta\Delta\lambda_D$$

Ovim je dobijena konačna veza između w i T , koja je korišćena za računanje temperature:

$$T = \frac{mc}{2k\lambda_0\beta^2} w^2. \quad (2)$$

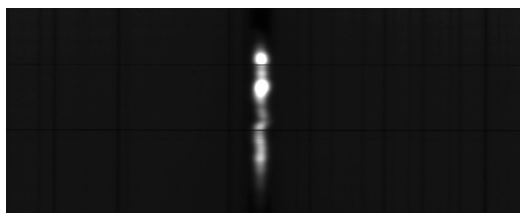
pri čemu je λ_0 – talasna dužina H_{α} linije vodonika ($\lambda_0 = 6563 \text{ \AA}$).

Podaci

Početni materijal za rad je dat u obliku snimljenih H_{α} linija vodonika iz emisionog spektra protuberanci snimljenih u periodu od aprila 2007. do juna 2008. Protuberance su posmatrane na heliospektrografu u Ondrejovu, Češka Republika, a podaci su preuzeti sa njihovog sajta (http://www.asu.cas.cz/~sos/archive_hsf.html). Primer snimka jedne takve linije je prikazan na slici 2. Na slici 3 prikazan je snimak protuberance sa prorezom iz kojeg je dobijena ova linija.

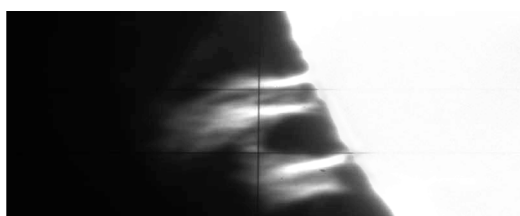
Postupak

Izabrano je 5 protuberanci koje su bile najviše pokrivene prorezima (na raznim mestima njihove površi), jer su upravo takve potrebne za što detaljniji prikaz raspodele temperature.



Slika 2. Primer snimljene H_α vodikove linije

Figure 2. Example of the recorded H_α hydrogen line



Slika 3. Primer slike protuberance u H_α filtru sa naznačenim prorezom

Figure 3. Example image of prominence in H_α filter with specified slot

Sa svake snimljene H_α linije su u programu Maxim DL na više mesta (duž proreza) uzimane linije. Dobijeni profili su najpre linearno interpolirani radi veće preciznosti, sa 1300 na 10000 tačaka, a kasnije su obrađivani po sledećoj proceduri:

1. Najpre se nađe vrednost I_0 kao srednja vrednost početnih 10 intenziteta.
2. Izmeri se $I(\lambda_0)$ kao maksimalna vrednost intenziteta.
3. Zatim se odredi I_{sr} kao aritmetička sredina I_0 i $I(\lambda_0)$
4. Nađu se vrednosti λ čiji su intenziteti najbliži I_{sr} (dve vrednosti: $\lambda' < \lambda_0$ i $\lambda'' < \lambda_0$)
5. Zatim se polu-poluširina w izračunava kao $(\lambda'' - \lambda')/2$
6. Preko w se izračuna T .

Temperatura T računata je preko polu-poluširine w pomoću formule (2) koja, kada se konstante izraze u SI sistemu, dobija sledeći oblik:

$$T = 24.903 w^2. \quad (3)$$

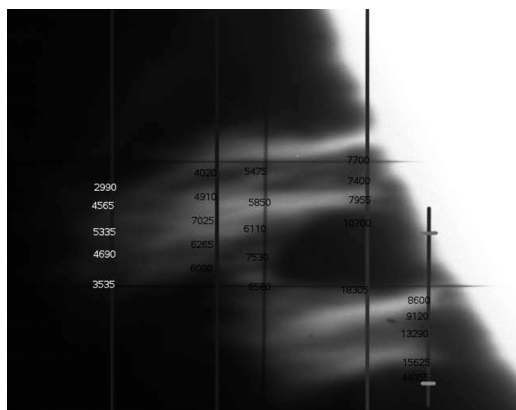
gde je w izraženo u pikselima, pri čemu na slikama profila važi konverzija $1 \text{ px} \sim 0.0138 \text{ \AA}$.

Dobijene temperature su mapirane na slici svake protuberance ponaosob, na mestima iz kojih su odgovarajuće im linije izvlačene.

Rezultati

Mapirano je 6 slika za 5 protuberanci, jer je jedna protuberanca, zbog uočljive promene oblika tokom snimanja podeljena u dve faze. Primer jedne mapirane slike je slika 4 (tamne linije na slici predstavljaju proreze na raznim mestima).

Dobijene su temperature koje su u dijapazonu koji odgovara poznatim temperaturama protuberanca koje iznose $(4-10)10^3 \text{ K}$ (Labrosse *et al.* 2005), osim kod nekih protuberanci, gde su u predelima sasvim blizu Sunca dobijene temperature oko $(3-8) 10^4 \text{ K}$.



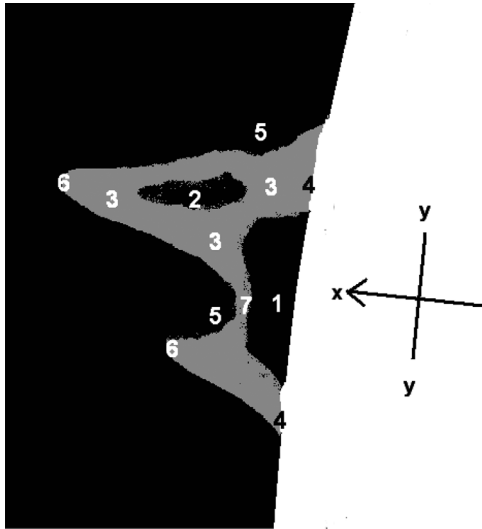
Slika 4. Raspodela temperature jedne protuberance u ravni Sunčevog diska

Figure 4. Temperature distribution of a prominence in the plane of the solar disk

Na osnovu ovako dobijenih slika formiran je prikaz uopštenog modela protuberance sa naznačenim tipičnim oblastima na kojima su posebno razmatrene dobijene vrednosti temperature (slika 5).

Iz dobijenih raspodela temperatura uočava se sledeće:

- Pri približavanju oblastima 1 i 2 (šupljinama) gradijent temperature je pozitivan.
- Isto važi i za oblasti 3, ali samo ako nema šupljina u njihovoj neposrednoj okolini.



Slika 5. Model i tipične oblasti protuberance

Figure 5. Model and typical areas on a prominence

- Kod nekih protuberanci u oblastima 4 temperature su jako visoke (reda 50 000 K).
- Kod pojedinih protuberanci gradijent temperature je po određenim radijalnim pravcima (duž x-ose) pozitivan, a po drugim radijalnim pravcima negativan. Ova osobina je kod izvesnih protuberanci veoma izražena, a kod nekih nije ni uočena.
- Može se uočiti i da je pri približavanju oblastima 5 iz neposredne okoline gradijent temperature pozitivan, ali ne uvek.
- Takođe se može uočiti da je u oblastima 7 temperatura veća nego u susednim oblastima u protuberanci.

Zaključak

Primenom planparalelnog modela protuberance, na osnovu snimaka protuberanci u H_{α} liniji, dobijene su temperature koje se nalaze u dijapazonu koji odgovara poznatim temperaturama protuberanci. Izuzetak predstavljaju dve protuberance u predelima sasvim blizu Sunca, gde su dobijene temperature veće za red veličine.

Po osi koja ima pravac od Sunca ka koroni gradijent temperature uglavnom je pozitivan. Uočena odstupanja (kada je gradijent negativan), verovatno su posledica toga što se protuberance ne pokoravaju pretpostavljenom modelu u potpunosti. Uzroci odstupanja mogu biti:

1. Planparalelni model je grub, jer podrazumeva ravnomernu debljinu protuberanci u pravcu normalnom na ravan posmatranja, što u realnosti nije slučaj, pogotovo ako je pravac njihovog prostiranja u ravni normalnoj na Sunčev disk, to jest, ako se vide u obliku mlazova.

2. Temperatura ne mora biti konstantna duž pravca vizure.

3. Pretpostavljeno je da ne postoji netermalna komponenta brzine, a to nije slučaj, jer je (v. npr. Labrosse *et al.* 2005) poznato da njena vrednost nije beznačajna. Ova komponenta varira na protuberanci, pa se njenim zanemarivanjem pravi greška pri računanju temperature. Verovatno su zbog toga dobijene velike temperature u predelima sasvim blizu Sunca.

Literatura

Vukićević-Karabin M. 1994. *Teorijska astrofizika*. Beograd: Naučna knjiga

Vukićević-Karabin M., Atanacković-Vukomanović O. 2004. *Opšta astrofizika*. Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva

Labrosse N., Heinzel P., Vial J.-C., Kucera T., Parenti S., Gunar S., Schmieder B., Kilper G. 2005. *Physics of Solar Prominences: I - Spectral Diagnostics and Non-LTE Modelling*. Dostupno na: <http://arxiv.org/abs/1001.1620> [20. 08. 2009]

Filip Živanović

The distribution of temperature in solar prominences

Solar prominences are one of the forms of manifestation of solar activity. These are bright, dynamic structures attached to the solar chromosphere entering the dark corona. They have an arc shape (Figure 1). The aim of this study was to determine the temperature at various locations of prominence and discuss the obtained temperature distribution.

The material for the work was given in the form of 200 shots in the H_{α} line (Figure 2) from about 50 prominences. Each of these recordings was obtained with heliospectrograph from the appropriate slot on the prominence (Figure 3). Five prominences which were mostly covered with slots are selected, because of a more detailed view of each temperature distribution. From each of the recordings like Fig. 2 several lines were extracted in Maxim DL. They were then processed in a program that calculated temperature based on half-width of line by formula (3) (which is derived from formula (2)). Temperature dependence of half-width (2) is derived starting from the equation of radiative transfer for the prominence case – with the assumptions that the intensity comes from the perspective, that the physical properties of environment are time-independent, and that the environment is plan-parallel (that it consists of a series of infinitely thin homogeneous layers that are parallel to each other). Then the transfer equation gets the form (1), and further assuming that the absorption and emission coefficients are independent of the direction, that a source function of the prominences is constant, the equation can be resolved and thus we can obtain the intensity function of wavelength which is exactly what is needed for the function of H_{α} line. If it is assumed that the only effect that causes the line broadening is a thermal (Doppler) effect, because the other causes of the line broadening in our case are negligible, we derive the formula for the in-

tensity in which temperature occurs. From this formula with certain mathematics approximations relation (2) can be derived. The obtained temperatures are represented in images like Figure 3 on places from which their respective lines were extracted. Thus 6 images were obtained (e.g. Figure 4), because one of 5 chosen prominences was divided into two phases because of noticeable shape change during recording. Then a prominence model with numbered areas in which partial regularity was identified in the temperature gradient (Figure 5) was formed. From the obtained temperature distribution, it is noticed that while approaching the areas of type 1 or 2 the temperature gradient (gradient in the following text) is positive. The same is noticed for areas of type 3, but not always. The temperature gradient at x-axis in some parts of the prominences is positive, but in some others it is not (observing along the y-axis, Figure 5). This feature differs at various prominences: at some of them it is more pronounced, but at the others it is not even noticed. A positive gradient was also obtained while approaching areas of type 5 (but not always), and type 7.

The above given method proved to be suitable for calculating the temperature, as obtained temperatures of prominences are in a range corresponding to known amounts $(4-10) \times 10^3$ K (Labrosse *et al.* 2005), except for some prominences, where the obtained temperatures in areas close to the Sun (areas 4, Fig. 5) are about $(3-8) \times 10^4$ K. 