
Ivana Vidanović

Određivanje metaličnosti unutrašnjeg haloa Mlečnog puta

U okviru modela galaktičke fontane razmatrano je isticanje gasa iz diska sa dinamičkog i termodinamičkog aspekta. Procenjene su ravnotežne visine oblaka različitih metaličnosti kao visine na kojima se izjednačavaju temperatura oblaka i temperatura pozadine. Uočava se da zavisnost metaličnosti od visine ima oblik opadajuće eksponencijalne funkcije. Jedina odstupanja u odnosu na očekivanu zavisnost nastaju usled toga što se temperatura oblaka manje metaličnosti koji se sporo hlade izjednačava sa temperaturom pozadine tek na njihovoj silaznoj putanji, što zahteva delimičnu korekciju polazne pretpostavke o proceni ravnotežne visine.

Uvod

Postojanje vreloug gasnog haloa ($T \approx 10^6$ K) koji se prostire nekoliko kiloparseka iznad i ispod ravni Mlečnog puta prvi je predvideo Spitzer (1956), koji je razmatrao mogućnost uspostavljanja ravnoteže između ove komponente i hladnije, gušće komponente međuzvezdane materije. Vreli gas manje gustine čini "galaktičku koronu" koja se nalazi u hidrostatičkoj ravnoteži u gravitacionom polju galaksije. Ova hipoteza je nastala iz posmatranja međuzvezdanih oblaka u NaI i CaII optičkoj apsorpciji na velikim rastojanjima od galaktičke ravni. Prisustvo spoljnog medijuma je neophodno da bi takvi oblaci postojali.

Nekoliko godina kasnije, posmatranjima u mekom X-zračenju (energije 0.25 keV), otkrivena je galaktička pozadina kao i apsorpcione linije ultraljubičastog dela spektra međuzvezdanog porekla (npr. OVI apsorpcione linije). Iz toga je zaključeno da u disku Galaksije postoji koronalna komponenta međuzvezdane materije, kakvu je Spitzer predvideo za galaktički halo. Takođe se, razmatranjem dejstva supernovih na ISM (interstellar medium – međuzvezdana materija), došlo do zaključka da veliki deo gasa u disku mora biti u koronalnoj fazi, tj. na temperaturi od nekoliko miliona kelvina i niske gustine.

*Ivana Vidanović
(1983), Jagodina,
Braće Dirak 33/I-16,
učenica 4. razreda
Matematičke
gimnazije u Beogradu*

*Mentor:
Dr Milan M.
Ćirković,
Astronomska
opservatorija, Beograd*

U radu iz 1976. godine Shapiro i Field su ponovo razmotrili globalni energijski balans međuzvezdane materije koja se zagreva eksplozijama supernovih, kao i uticaj tog zagrevanja na detektovano meko X-zračenje i OVI apsorpcije. To ih je dovelo do modela *galaktičke fontane*, mehanizma koji opisuje kako se održava energijski balans međuzvezdane materije. Prema ovom modelu, energija koja se preda međuzvezdanoj materiji u toku eksplozija supernovih zagreva gas i omogućava mu da napusti disk i pređe u halo, gde se hladi zračenjem. Za pretpostavljenu gustinu od 10^{-3}cm^{-3} gas se ohladi za vreme kraće od vremena prolaska zvuka kroz sredinu, usled čega ne može da se uspostavi hidrostatička ravnoteža. Stoga se gas kondenzuje i formiraju se oblaci koji više nisu podržavani spoljnim pritiskom, pa se balističkim kretanjima mogu vratiti u galaktičku ravan. Ovaj konvektivno-radijativni cirkularni mehanizam uspešno objašnjava rasipanje energije koja se oslobađa pri eksplozijama supernovih, a istim se mehanizmom može objasniti i postojanje oblaka velikih brzina (u daljem tekstu: HVC – od engleskog high velocity clouds) posmatranih u radio domenu na talasnoj dužini od 21 cm (zračenje atomskog vodonika). Novija određivanja rastojanja do jednog HVC-a pokazala su da se on nalazi u galaktičkom halou, što je u saglasnosti sa idejom da se oblaci formiraju u procesu fontane (Benjamin & Shapiro 1997).

Posledica prelaska gasa iz diska u halo je mešanje gasa veće metaličnosti (gas iz diska je obogaćen težim elementima usled procesa koji su posledica zvezdane evolucije) i gasa iz haloa koji je niže metaličnosti. Metaličnosti HVC kompleksa su procenjene na jednu desetinu solarne (standardne), što takođe više ide u prilog modelu galaktičke fontane, nego alternativnom objašnjenju prema kojem je HVC kompleks primordijalnog vangalaktičkog porekla. Metaličnost oblaka ne utiče značajno na njihovo kretanje u gravitacionom polju galaksije (odnosno, oblaci različitih metaličnosti imaju sličnu dinamiku), ali unosi velike razlike u proces hlađenja.

Cilj ovog rada je da se metaličnost u unutrašnjem halou galaksije odredi na osnovu modela galaktičke fontane. Pri razmatranju isticanja gasa iz diska uključena je sila otpora koja nije bila uvedena u dosadašnjim modelima, mada je njen uticaj uočen pri kretanjima HVC-a. (Ispostavlja se da su brzine ovih oblaka veće što su oni dalje od galaktičke ravni.) Ravnotežna visina oblaka procenjena je kao visina na kojoj se njihova temperatura izjednači sa temperaturom pozadine.

Dinamika oblaka

Radi jednostavnosti, smatramo da se oblaci kreću samo duž z -ose (pravac normalan na galaktički disk). Masa, površina i brzina oblaka su redom m_c , A_c i v_c ; gustina i gravitaciono ubrzanje na visini z iznad galaktičke ravni su $\rho_h(z)$ i $g_h(z)$.

Osnovna jednačina kretanja gasa u gravitacionom polju Galaksije je:

$$m_c \frac{dv_c}{dt} = -\frac{1}{2} C_D \rho_h(z) [v_c - v_h(z)]^2 A_c - m_c g(z) \quad (1)$$

Većina ranijih radova razmatra balističko kretanje oblaka, tj. zanemaruje silu otpora. Primećeno je da su brzine HVC-a veće što je veće njihovo rastojanje od diska, odnosno brzine oblaka više odgovaraju terminalnoj brzini koja se dostiže kada se izjednači intezitet gravitacione sile i sile otpora (Benjamin *et al.* 1997). Kao polazna pretpostavka, u gornjoj jednačini je uzeto da je sila otpora proporcionalna kvadratu brzine.

Koeficijent proporcionalnosti C_D ukazuje na efikasnost predaje impulsa oblaku.

Korišćeni koeficijent proporcionalnosti je $C_D = 1$. Smatra se da je oblak u toku kretanja celina konstantne mase, što znači da se zanemaruju različite hidrodinamičke nestabilnosti i akrecija gasa pri prolasku oblaka kroz halo. Jednačina (1) je rešavana numerički, pri čemu su korišćene sledeće zavisnosti:

1. Zavisnost gravitacionog ubrzanja od z koordinate:

$$g(z) = 9.5 \cdot 10^{-9} \tanh(z / 400 \text{ pc}) \text{ cm s}^{-2}.$$

2. Raspodela gustine u gasnom halou je još uvek nepoznata. Kako teorijski modeli koji razmatraju ovo pitanje još uvek nisu kompletni, korišćene su empirijski dobijene raspodele. Gustina $\rho_h(z)$ predstavlja zbir sledećih komponenti:

1) gustina toplog sloja jonizovanog vodonika $\rho_1 = 0.025 e^{-z/910 \text{ pc}} \text{ cm}^{-3}$

2) gustina neutralnog vodonika $\rho_2 = 0.064 e^{-z/403 \text{ pc}} \text{ cm}^{-3}$

3) gustina vrelog haloa $\rho_3 = 1.1 \times 10^{-3} [1 + z^2 [\text{kpc}] / 19.6]^{-1.35} \text{ cm}^{-3}$

Pretpostavljeno je da pozadinski medijum miruje. Ova pretpostavka može da bude loša za najniže delove haloa, jer usled eksplozija supernovih i drugih fenomena ima kretanja materijala te bi trebalo razmatrati interakciju oblaka pri kretanju.

Termodinamika oblaka

Jednačina koja opisuje hlađenje oblaka je:

$$\frac{dE}{dt} = (\Gamma - \Lambda^*) + \frac{(p + E)}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \quad (2)$$

gde je p pritisak gasa u oblaku, ρ gustina, a $E = p/(\gamma - 1)$ unutrašnja energija po jedinici zapremine (korišćena je vrednost $\gamma = 5/3$ za nerelativistički monoatomski gas). Vrednost Γ predstavlja spoljnu stopu zagrevanja gasa, dok je Λ^* stopa hlađenja koja zavisi samo od fizičkih karakteristika

gasu – pre svega temperature i metaličnosti. U opštem slučaju rešenje gornje jednačine je oblika:

$$\frac{d}{dt} \left[\ln \frac{T}{\mu_m} \right] = \left(s + \frac{3}{2} \right)^{-1} \frac{(\Gamma - \Lambda^*)}{p} \quad (3)$$

Vrednost parametra s je nula kada je hlađenje izohorsko, odnosno je dan pri izobarskom hlađenju. U prvoj aproksimaciji zanemaruje se spoljnje zagrevanje. Jednačina (3) se svodi na:

$$\frac{dT}{dt} = \left(s + \frac{3}{2} \right)^{-1} \frac{\Lambda^*(T, z)}{nk} \quad (4)$$

$$\Lambda^*(T, z) = n_e \rho_h \Lambda(T, z) \quad (5)$$

gde je n_e – elektronska koncentracija u gasu.

Parametar s se određuje na sledeći način: ukoliko je vreme prolaska zvuka kroz oblak manje od vremenskog koraka koji se koristi pri rešavanju diferencijalne jednačine, hlađenje se smatra izobarskim. (Brzina prenosa zvuka je jednaka brzini prenosa bilo kog mehaničkog poremećaja kroz sredinu, odnosno u prethodnom slučaju ima dovoljno vremena da se pritisak izjednači u celom oblaku). U suprotnom, hlađenje se smatra izohorskim.

Vrednosti funkcije hlađenja (Λ^*) su preuzete iz rada Sutherland-a i Dopita-e (1993). Funkcija je predstavljena numerički za temperature u opsegu od trideset hiljada do trideset miliona kelvina i za metaličnosti od 0, 0.01, 0.1, 0.3 i 1 u jedinicama solarne metaličnosti. Preuzete vrednosti interpolirane su kvadratnim splajn polinomom, jer se ispostavilo da daje bolje rezultate nego Lagranžev interpolacioni polinom ili najčešće korišćeni kubni splajn (slika 1). Na slici 1 bele tačke predstavljaju dekadne logaritme funkcije hlađenja za tri vrednosti metaličnosti –0.33, 0.1 i 0.01 (u jedinicama standardne solarne metaličnosti). Crne tačke predstavljaju interpolirane vrednosti dekadnog logaritma funkcije hlađenja (u $\text{erg cm}^3 \text{s}^{-1}$) u zavisnosti od dekadnog logaritma temperature (u K) za metaličnost $z = 0.2$.

Temperaturni profil haloa, slično raspodeli gustine, još uvek nije tačno određen. Korišćeni temperaturni profil haloa odgovara adijabatskom halou – profil sa “najblažim” mogućim nagibom (dobijen razmatranjem hidrostatičke ravnoteže u izotermalnoj sferi kojom se modelira halo), pa je njegova jednačina:

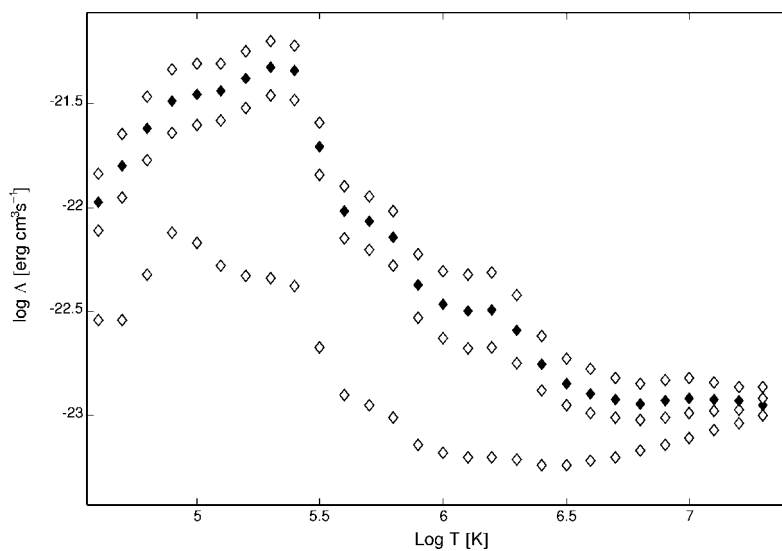
$$T_h(r) = T_h(r_c) \left[1 - \frac{4}{5} \ln \frac{r}{r_c} \right]$$

gde je r_c – radijus hlađenja. Za spiralnu galaksiju ovaj parametar ima vrednost od 100-1000 kpc.

Rezultati

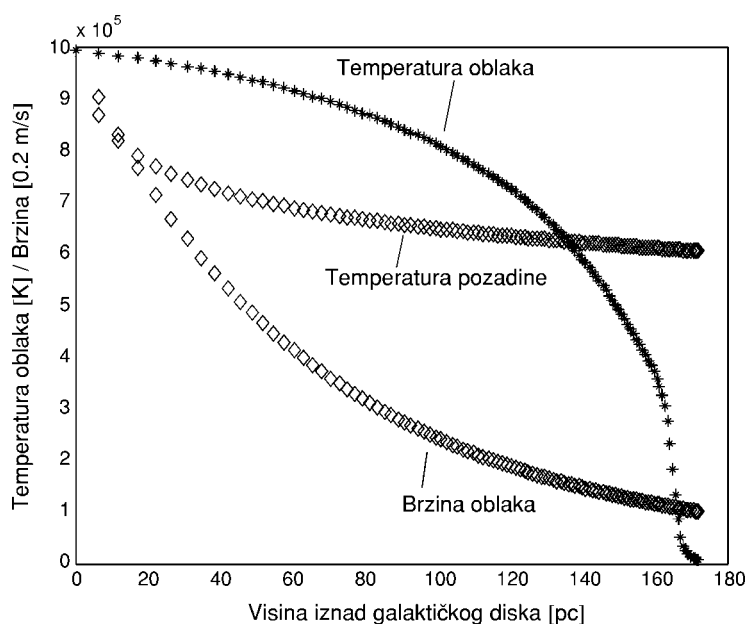
Na osnovu jednačina (1) i (4) dobijena je zavisnost temperature oblaka od visine iznad galaktičkog diska (slika 2). Gas polazi iz diska, brzinom od $100\text{-}300\text{ km s}^{-1}$ a početna temperatura je milion kelvina. Linijska gustina gasa je u intervalu $10^{18}\text{-}10^{20}\text{ cm}^{-2}$.

Ravnotežna visina je definisana visinom iznad diska na kojoj su izjednačene temperatura gasa i pozadine.



Slika 1.
Zavisnost funkcije hlađenja od temperature za različite metaličnosti. Crnim tačkama označene su interpolirane vrednosti za metaličnost $z = 0.2$.

Figure 1.
Dependence of the cooling function from temperature for different metallicity values. Black dots represent interpolated values for metallicity $z = 0.2$

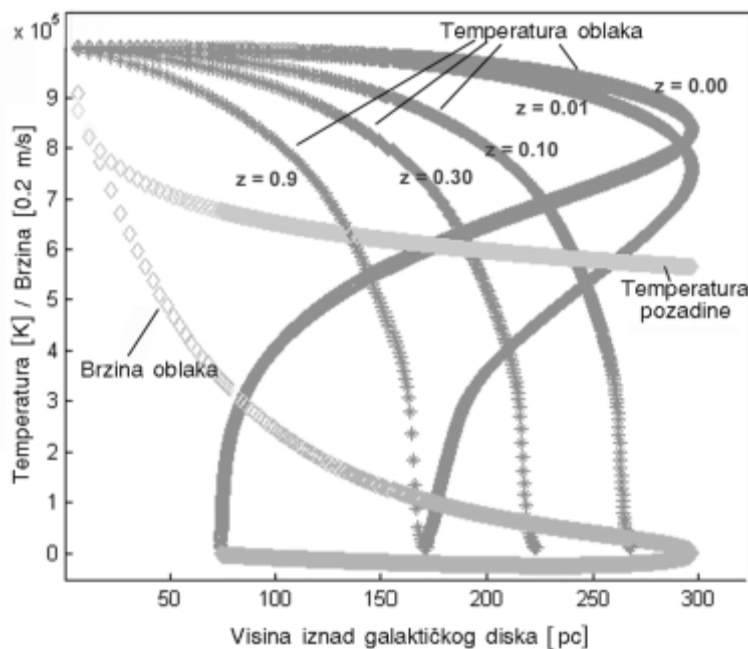


Slika 2.
Zavisnost temperature i brzine od visine iznad galaktičkog diska

Figure 1.
Dependence of temperature and velocity from the height above the galactic disk

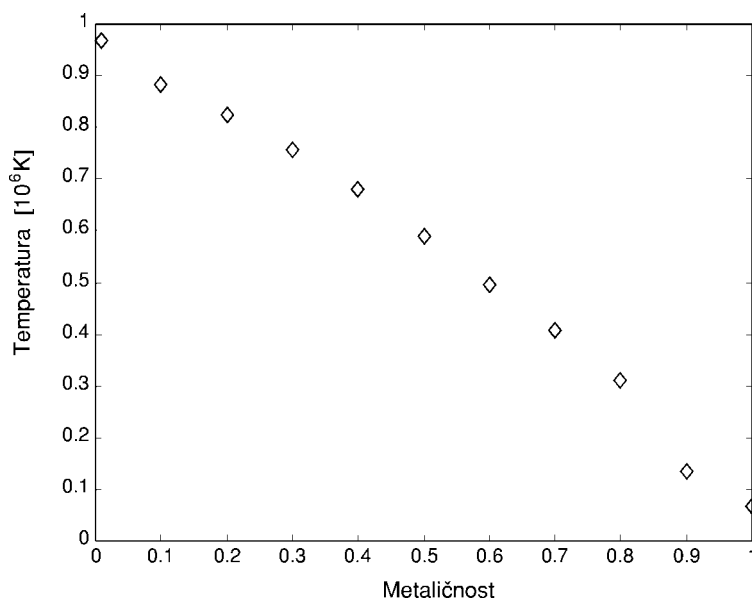
Početna brzina oblaka je 200 km s^{-1} , metaličnost gasa je 0.9 solarne, a linijska gustina 10^{19} cm^{-2} .

Zavisnost temperature i brzine oblaka od visine iznad diska data je na slici 3. Početna brzina oblaka je 200 km s^{-1} , linijska gustina oblaka je 10^{19} cm^{-2} . Metaličnosti oblaka su 0, 0.01, 0.1, 0.3 i 0.9 solarne. Zavisnost brzine oblaka od visine iznad diska je ista za sve metaličnosti.



Slika 3. Zavisnost temperature i brzine oblaka od visine iznad diska za različite metaličnosti

Figure 3. Dependence of temperature and velocity from the height above the galactic disk for different metallicity values

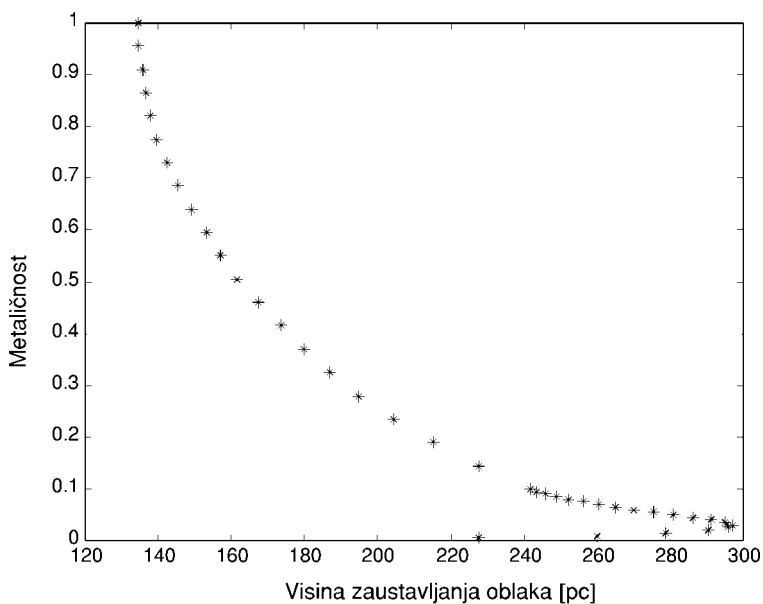


Slika 4. Zavisnost temperature od metaličnosti

Figure 4. Dependence of temperature from metallicity

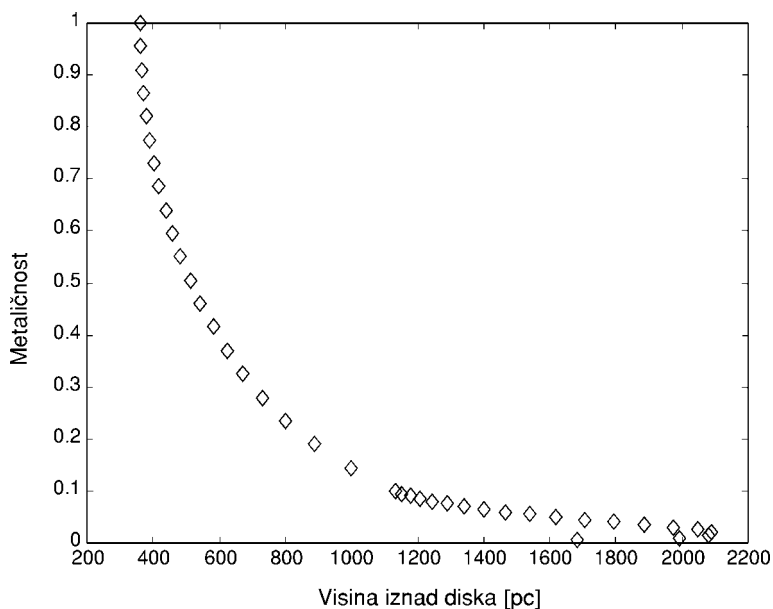
Grafik na slici 4 predstavlja zavisnost temperature (u milionima kelvina) od metaličnosti. Linijska gustina oblaka je $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$, polazna brzina je 300 km s^{-1} , a trenutna visina oblaka je 650 pc.

Zavisnost metaličnosti oblaka od visine zaustavljanja data je na slici 5. Uzeto je da oblaci polaze brzinom od 200 km s^{-1} , linijska gustina oblaka je 10^{19} cm^{-2} . Zavisnost metaličnosti od visine iznad diska data je na slici 6. Oblaci polaze brzinom od 200 km s^{-1} , linijska gustina oblaka je 10^{20} cm^{-2} .



Slika 5.
Zavisnost metaličnosti oblaka od visine zaustavljanja za linijsku gustinu oblaka 10^{19} cm^{-2}

Figure 5.
Dependence of metallicity from the equilibrium height for linear cloud density 10^{19} cm^{-2}



Slika 6.
Zavisnost metaličnosti od visine iznad diska za linijsku gustinu oblaka 10^{20} cm^{-2}

Figure 6.
Dependence of metallicity from the equilibrium height for linear cloud density 10^{20} cm^{-2}

Diskusija i zaključak

Sa grafika na slikama 5 i 6 se uočava da oblaci veće gustine odlaze do većih visina, što je posledica delovanja sile otpora. Zbog ove sile i visine su nešto niže od očekivanih. Takođe, uočava se da zavisnost metaličnosti od visine ima oblik opadajuće eksponencijalne funkcije. Jedina odstupanja u odnosu na očekivanu zavisnost nastaju usled toga što se temperatura oblaka manje metaličnosti koji se sporo hlade izjednačava sa temperaturom pozadine tek na njihovoj silaznoj putanji, što zahteva delimičnu korekciju polazne pretpostavke o proceni ravnotežne visine (tačke u donjem desnom uglu grafika 5 i 6).

Teorijski modeli galaktičkih haloa se dalje testiraju na osnovu apsorpcionih spektara koje bi oni formirali. Za apsorpcione metalne linije u spektrima kvazara se smatra da nastaju u unutrašnjim haloima galaksija, gde je došlo do obogaćivanja primordijalnog gasa težim elementima iz diska. Proces obogaćivanja bi se mogao objasniti modelom fontane. Dobijena zavisnost metaličnosti može se upotrebiti za određivanje ekvivalentnih širina nekih linija metala. Poređenje sa posmatračkim podacima pokazalo bi koliko su ispravne pretpostavke korišćene u radu.

Literatura

- Benjamin R., Shapiro G. 1997. The Spectrum of Cooling Galactic Fountain Gas. Department of Astronomy, University of Texas at Austin, Austin, TX 78712
- Benjamin R., Danly L. 1997. High-velocity rain: The terminal velocity model of galactic infall. *The Astrophysical Journal*, **481**: 764.
- Ćirković M., Milošević-Zdelar V., Ilić D. 2001 Međuzvezdana materija od A do B. *Visiona*, 1-2: 19.
- Mo H., Miralda-Escude J. 1996. Gaseous galactic halos and quasi-stellar object absorption line systems. *The Astrophysical Journal*, **469**: 589.
- Sutherland R., Dopita M. 1993. Cooling functions for low-density astrophysical plasmas. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **88**: 253.
- Bregman J. N. 1980. *The Astrophysical Journal*, **236**: 577
- Spitzer L. Jr. 1956. *The Astrophysical Journal*, **124**: 20

Ivana Vidanović

Determination of Metallicity in the Inner Halo of the Milky Way

In the framework of the classical galactic fountain models, we consider the outfall of gas from the disk of our Galaxy. The effect of metallicity segregation of clouds, due to the differential radiative cooling (“Field effect”) is investigated in order to reproduce the metallicity stratification of the inner halo (within several kiloparsecs perpendicular to the plane of the Galactic disk). As intuitively expected, calculations show that low-metallicity gas reaches larger heights above the Galactic plane while being part of the fountain mechanism. When averaged over time, the fountain thus produces a clear metallicity gradient, which can be investigated either directly or indirectly through the absorption-line studies. Different maximal heights of ascending gas are shown in Figures 5 and 6, while the clear origin of the fountain mechanism itself, as well as the turn-around point are shown in Figure 3. These results offer several interesting ramifications for our understanding of both the dynamics of Galactic gas and the origin of metal absorption lines seen in QSO spectra, some of which are bound to form in the gaseous haloes of luminous galaxies similar to the Milky Way.

