



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Analiza modela galaktičke hemijske evolucije kompatibilnog sa merenjima zastupljenosti deuterijuma u međuzvezdanoj sredini

- diplomski rad -

Mentor: dr Tijana Prodanović

Kandidat: Petar Kostić

Novi Sad, 2012

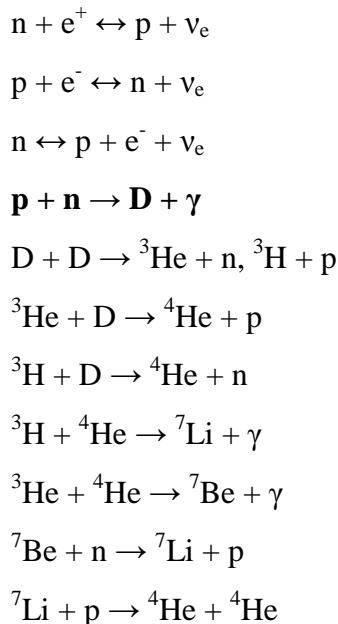
Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Merenje zastupljenosti deuterijuma (i sistem obeležavanja)	3
3.	Zastupljenost D u Galaksiji.....	5
3.1	Lokalni Mehur (< 100 pc)	5
3.2	Okolina Sunca ($100 - 500$ pc).....	6
3.3	Galaktički disk (> 500 pc)	7
3.4	Galaktički halo ($ z \geq 200$ pc)	8
3.5	Primordijalna zastupljenost deuterijuma.....	8
4.	Problem prašine. Deuterium-depletion model.....	8
5.	Model galaktičke hemijske evolucije.....	10
6.	Model galaktičke hemijske evolucije sa prilivom	11
6.1	Ulagani parametri i opservaciona ograničenja.....	14
6.2	Procena povratnog udela R	16
6.3	Funkcija početne mase	16
6.4	Rezultati	17
7.	Diskusija	19
8.	Zaključak.....	20
9.	Literatura.....	21

1. Uvod

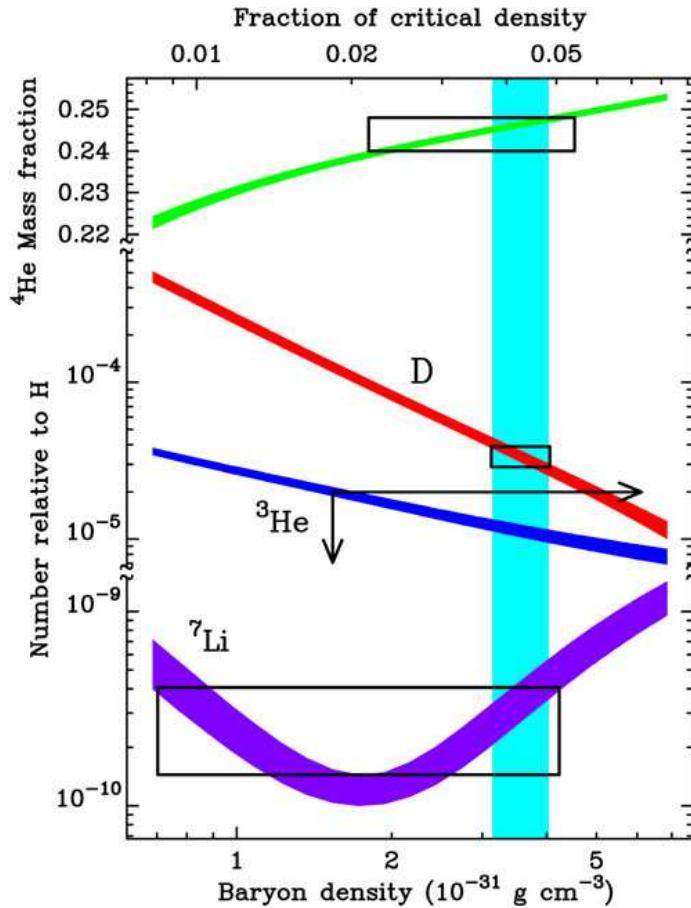
Posmatračka astronomija iznadrila je tri važna stuba koji potvrđuju teoriju Velikog Praska: Hablov dijagram koji pokazuje da se svemir širi; zastupljenost lakih elemenata koja je u saglasnosti sa modelom primordijalne nukleosinteze (BBN); i kosmičko pozadinsko zračenje (CMB) koje predstavlja ostatak zračenja iz perioda prvi nekoliko stotina hiljada godina nakon Velikog Praska [1]. Za ovaj rad su od posebne važnosti merenja zastupljenosti lakih elemenata, pre svega deuterijuma.

Primordijalna nukleosinteza je nastupila kada se univerzum, širenjem, ohladio do tog nivoa da je energija zračenja postala manja od energije vezivanja jezgara. Pre toga je svaki atom ili jezgro bilo uništeno visokoenergetskim fotonima, ali posle tog trenutka počeli su da se formiraju laci elementi. Prvi elementi su se formirali u sledećim nuklearnim reakcijama [2]:



Poznavajući uslove ranog univerzuma i preseke za sudare jezgara, može se izračunati očekivana primordijalna zastupljenost svih elemenata. Slika 1 prikazuje trenutna merenja zastupljenosti lakih elemenata koje su u čvrstom slaganju sa teorijskim predviđanjima. S obzirom da teorijsko određivanje primordijalnih zastupljenosti zavisi od barionske gustine u trenucima nukleosinteze, a barionska gustina opada sa trećim stepenom faktora skaliranja ($\sim a^{-3}$)¹, merenjem primordijalnih zastupljenosti može se doći do sadašnje barionske gustine u svemiru. Na osnovu brojnih vangalaktičkih merenja i teorija, Steigman (2007) je za primordijalnu zastupljenost deuterijuma usvojio vrednost $(D/H)_p = 2.68_{-0.25}^{+0.27} \times 10^{-5}$.

¹ Faktor skaliranja a je funkcija vremena koja predstavlja relativno širenje univerzuma. To je faktor koji povezuje fizičku razdaljinu sa kopokretnom razdaljinom (*comoving distance*, koja je konstantna) između dve mirujuće tačke: $d(t) = a(t) \times d_0$, gde je $d(t)$ fizička razdaljina u epohi t , $a(t)$ faktor skaliranja u epohi t , a d_0 sadašnja razdaljina. Faktor skaliranja u sadašnjoj epohi a_0 je po definiciji jednak 1, dok se za trenutak u prošlosti uzima odgovarajuća manja vrednost u opsegu $0 < a < 1$. Kako barionska gustina linearno opada sa povećanjem zapreme, od faktora skaliranja zavisi kao a^{-3} .

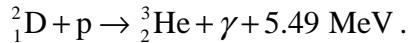


Slika 1. Grafik primordijalne zastupljenosti elemenata u odnosu na barionsku gustinu (tzv. Schramm plot), kako predviđa BBN model. Zastupljenost elementa X predstavljena je kao odnos zastupljenosti X/H (gde je H vodonik), osim zastupljenosti helijuma koja je prikazana masenim udelom u barionskoj materiji. Kvadrati i strelice prikazuju merenja primordijalnih zastupljenosti elemenata. Zbog prirode deuterijuma čija zastupljenost, od kako je nastao, monotono opada, i zbog njegove jake zavisnosti od barionske gustine, merenja D/H se uzimaju kao najpreciznija za određivanje barionske gustine. Grafik je preuzet iz [21].

Projekat WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) je merio parametar barionske gustine η_B iz spektara kosmičkog pozadinskog zračenja, pomoću kog se u BBN modelima dobijaju primordijalne zastupljenosti elemenata [35]. Primordijalne zastupljenosti su merene i sa kopnenih teleskopa pomoću DI apsorpcije u pravcu ka malom broju kvazara na pomacima $z > 2$, dakle pre masovnijeg procesovanja kroz zvezde. [1]

Deuterijum je, kao primordijalni izotop vodonika, kosmologiji vrlo koristan iz razloga što je sva njegova količina nastala jedino u procesu primordijalne nukleosinteze. Tokom čitave kasnije evolucije svemira, deuterijum je samo bio uništavan, pretežno kroz proces formiranja i evolucije zvezda (astracija). Stoga, njegova zastupljenost monotono opada sa vremenom. Zbog te njegove jedinstvene prirode, deuterijum može da posluži, kao što je rečeno, kao precizan bariometar, test hemijskih osobina intergalaktičkog medijuma, ali isto tako je bitan za modele galaktičke hemijske evolucije (GCE), jer merenje njegove zastupljenosti u međuzvezdanoj materiji (ISM) može biti pokazatelj udela gasa koji nikad nije prošao kroz zvezde.

Energija veze deuterijumovog jezgra je samo ~ 2.2 MeV, pa kad završi u unutrašnjosti zvezde lako se nađe u proton-proton lancu reakcija [2]



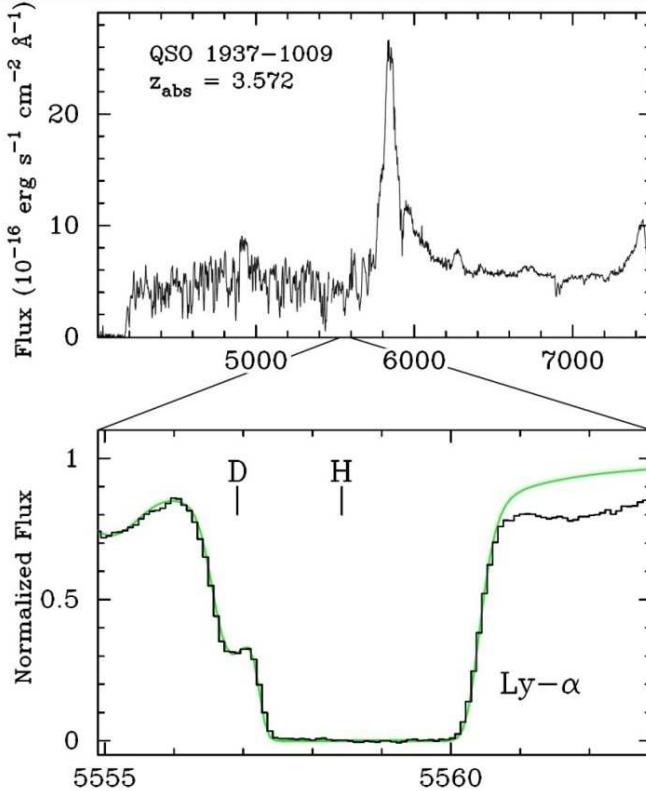
Zbog ove reakcije deuterijum ne preživljava astraciju, već se transformiše u helijum ^3_2He . Faktor astracije $f_{\text{D}} = y_{\text{Dp}} / y_{\text{DISM}}$ se definiše kao odnos primordijalne zastupljenosti deuterijuma i njegove zastupljenosti u međuzvezdanoj materiji. Modeli galaktičke hemijske evolucije najčešće zahtevaju vrednost $f_{\text{D}} \sim 1.4 - 1.8$, što kao očekivanu zastupljenost deuterijuma u Galaksiji daje $\text{D/H} \sim (1.4 - 1.9) \times 10^{-5}$ [2].

Linsky i saradnici [3] su iz merenja FUSE-a došli do vrednosti $\text{D/H} = (2.31 \pm 0.24) \times 10^{-5}$ za zastupljenost deuterijuma u (bližoj) međuzvezdanoj materiji, što predstavlja problem za većinu GCE modela (suviše visoka vrednost). Ovu vrednost su koristili Prodanović i Fields (2008) u jednostavnom GCE modelu sa prilivom [7], koji će biti razmatran u ovom radu. Merenja D/H u ISM pokazuju velike varijacije u odnosu na pravac i rastojanje pa nije jednostavno odrediti srednju vrednost na pravi način. Cilj ovog rada je da se sa novom procenom vrednosti D/H do koje su došli Prodanović, Steigman i Fields (2010) [8] ispita njihov raniji GCE model [7], posebno stopa galaktičkog priliva i povratna frakcija gasa kao parametri modela.

2. Merenje zastupljenosti deuterijuma (i sistem obeležavanja)

Postoje dva načina kako se zastupljenost deuterijuma u neutralnom međuzvezdanom medijumu može izmeriti. Najčešće se meri Ly- α apsorpcija deuterijuma (DI) u neutralnom gasu koji se nalazi između detektora i dalekog izvora svetlosti. Drugi način je radio detekcija emisije DI hiperfinog prelaza na 91.6 cm (327 MHz). Što se tiče Lajmanove serije, pionirska merenja zastupljenosti u lokalnoj ISM obavio je Copernicus satelit sedamdesetih godina XX veka snimajući ultraljubičaste spektre zvezda (Rogerson & York 1973, York & Rogerson 1976, Vidal-Madjar et al. 1977, preuzeto iz [2]). Ta merenja su obezbedila donju granicu producije deuterijuma u primordijalnoj nukleosintezi i gornju granicu barionske gustine. Kasnije se pristupilo snimanju spektara dalekih kvazara (QSO) (apsorpcije na crvenim pomacima $z \sim 3 - 4$) kako bi se detektovala primordijalna zastupljenost D. 1998. godine, Tytler i Burles [20] su odredili (približnu) primordijalnu zastupljenost pomoću dalekih gasnih oblaka ($z > 3$), koji uzrokuju Ly- α apsorpciju u spektrima QSO objekata, i dobili $(\text{D/H})_{\text{p}} = (3.4 \pm 0.3) \times 10^{-5}$.

Osnovna ideja ovakvog merenja zastupljenosti je da se detektuju apsorpcione linije vodonika (HI) i deuterijuma (DI) koje nastaju kao posledica eksicitovanja ovih elemenata iz osnovnih ($n = 1$) u jednom jonizovano stanje ($n = 2$) fotonom talasne dužine 1215.7 Å (Slika 2). Apsorpciona linija HI koja nastaje ovim prelazom pomerena je po talasnoj dužini za faktor $1 + z_{\text{oblaka}}$, dok je linija deuterijuma DI pomerena za faktor $0.33(1 + z_{\text{oblaka}})$ i mnogo je manje

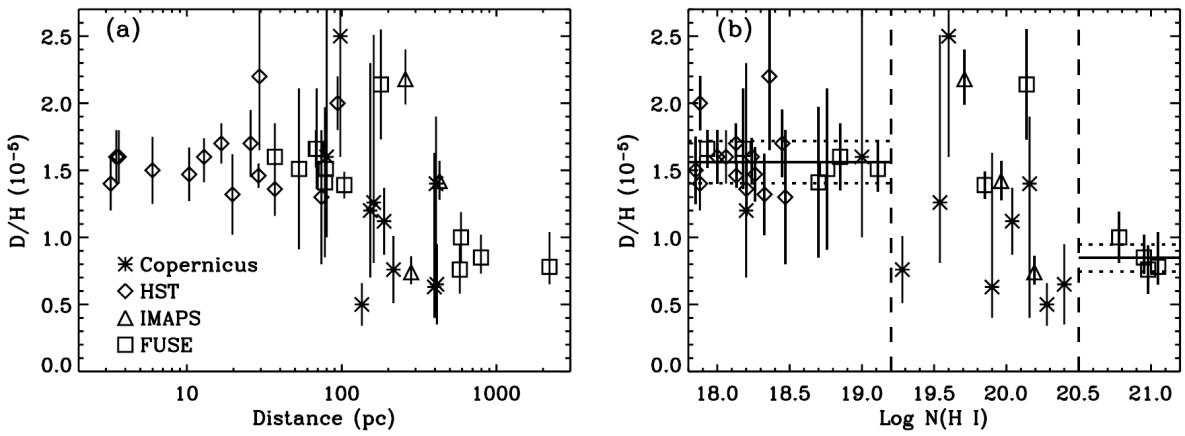


Slika 2. Apsorpcione Ly- α linije vodonika i deuterijuma u izvoru QSO 1937-1009. [21]

izražena od HI jer je daleko manje deuterijuma u oblaku. Zastupljenost deuterijuma u međuzvezdanoj materiji se tada prikazuje kao odnos

$$D/H = N(D)/N(H)$$

gde $N(X)$, linijska gustina (*column density*), predstavlja ukupan broj čestica elementa X unutar cilindra čija osa spaja detektor sa izvorom svetlosti i čija baza ima površinu 1 cm^2 ($N(X)$ se određuje iz profila apsorpcione linije u odnosu na kontinuum). Isti princip je i za druge elemente. Da bi se zastupljenosti deuterijuma iz različitih posmatranja mogle staviti na zajednički grafik, na x osu se najčešće stavlja $\log N(\text{HI})$, što može da se interpretira i kao parametar daljine, a na y osu se stavlja D/H (ili $\log(D/H)$). Takođe, zastupljenost se još prikazuje i kao $y_D = (D/H) \times 10^5$ ili kao $(D/H) \times 10^6 \text{ ppm}$ (*parts per million*, milionitih delova). Vrednost D/H je podatak koji govori kolika je usrednjena zastupljenost neutralnog deuterijuma u odnosu na neutralni vodonik u sumi svih oblaka gasa koji se nalaze između detektora (teleskopa) i izvora svetlosti čiji se spektar snima. Dakle, nije moguće odrediti zastupljenost D u određenoj tački prostora ili kreirati skalarno polje D/H u prostoru. Jedino se može posmatrati zavisnost dobijenih D/H od odgovarajućih linijskih gustina $N(\text{HI})$ ili zavisnost od rastojanja odgovarajućih izvora svetlosti (kao primer, oba slučaja su prikazana na Slici 3). Pošto je linijska gustina $N(\text{HI})$ ipak kvalitativnije povezana sa D/H , ona se češće i koristi za prikazivanje rezultata. Pri čitanju ovog grafika se mora imati u vidu da sve tačke na velikim daljinama (ili velikim $N(\text{HI})$) u izvesnoj meri sadrže u sebi kumulativne zastupljenosti bližih oblaka gasa.



Slika 3. Prikaz zavisnosti merenih D/H zastupljenosti od rastojanja izvora (levo) i linijske gustine (desno). [4]

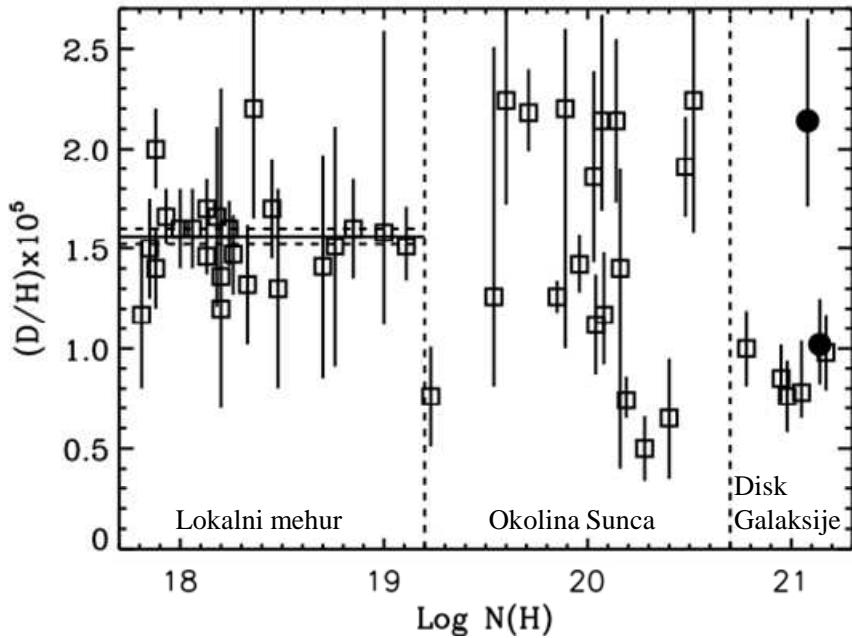
Naravno, zastupljenost D/H se može meriti i iz drugih prelaza Lajmanove serije, što ima svojih prednosti. Recimo, na linijskim gustinama $\log N(HI) > 18.7$, kod Ly- α apsorpcije, dolazi do maskiranja DI linije proširenim jezgrom HI linije, dok su kod Ly- γ prelaza (972 Å) te linije razdvojene do $\log N(HI) \approx 20$. Korišćenjem više Lajmanove serije, D/H u ISM se može meriti do linijskih gustina $\log N(HI) \approx 21$, ali dalje od toga analize su onemogućene kako zbog širenja HI Lajmanovih linija, tako i zbog preklapanja sa gustim H_2 linijama [3].

Posle Copernicusa, usledila su posmatranja svemirskog teleskopa Habl (HST), projekat IMAPS (*Interstellar Medium Absorption Profile Spectrograph*) i projekat FUSE (*Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer*) koji se bazirao isključivo na Lajmanovoj seriji deuterijuma. Ova posmatranja su značajno doprinela preciznim merenjima okolnog gasa koja ograničavaju GCE modele, i višestruko je uvećan broj pravaca posmatranja. Poslednjih godina, broj D/H merenja u Mlečnom putu opada, otkako FUSE više ne radi, međutim, debata oko toga šta rezultati tačno predstavljaju traje. Slika 4 prikazuje direktna merenja D/H u međuzvezdanoj materiji u različitim pravcima. Radi se o gasnoj zastupljenosti i nije uračunat deuterijum koji je eventualno inkorporiran u molekule prašine (o čemu će biti reči u poglavljju 4). Grafik je po linijskim gustinama podeljen u tri zone [4]: Lokalni mehur, okolina Sunca i galaktički disk. Kao što se vidi sa grafika zastupljenost D/H prilično varira zavisno od pravca posmatranja, posebno u Sunčevoj okolini. Jedino se za ISM u Lokalnom mehuru (i na većim udaljenostima) može reći da ima nešto ujednačeniju raspodelu zastupljenosti.

3. Zastupljenost D u Galaksiji

3.1 Lokalni Mehur (< 100 pc)

Međuzvezdana materija koja se nalazi unutar 100 parseka oko Sunca smatra se Lokalnim Mehurom (engl. *Local Bubble*, LB). Osobine ISM unutar ovog radijusa pretežno su homogene, što je slučaj i sa vrednostima D/H (kao što se vidi sa Slike 4). To je posledica zajedničke istorije šokova, zagrevanja i mešanja materije unutar Mehura, usled eksplozija supernovih i vrelih zvezdanih vetrova iz Sco-Cen Asocijacije. Izražene u linijskoj gustini vodonika, granice



Slika 4. Merenja D/H u funkciji linijske gustine. Prikazana su posmatranja Copernicus-a, IMAPS-a, HST-a i FUSE-a. Prema linijskoj gustini, kao meri rastojanja, grafik se može podeliti na Lokalni mehur (< 100 pc), Sunčevu okolinu ($100 - 500$ pc) i najdalji, galaktički disk (> 500 pc). [2]

Lokalnog Mehura padaju na $\sim 19.2 - 19.3$, a srednja vrednost dosadašnjih merenja D/H iznosi $(1.5 - 1.6) \times 10^{-5}$ [3, 4]. Većina tačaka iz ovog dela grafika izmerena je u pravcima obližnjih belih patuljaka sa jakim UV kontinuumom ili zvezda kasnog tipa (klase K i M) kod kojih je apsorpcija DI i HI merena preko hromosferskih emisionih linija. Većina tačaka u ovom delu grafika je iz posmatranja HST-a (čija su sva merenja u LB), ali ima i merenja projekata Copernicus i FUSE. Sva tri projekta pojedinačno su usaglašeni oko navedene srednje vrednosti D/H. Iako male, uočavaju se varijacije zastupljenosti od pravca do pravca posmatranja unutar Lokalnog Mehura. Još nema adekvatnog objašnjenja da li se radi o greškama merenja ili su varijacije posledica nekog sistematskog efekta u međuzvezdanoj materiji, ali zanimljivo je da vrednosti D/O i O/H pokazuju veći stepen homogenosti nego D/H, ostaje da se ispita zbog čega [5].

3.2 Okolina Sunca (100–500 pc)

Ovde postoji oko 20 merenja D/H gde su kao pozadinski izvori uglavnom korišćeni beli patuljci blizu granice sa Lokalnim Mehurom (LB), sub-patuljci i udaljenije OB zvezde. U ovim pravcima izmerene D/H zastupljenosti mnogo više variraju nego u Lokalnom Mehuru; oko polovine tačaka se nalazi iznad, a ostatak ispod LB proseka. Ne uočava se nikakva korelacija ovih varijacija sa poznatim velikim strukturama u ISM, niti sa rastojanjem i galaktičkom longitudom i latitudom. Zanimljivo je da se prosečna vrednost D/H u ovoj zoni poklapa sa prosekom Lokalnog Mehura, tj. $D/H = 1.5 \times 10^{-5}$. S obzirom da je izvan Lokalnog Mehura tekla drugačija istorija mešanja gasa i astracije nego unutar njega (LB gas je dosta topliji), logično je očekivati i drugačiju raspodelu zastupljenosti deuterijuma. Međutim, tolike

razlike između podgrupa tačaka u ovoj (srednjoj) zoni ($6 - 22$ ppm, među pojedinim tačkama razlike dostižu faktor $3 - 4$) povlače za sobom pretpostavku da postoje procesi koji smanjuju D/H u ISM. Jedan je svakako astracija. Drugi proces koji je predložen od nekolicine autora je deuteracija policikličnih aromatičnih ugljovodonika (PAH \rightarrow PAD). Mestimični pad zastupljenosti deuterijuma u ISM bi se mogao objasniti nesrazmernom potrošnjom deuterijuma, u odnosu na vodonik, na formiranje molekula prašine u ISM. Ovaj proces je termodinamički i statistički obrazložen jer deuterijum u PAD molekulima ima jaču energiju veze nego vodonik. U ovoj zoni, najreprezentativnije tačke verovatno pripadaju gornjoj grupi od nekih $5 - 6$ tačaka koje imaju zastupljenosti oko 22 ppm.

3.3 Galaktički disk (> 500 pc)

U pravcu ka galaktičkom disku na daljinama većim od 500 parseka postoji samo 7 validnih merenja, od kojih su tri ispod 1 kiloparseka, a ostala četiri merenja su ispod 3 kiloparseka. Linijske gustine ovih 7 merenja ($\log N(\text{HI})$) su iznad 20.7 . Problem sa ovako dalekim objektima je što je DI apsorpciona linija ekranirana HI linijom usled superpozicije brzina u oblacima gasa duž pravca posmatranja i, pomenutih, linija molekula H_2 koje se preklapaju sa DI linijama. HI linije Lajmanove serije u tom slučaju postaju dosta široke. Pored toga, relativno slaba spektralna rezolucija instrumenata FUSE-a ograničava analize u mnogim slučajevima. Kao što se vidi sa slike, 6 tačaka je grupisano dosta ispod LB proseka, ali oko približno iste vrednosti jedne podgrupe iz zone Sunčeve okoline. S druge strane, jedna tačka leži na vrednosti koja je približno jednaka proseku gornje podgrupe iz srednje zone. Šta god da je prouzrokovalo ovo raslojavanje u merenjima koja pripadaju okolini Sunca, moguće je da na sličan ili isti način deluje i na daljinama većim od 500 parseka. Međutim, sa sadašnjim podacima je nemoguće odvojiti doprinose bližih i daljih oblaka u jednom pravcu posmatranja. Jedino je moguće, premda aproksimativno, oduzeti linijske gustine Lokalnog Mehura za posmatranja koja dosežu zvezde izvan Lokalnog Mehura, kako bi se ostavio samo doprinos ISM izvan LB. Linsky i saradnici su za ovaj postupak uzeli vrednosti $N(\text{HI}) = 10^{19.2} \text{ cm}^{-2}$ i $N(\text{DI}) = 10^{14.39} \text{ cm}^{-2}$. Jasno je da Lokalni Mehur nije savršeno loptastog oblika, ali s obzirom da ima zadovoljavajuće ujednačenu vrednost D/H (Linsky uzima 15.6 ± 0.4 ppm) korisno je za srednju zonu imati uvid u vrednosti $(\text{D}/\text{H})_{\text{gas-LB}}$, što za zonu galaktičkog diska već nije toliko relevantno jer je doprinos gasa iz Lokalnog Mehura neznatan.

Rogers i saradnici (2005, 2007) [2] su izvršili tri merenja ($(2.4 \pm 0.3, 1.9 \pm 0.2 \text{ i } 1.8 \pm 0.5) \times 10^{-5}$) pomoću emisione linije DI hiperfinog prelaza, na 92 cm. Dobijena srednja vrednost je $(2.1 \pm 0.7) \times 10^{-5}$ (3σ), a procena je da je rastojanje ovih izvora oko 5 kpc što je najduži integralni pravac pomoću kojeg je merena zastupljenost deuterijuma u Galaksiji. Ovaj rezultat se prilično dobro poklapa sa vrednostima gornje podgrupe apsorpcionih merenja u Sunčevoj okolini i galaktičkom disku. Visoka prosečna vrednost za merenja dalekog galaktičkog diska i galaktičkog haloa u odnosu na lokalne vrednosti D/H trenutno govori da je astracioni faktor Galaksije verovatno nizak i iznosi oko $f_D \leq 1.3$. Dodatna precizna posmatranja u različitim pravcima i na velikim udaljenostima bila bi od velikog značaja za razvoj modela galaktičke hemijske evolucije.

3.4 Galaktički halo ($|z| \geq 200$ pc)

Galaktički halo je ispunjen toplim neutralnim gasom koji ima drugačiju istoriju od toplog gasa u disku. Oblaci gase u halou su izloženi šokovima transporta gase iz diska u halo koji prouzrokuju eroziju prašine, pa su u gasu prisutne više zastupljenosti refrakcionih elemenata. Savage i saradnici (2007) [2] su detektovali apsorpciju DI u pravcu kvazara QSO HE 0226-4110 koji se nalazi na visokoj galaktičkoj latitudi (FUSE) i izmerili zastupljenost $D/H = 2.1^{+0.8}_{-0.6} \times 10^{-5}$, posle redukovanja za Lokalni Mehur. Ova vrednost je slična visokim zastupljenostima dobijenim za galaktički disk i okolinu Sunca. U ovom pravcu je izmerena ekstremno niska količina molekularnog vodonika pa se prepostavlja da nema mnogo prostora za vezivanje deuterijuma za molekule prašine. Druga merenja D/H u galaktičkom halou dala su rezultate $D/H = 1.85^{+0.22}_{-0.10} \times 10^{-5}$ (Kruk et al, 2006), $D/H = (2.02 \pm 0.19) \times 10^{-5}$, $D/H = 2.19^{+0.52}_{-0.68} \times 10^{-5}$ (preuzeto iz [3]).

3.5 Primordijalna zastupljenost deuterijuma

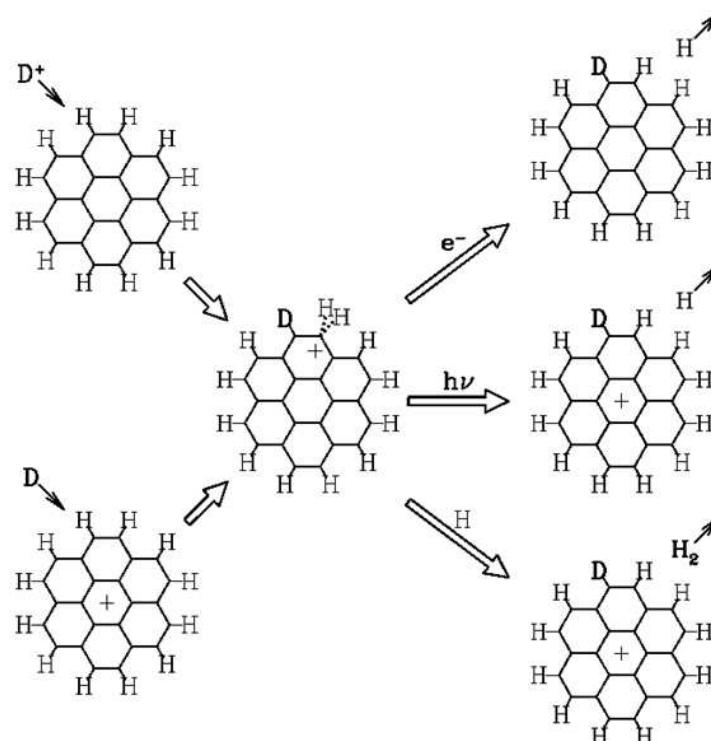
Pored pomenutog određivanja primordijalne zastupljenosti deuterijuma $(D/H)_{\text{prim}}$ koje su obavili Tytler i Burles 1998. godine (34 ± 3 ppm) [20], Kirkman i saradnici (2003) [22] su precizno odredili linijske gustine HI i DI u prvcima pet kvazara. Većinom su koristili spektre visoke rezolucije dobijene Keck teleskopom i dobili rezultat $D/H = 27.8^{+4.4}_{-3.8}$ ppm. S obzirom da je posmatrani gas izrazito niske metaličnosti, ovaj rezultat oslikava približnu, ali verovatno nešto nižu vrednost od istinske primordijalne zastupljenosti. Postoji i drugi pristup određivanju $(D/H)_{\text{prim}}$, pomoću analize podataka sa satelita WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) i ostalih projekata koji snimaju mikrotalasno pozadinsko zračenje. Ovde se koristi parametar η_{10} , koji predstavlja odnos bariona i fotona, i pomoću njega se predviđaju primordijalne zastupljenosti lakih elemenata pa tako i deuterijuma. Ovim pristupom se dobijaju primordijalne zastupljenosti deuterijuma koje su u odličnom slaganju sa onim iz merenja apsorpcije na velikim crvenim pomacima.

4. Problem prašine. Deuterium-depletion model [3]

Poznato je da se neki elementi u međuzvezdanoj materiji, poput Mg, Si i Fe, većim delom nalaze unutar čestica prašine nego u gasnom obliku. Za pomenute elemente taj procenat je $50 - 90\%$. Može se očekivati, i pokazuje se, da se i deuterijum vezuje za određene vrste molekula prašine i da to dovodi do smanjenja njegove zastupljenosti u gasnoj fazi, pitanje je samo u kolikoj meri i pod kakvim uslovima. Prema ovom konceptu (Jura, 1982) [23], varijacije u gasnim zastupljenostima deuterijuma (koje se manifestuju na relativno malim prostornim skalama) nastaju ne kao posledica različite astracije, već različite potrošnje deuterijuma na omotače molekula prašine, dok bi suma deuterijuma u gasu i u prašini trebalo da bude približno očuvana. S obzirom da je vremenska skala kompletног mešanja gase unutar jednog kiloparseka oko 350 miliona godina [24], što bi za to relativno kratko vreme trebalo da obezbedi približno konstantne vrednosti na ovim razdaljinama, ova teza (vezivanja

deuterijuma za prašinu) deluje prihvatljivije nego teza da do varijacija dolazi usled različitog stepena astracije. U stvarnosti se verovatno radi o kombinaciji ova dva procesa.

U srži prepostavke da se deuterijum troši na sastav čestica prašine je činjenica da se atom deuterijuma, u odnosu na atom vodonika, energetski efikasnije vezuje za ugljenik. Smatra se da najviše deuterijuma ima u policikličnim aromatičnim ugljovodonicima (PAH), molekulima koji se sastoje od C atoma šestougaone rešetkaste strukture (Slika 5). PAH molekuli su stabilniji i imaju više atoma H po molekulu od drugih čestica [6]. Energija veze C–D u ovim molekulima je za 0.083 eV viša od energije veze C–H. Takođe, energija veze H–D je za 0.035 eV viša od energije veze H–H. U tom slučaju, ukoliko bi D i H u gasu bili u termodinamičkoj ravnoteži sa PAH molekulima, važilo bi $(D/H)_{dust}/(D/H)_{gas} = e^{970 \text{ K}/T_{dust}}$ što bi za $T_{dust} < 90 \text{ K}$ dostizalo vrednost 5×10^4 (Draine, [25, 26]). Temperatura prašine je obično niska i iznosi oko 20 K. Pendleton i Allamandola (2002) [27] procenjuju da se ~85% ugljenika u prašini nalazi u aromatičnoj formi, sa $\text{H/C} \approx 0.35$, a ~15% u alifatičnoj, sa $\text{H/C} \approx 2.1$ [3]. Posmatranja pokazuju da se deuterijum vezuje i za jednostavnije molekule u ISM (metanol, amonijak) i da je procenat takvih deuterisanih molekula u odnosu na nedeuterisane 0.01 do 0.1 [28]. Međutim, deuterisani PAH molekuli (PAD) su mnogo stabilniji i zastupljeniji u ISM od ovih jedinjenja, i imaju mnogo veći broj atoma vodonika koji mogu biti zamenjeni atomom deuterijuma, pa predstavljaju rezervoare deuterijuma koji je izvučen iz gasa. Ukoliko bi se prepostavilo da je $(D/H)_{dust} \approx 0.27$, onda se iz Drejnovog računa $(D/H)_{dust}/(D/H)_{gas} = 5 \times 10^4$ dobija da je $(D/H)_{gas} = 6 \text{ ppm}$, što može da objasni



Slika 5. Šema mogućih reakcija zamene vodonika deuterijumom u molekulima policikličnih aromatičnih ugljovodonika (PAH). [6]

najniže izmerene zastupljenosti u Sunčevoj okolini (100–500 pc). Peeters i saradnici (2004) [28] su proučavali spekture satelita ISO (*Infrared Space Observatory*) na talasnim dužinama 4.4 μm i 4.65 μm u Orionovom kraku i M17, utvrđujući da emisija potiče od vibracionih moda C–D veze u PAD molekulima. Poredеći intenzitet emisije za PAD i PAH molekule procenili su da je D/H odnos u ovim molekulima 0.17 ± 0.03 za Orionov krak i 0.36 ± 0.08 za M17, potvrđujući da je Drejnov odnos $(D/H)_{\text{dust}} / (D/H)_{\text{gas}} \sim 10^4$ moguć i da bi deuteracija PAH molekula u hladnoj sredini mogla da doprinese značajnjem smanjenju zastupljenosti deuterijuma u međuzvezdanom gasu.

Draine (2004, 2006) [25, 26] i Wood i saradnici (2004) [4] predlažu *dinamički* model međuzvezdane materije u kom se deuterijum iz gasa vremenom troši tako što ulazi u sastav praštine, sve dok neki spoljašnji uticaj, kao što su naleti ostatka supernove ili jako UV zračenje obližnjih zvezda, ne izvrši eroziju čestica praštine, vraćajući zarobljeni deuterijum nazad u gas. Deuteracija molekula praštine će biti dominantnija u hladnjim i gušćim regionima gde su sudari gas-prašina češći. Za ovakve regije je procenjeno da bi smanjivanje zastupljenosti deuterijuma u gasu za faktor e bilo ostvareno za samo ~ 2 miliona godina, ukoliko izostane bilo koji proces koji bi vraćao D u gas [26, 3].

Linsky i saradnici podupiru ovu ideju pokazujući da je zastupljenost D/H antikorelisana sa stepenom vezivanja refrakcionih² elemenata, poput gvožđa i silicijuma, za čestice praštine, a da je pozitivno korelisana sa rotacionom temperaturom H₂. Ovo ukazuje da deuterijum ima osobine refrakcionih elemenata, tj. teži vezivanju na niskim temperaturama, te je njegova gasna zastupljenost najviša u sredinama koje pomažu eroziju ili razaranje čestica praštine. Realna zastupljenost D u Galaksiji je, prema tome, određena merenjima najviših vrednosti D/H u međuzvezdanoj materiji, a prema Linskem ona iznosi $(D/H)_{\text{ISM+dust}} \geq (2.31 \pm 0.24) \times 10^{-5}$.

S obzirom da je ova hipoteza mlada i zahteva još testiranja, treba napomenuti da nisu sva posmatranja u saglasnosti sa njom. Recimo, merenja su pokazala da, suprotno očekivanjima, ne postoji jasna korelacija između niskih vrednosti D/H i efekta crvenjenja koje bi trebalo da potiče od praštine. Štaviše, pokazalo se da postoje pravci u kojima se u isto vreme meri veoma niska zastupljenost D i minimalno crvenjenje [29, 7].

5. Model galaktičke hemijske evolucije

Modeli galaktičke hemijske evolucije (GCE) pokušavaju na osnovu hemijskog sastava Galaksije da odgovore na mnoga pitanja vezana za njenu evoluciju. Najvažnije pitanje je koliko gasa unutar Galaksije nikada nije prošlo kroz proces astracije, tj. koliki je odnos $(D/H)_{\text{ISM}} / (D/H)_p$, pri tome $(D/H)_{\text{ISM}}$ podrazumeva deuterijum u svim formama u ISM. Deuterijum je, od svih lakih elemenata u međuzvezdanoj materiji, najpogodniji za ovo

² U astronomiji, refrakcioni elementi su oni hemijski elementi koji imaju relativno visoku temperaturu kondenzacije u termodinamičkoj ravnoteži, te lakše ulaze i održavaju se u sastavu praštine.

istraživanje, iz razloga pomenutih na početku. Drugi laci elementi (H, He, Li, itd.) imaju kompleksne istorije kreiranja i uništavanja pa nisu dobar test ovih modela, dok precizno merenje zastupljenosti D u Galaksiji bitno ograničava i testira GCE modele. Kada se od gasa međuzvezdane materije formira zvezda, sav deuterijum koji je ulazio u sastav tog gasa transformiše se u nuklearnim reakcijama u ^3He , ^4He i teže elemente. Kako zvezda evoluira, gas koji ona zvezdanim vетrom ili eksplozijom supernove vraća u ISM ima povećanu metaličnost i ne sadrži deuterijum. Vremenom, kako Galaksija evoluira, reciklaže gasa koja se odvija rađanjem i umiranjem zvezda trebalo bi da osiromaši međuzvezdanu materiju deuterijumom. Ipak, zastupljenost D u Galaksiji je neočekivano visoka, neka predviđanja idu i do $\sim 84\%$ primordijalne zastupljenosti, iz čega proizilazi da velika većina gase nikada nije procesuirana kroz zvezde. Ovo je u kontradiktornosti sa (naivnim) stanovištem da se 20% barionske materije u Galaksiji nalazi u formi ISM, a 80% u zvezdama [7]. Naime, pod Galaksijom se najčešće podrazumeva samo galaktički disk, koji je ustvari „vrh ledenog brega“ u odnosu na *čitavu* Galaksiju. Galaktički halo, koji se proteže do ogromnih udaljenosti, sadrži gas koji je u gravitacionom potencijalu Galaksije, a verovatno je i sam približno primordijalan, u nedostatku astracije. Stoga, rezultati da samo 20% barionske materije otpada na ISM mogu da stoje jedino za galaktički disk. Kako bi se izalašlo iz paradoksalne situacije (jer se u galaktičkom disku meri neočekivano visoka zastupljenost D), predložen je model priliva (engl. *infall*) primordijalnog gasea, bogatog deuterijumom, iz haloa, intergalaktičkog prostora i zahvatanjem okolnih malih galaksija od strane Mlečnog puta. Jedan tipičan primer ovakvog upadanja gasea u Galaksiju je gasni oblak Complex C koji se nalazi na severnoj galaktičkoj hemisferi, na rastojanju $10 \pm 2 \text{ kpc}$, na visini 8 kpc, koji se kreće velikom brzinom prema Mlečnom putu. Velika razlika u brzini u odnosu na Galaksiju omogućava merenje zastupljenosti D/H u oblacu, koja iznosi $(2.2 \pm 0.7) \times 10^{-5}$ [2], što je približno ista vrednost kao u zagrejanim oblacima galaktičkog haloa. Pod pretpostavkom da ovi oblici vode poreklo iz međugalaktičke sredine, tj. da su ostaci primordijalnog gasea, zastupljenost deuterijuma u njima bi, prema očekivanjima, trebalo da bude viša. Međutim, iako je Complex C oblak hemijski mladog gasea, čija je metaličnost svega 0.1–0.25 solarne i čija se zastupljenost kiseonika razlikuje od D/O galaktičkog diska i haloa za faktor od 5–10, ovi podaci pokazuju da taj gas ipak nije primordijalan. Postoje razlozi za verovanje da su ti oblici u svojoj istoriji već bili deo haloa Mlečnog puta, ili neke druge obližnje galaksije, te da su je napustili kroz proces galaktičkog odliva (engl. *outfall*). U tom slučaju zastupljenost D u njima može da bude jedino donja granica za primordijalnu zastupljenost deuterijuma (kao, uostalom, i sva merenja primordijalne zastupljenosti deuterijuma).

6. Model galaktičke hemijske evolucije sa prilivom

Za potrebe ovog rada koristi se model galaktičke evolucije sa prilivom koji su razvili Prodanović i Fields [7]. Za primordijalnu zastupljenost deuterijuma $(\text{D}/\text{H})_{\text{p}}$ koristi se vrednost $2.75^{+0.24}_{-0.19} \times 10^{-5}$, dok je, usvajajući interpretaciju Linskog da se nedostajući gas nalazi u prašini, za zastupljenost u međuzvezdanoj materiji $(\text{D}/\text{H})_{\text{ISM}}$ uzeta vrednost

$(2.31 \pm 0.24) \times 10^{-5}$. Tada, udeo međuzvezdane zastupljenosti deuterijuma u primordijalnoj zastupljenosti iznosi

$$\frac{(D/H)_{ISM}}{(D/H)_p} = 0.84 \pm 0.09, \quad (1)$$

što znači da većina gasa nikad nije procesuirana kroz zvezde.

Galaktički priliv (*galactic infall*) je definisan kao barionski maseni prinos u jedinici vremena i u ovom modelu se prepostavlja da je linearno zavisan od stope formiranja zvezda

$$\frac{dM_{baryon}}{dt} = \alpha \psi, \quad (2)$$

gde je ψ stopa (brzina) formiranja zvezda, a α konstanta proporcionalnosti koja karakteriše jačinu priliva. Pretpostavka da je stopa priliva srazmerna stopi formiranja zvezda nalazi utemeljenje u simulacijama formiranja galaksija [9] koje nalaze da te dve veličine ne samo da su proporcionalne, već su skoro identične; po njima, $\alpha \approx 1$ u širokom opsegu crvenih pomaka i vremena. Naravno, stopa formiranja zvezda, kao i stopa priliva, imaju svoje prostorne zavisnosti u galaktičkom disku, verovatno od radiusa u disku, ali će ovde, radi jednostavnosti modela, one biti zanemarene. Takođe, posmatranja su utvrdila jaku korelaciju između odnosa ukupne gasne i zvezdane mase u galaksijama i vremenski integrisane stope formiranja zvezda [30] što ukazuje da dostupnost gasa u galaksiji istovremeno dovodi do njegove potrošnje u formiranju zvezda [7]. U tom smislu, ovaj model se oslanja na aproksimaciju trenutne reciklaže (IRA, *instantaneous recycling approximation*), tj. svi procesi vezani za evoluciju zvezda se odvijaju trenutno u odnosu na vremensku skalu evolucije galaksije [31, 10].

Na osnovu posmatranja oblaka velikih brzina (Complex C) i zastupljenosti deuterijuma u njima koja je blizu primordijalne [2], upadajući gas u modelu se smatra primordijalnim. Promena mase međuzvezdane materije dobija se ako se od prilivene mase oduzme masa koja završi u zvezdama (u IRA aproksimaciji ova dva procesa se odvijaju trenutno):

$$\frac{dM_{ISM}}{dt} = \alpha \psi - (1-R)\psi, \quad (3)$$

gde je M_{ISM} ukupna masa međuzvezdane materije, što podrazumeva gas i prašinu. Faktor R predstavlja onaj deo mase utrošene na formiranje zvezda koji se kroz zvezdane vetrove i supernove vraća u ISM. Iz tog dela mase je „očišćen“ sav deuterijum. S druge strane $(1-R)$ predstavlja onu frakciju mase koja, jednom kad završi u zvezdama, biva „zarobljena“ i više neće biti vraćena u ISM. Što se tiče evolucije deuterijuma u ISM, ona na osnovu usvojenih pretpostavki i prethodne jednačine glasi

$$\frac{d}{dt}(DM_{ISM}) = D_p \alpha \psi - D\psi, \quad (4)$$

gde $D \equiv X_D = \rho_D / \rho_{\text{baryon}}$ predstavlja maseni udeo deuterijuma u barionskoj materiji za datu epohu i nalazi se u relaciji sa D/H

$$D \equiv X_D \equiv 2 \left(\frac{D}{H} \right) X_H. \quad (5)$$

D_p predstavlja maseni udeo deuterijuma u primordijalnom gasu.

Kao važna promenljiva uzima se odnos mase ISM u datom trenutku t i početne barionske mase Galaksije

$$\mu \equiv \frac{M_{\text{ISM}}(t)}{M_{\text{baryon},0}}.$$

Evolucija ovog broja zavisi od toga da li je zbir masa priliva (α) i gasa vraćenog iz zvezda (R) veći ili manji od mase koja učestvuje u formiranju zvezda. Ako je $\alpha + R = 1$, međuzvezdana materija daje istu količinu gasa za formiranje zvezda, koliko joj se nadoknađuje. Ako je $\alpha + R > 1$, prлив dominira masom Galaksije i μ raste sa vremenom, a za $\alpha + R < 1$, μ opada sa vremenom.

Druga veličina je odnos ukupne barionske mase Galaksije u datom trenutku t i početne barionske mase

$$\mu_{\text{tot}} \equiv \frac{M_{\text{baryon}}(t)}{M_{\text{baryon},0}} = 1 + \alpha \frac{\mu - 1}{\alpha + R - 1},$$

i predstavlja ukupnu masu Galaksije u trenutku t u jedinicama početne mase. Jasno je da je ovaj broj veći od jedan, i raste sa vremenom, u slučaju da postoji i najmanji prлив, tj. $\mu_{\text{tot}} > 1$ za $\alpha > 0$. Ovo potiče od toga što u ovom modelu zanemaruјemo eventualni odliv (engl. *outfall*) barionske materije kroz „galaktičke vetrove“ i slične pojave koje karakterišu evoluciju patuljastih galaksija; danas se univerzalno prihvata da je gravitaciona potencijalna jama koju stvara CDM (*cold dark matter*) u džinovskim galaksijama poput Mlečnog puta suviše duboka da bi je značajnija količina bariona napustila tokom dosadašnje istorije svemira.

Kombinovanjem jednačina (3) i (4) dobija se diferencijalna jednačina evolucije masenog udela deuterijuma u ISM:

$$M_{\text{ISM}} \frac{dD}{dM_{\text{ISM}}} = \frac{\alpha(D_p - D) - RD}{\alpha + R - 1}.$$

Integraljenjem ove jednačine u granicama od D_p do $D(t)$ – pod prepostavkom da su α i R konstante tokom istorije Galaksije – dobija se rešenje za evoluciju D

$$\frac{D(t)}{D_p} = \frac{R}{\alpha + R} \left(\frac{\alpha}{R} + \mu^{\frac{\alpha+R}{1-\alpha-R}} \right), \quad (6)$$

što, uslovno rečeno, predstavlja opservabilnu veličinu. Kao što je pomenuto D_p koje se meri je ustvari donja granica istinske primordijalne zastupljenosti, pa se posmatranjima može odrediti jedino gornja granica $D(t)/D_p$, pod uslovom da se ne potceni vrednost $(D/H)_{ISM}$ (videti jednačinu (8)).

Druga opservabilna veličina (za galaktički disk) je sadašnji maseni ideo gasa u ukupnoj barionskoj masi

$$\omega(t) \equiv \frac{M_{ISM}(t)}{M_{baryon}(t)} = \frac{\mu}{\mu_{tot}} = \frac{1-R-\alpha}{1-R-\alpha\mu(t)} \mu(t). \quad (7)$$

$D(t)/D_p$ i $\omega(t)$ možemo uzeti za poznate veličine, određene iz posmatranja, naravno, sa svojim nepouzdanostima. Stoga, za dato R , jednačine (6) i (7) predstavljaju sistem sa dve nepoznate, α i μ , koje karakterišu jačinu priliva.

Međutim, pogladajmo osetljivost $D(t)/D_p$ i $\omega(t)$ u odnosu na α i R u ovom modelu, s obzirom da te dve veličine (tačnije, $\alpha+R$) suštinski vode evoluciju mase ISM u odnosu na ukupnu masu. Prvo treba napomenuti da obe veličine monotono opadaju sa vremenom. Iz jednačine (6) se može videti da $D(t)/D_p$ u bilo kom slučaju (za bilo koje $\alpha+R$) teži svom minimumu, sa proticanjem vremena. Za to je odgovoran član $\mu^{(\alpha+R)/(1-\alpha-R)}$, koji za $\alpha+R > 1$ teži nuli posle dovoljno dugo vremena (iako μ raste), a za $\alpha+R < 1$ takođe teži nuli, jer $\mu \rightarrow 0$. Dakle,

$$\frac{D}{D_p} \rightarrow \frac{D_{min}}{D_p} = \frac{\alpha}{\alpha+R}.$$

U jednačini (7), $\alpha+R > 1$ povlači za sobom rastuće μ , što asimptotski daje

$$\omega \rightarrow \omega_{min} = 1 - \frac{1-R}{\alpha},$$

dok za $\alpha+R < 1$ važi $\mu \rightarrow 0$, pa tako i $\omega_{min} \rightarrow 0$.

Kao što se iz prethodnog vidi, ovaj model dovodi hemijsku evoluciju Galaksije u svoje stacionarne tačke (ω_{min} , D_{min}/D_p). Zavisno od $\alpha+R$, s jedne strane je slučaj u kom se u jednom trenutku potroši sav gas, tj. ISM, a u drugom slučaju se sistem stabilizuje na određenoj frakciji D_{min}/D_p , ali sa održivom frakcijom gasa u ukupnoj barionskoj materiji.

6.1 Ulazni parametri i opservaciona ograničenja

Prodanović i Fields u svom modelu koriste opservaciona ograničenja $D(t)/D_p$ i $\omega(t)$ kako bi suzili prostor za određivanje priliva α , i tako testirali galaktičku evoluciju. Ograničenje $D(t)/D_p$ je na osnovu definicije (5) iskazano u posmatranim vrednostima $(D/H)_{ISM}$ i $(D/H)_p$ kao

$$\frac{D_{ISM}}{D_p} = \frac{X_{D,ISM}}{X_{D,p}} = \frac{X_{H,ISM}}{X_{H,p}} \frac{(D/H)_{ISM}}{(D/H)_p}, \quad (8)$$

gde je $X_{\text{H,ISM}}/X_{\text{H,p}} = 0.93$, pa je tako

$$\frac{D_{\text{ISM, gas}}}{D_p} = 0.53^{+0.22}_{-0.36}, \quad (9)$$

$$\frac{D_{\text{ISM, gas+dust}}}{D_p} = 0.78^{+0.11}_{-0.10}. \quad (10)$$

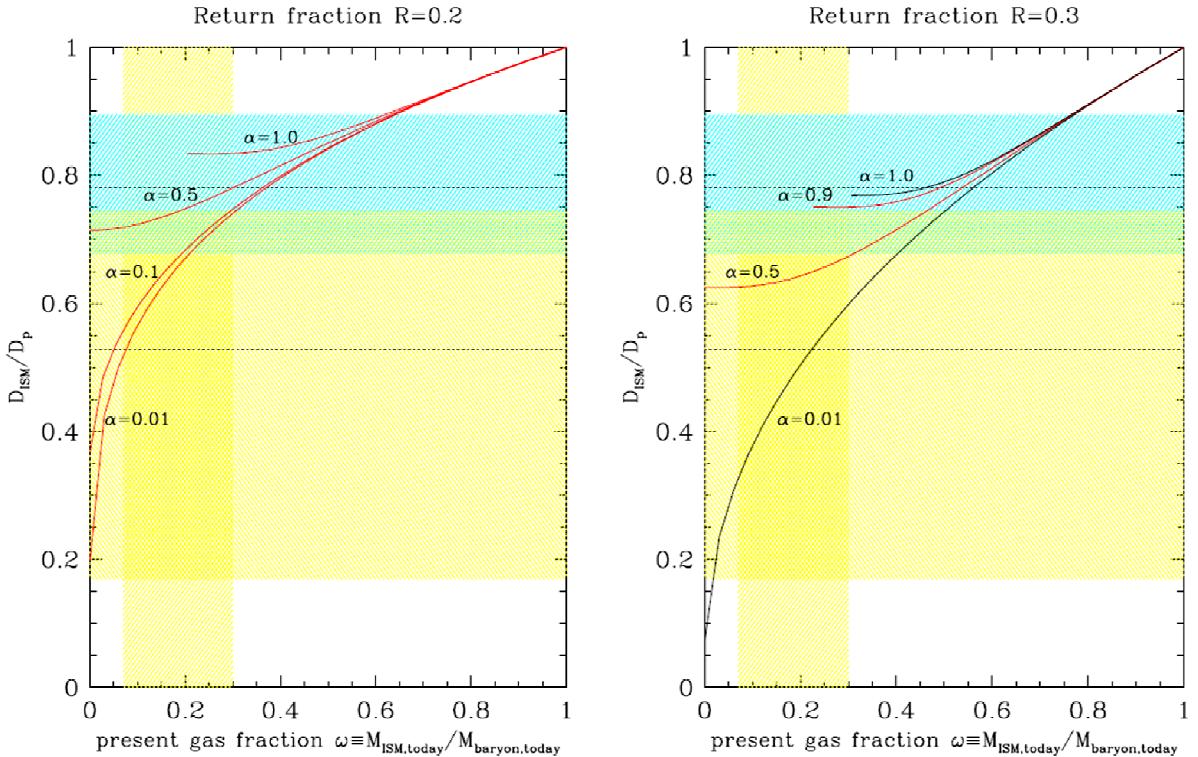
Vrednost iz (9) se odnosi na prosek za ceo opseg merenja $(D/H)_{\text{ISM, gas}} = (0.5 - 2.2) \times 10^{-5}$, tj. na srednju zastupljenost deuterijuma u gasu (odakle proizilazi i velika greška), a (10) je izvedeno iz jednakosti (1) koja ubraja i deuterijum iz prašine.

Sadašnji udeo gasa u barionskoj masi Galaksije (diska) se zna do na faktor od ~ 2 [32, 33]

$$\omega_{\text{obs}} \equiv \left(\frac{M_{\text{ISM,MW}}}{M_{\text{baryon,MW}}} \right)_{\text{obs}} \sim 0.07 - 0.30. \quad (11)$$

O proceni frakcije povratnog gasa R će biti reči u poglavljiju 6.2.

Na Slici 6. su prikazane krive zavisnosti $D(t)/D_p$ od $\omega(t)$ za različito α , što su ujedno rezultati iz modela PF (2008) [7]. Za levi grafik je uzeto $R = 0.2$, a za desni $R = 0.3$. Obojenim trakama



Slika 6. Model PF (2008). Na levom grafiku prikazane su krive različitih priliva za $R = 0.2$, a na desnom za $R = 0.3$. Svetloplava traka označava oblast nepouzdanosti za odnos merenih vrednosti zastupljenosti D u galaktičkom disku i primordijalne zastupljenosti deuterijuma.

Vertikalna žuta traka označava trenutnu frakciju gasa u odnosu na barionsku masu u galaktičkom disku. [7]

su prikazana dva horizontalna ograničenja (9) i (10), i vertikalno ograničenje (11). U ovom modelu se posmatra presek ograničenja (10) i (11) koji obrazuje pravougaonik u levom gornjem uglu grafika. Može se videti da za $R = 0.2$ kriva za svaki priliv u opsegu $0 \leq \alpha \leq 1$ prolazi kroz posmatrani pravougaonik. Uslov $R = 0.3$ dozvoljava samo prilive u opsegu $0.5 < \alpha < 1$.

6.2 Procena povratnog udela R

Povratna frakcija gasa R , ulazni parametar koji je još uvek nedovoljno istražen, predstavlja deo mase koja se u toku evolucije zvezda vraća nazad u međuzvezdanu materiju. U povratne mehanizme spadaju zvezdani vetrovi, planetarne magline i supernove. U ovom modelu, R je broj između 0 i 1 koji predstavlja frakciju u odnosu na stopu formiranja zvezda (ψ); Prodanović i Fields su u svom modelu uzeli dve vrednosti, u skladu sa korišćenim aproksimacijama [11, 12], $R = 0.2$ i $R = 0.3$. U ovom radu će biti korišćena nešto viša vrednost R , koja je izvedena iz modernije funkcije početne mase (IMF, *Initial mass function*) [13].

6.3 Funkcija početne mase

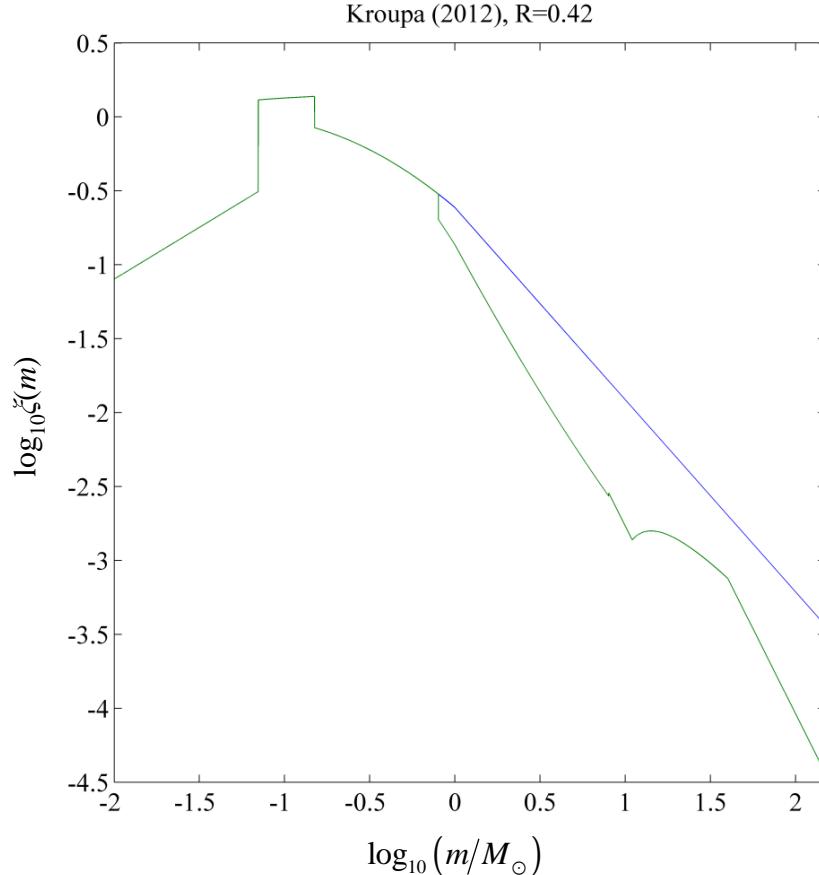
Za procenu R , ovde ćemo koristiti kanonični IMF (Kroupa, 2012) [13], koji se sastoji iz stelarnog i substelarnog dela, sa ukupnim opsegom masa $0.01 < m/M_{\odot} < 150$. Finalna funkcija mase (FMF) je dobijena na osnovu sledećih prepostavki: (a) sve zvezde i braon patuljci kojima su mase manje od $0.8 M_{\odot}$ ne doprinose povratku gasa u ISM, jer im je vreme života duže od dosadašnje starosti Galaksije, pa se njihov dosadašnji gubitak mase smatra zanemarljivim (tzv. *turn-off mass* [14]); (b) zbog nepotpunog shvatanja mehanizama supernovih i mase ostataka kod veoma masivnih zvezda [15], izabran je prilično uprošćen FMF za zvezde iznad $11 M_{\odot}$, tako da u opsegu inicijalnih masa $11-40 M_{\odot}$ masa ostatka linearno raste od 1.4 do $15 M_{\odot}$, nakon čega ostaje konstantna; (c) za sve mase između (a) i (b) masa ostatka je izvedena na osnovu aproksimacije iz [11]³. Treba napomenuti da prvi deo FMF iz (b), dakle za inicijalne mase $11 < m/M_{\odot} < 40$, dovoljno dobro pokriva rezultate iz [15], i gotovo nimalo ne zavisi od metaličnosti kolapsirajuće zvezde. FMF za zvezde inicijalnih masa iznad $40 M_{\odot}$ je izabran bez naročitog fizičkog uporišta i nalazi se između donjih i gornjih vrednosti modela [15, 16]. Međutim, bilo koja vrednost mase ostataka u tom opsegu (a između $1.4 M_{\odot}$ i početne mase zvezde) ne menja ukupno R za više od ~ 0.03 . Na osnovu početne i finalne funkcije mase, povratna frakcija R se dobija kao

$$R = 1 - \frac{\int_{0.01}^{150} m_{\text{rem}} \xi(m) dm}{\int_{0.01}^{150} m \xi(m) dm}, \quad (12)$$

gde je m_{rem} (u masama Sunca) masa kompaktnog ostatka zvezde na kraju njene evolucije (osim za mase ispod 0.8, kod kojih je jednaka početnoj masi), a $\xi(m)$ je kanonička funkcija

³ $m_{\text{rem}} = \begin{cases} 0.11m + 0.45; & m \leq 8 \\ 1.4; & m > 8 \end{cases}$

početnih masa iz [13]. Na ovaj način dobijena povratna frakcija iznosi 0.42. Na slici 7. je prikazan grafik IMF, zajedno sa krivom FMF. Korišćenjem različitih funkcija IMF (Miller & Scalo, 1979; Scalo, 1993; Adams & Laughlin, 1997; Kroupa, 2001; Chabrier, 2003), sa istim kriterijumom za FMF, dobijeni rezultati za R su između 0.4 i 0.45.



Slika 7. Kanonička funkcija početnih masa (IMF) iz [13]; prikazana je i funkcija finalnih masa. Funkcija važi za opseg masa od 0.01 do 150 solarnih masa. Na osnovu ovog IMF-a i FMF-a rezultujuća povratna frakcija iznosi 0.42.

U PF (2008), za $R > 0.4$, nijedan priliv $0 \leq \alpha \leq 1$ ne prolazi kroz oba ograničenja ((10) i (11)). Međutim, Prodanović, Steigman i Fields (2010) [8] su statističkom obradom $(D/H)_{\text{gas}}$ merenja i njihovih varijacija odredili novu reprezentativnu zastupljenost D za galaktički disk, koja spušta ograničenje $D(t)/D_p$ do nivoa na kom $R > 0.4$ dozvoljava mogući priliv.

6.4 Rezultati

S obzirom da su Linsky i saradnici [3] zastupljenost D od $(2.31 \pm 0.24) \times 10^{-5}$ odredili na osnovu samo nekoliko najviših tačaka sa grafika na Slici 4, postoji opravdana sumnja da taj rezultat predstavlja reprezentativnu vrednost *istinske* zastupljenosti deuterijuma unutar galaktičkog diska. Na osnovu Bayesove statističke analize (nezavisne od modela) za 49 merenih zastupljenosti deuterijuma u galaktičkom disku, Prodanović, Steigman i Fields [8] su odredili novu najverovatniju zastupljenost deuterijuma (gas+prašina) u galaktičkom disku:

$$\left(\frac{D}{H}\right)_{ISM} = (2.0 \pm 0.1) \times 10^{-5}. \quad (13)$$

Takođe, usvojili su novu vrednost primordijalne zastupljenosti deuterijuma [34]

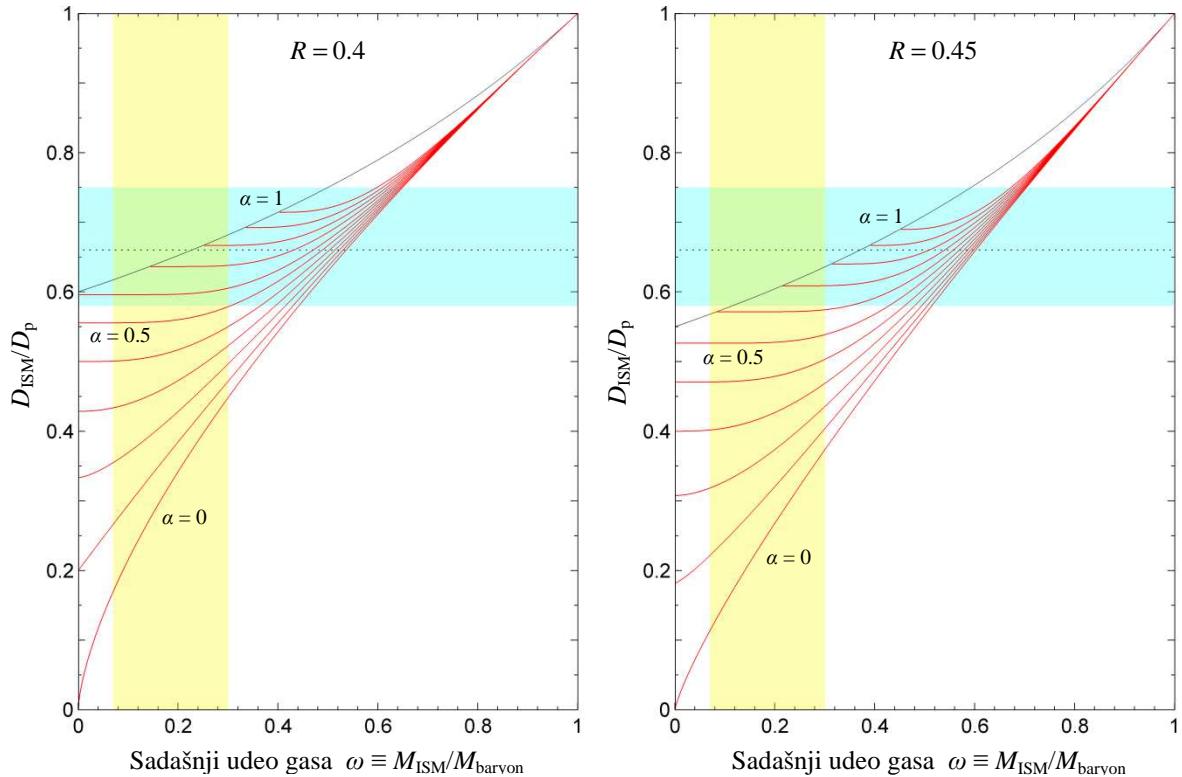
$$\left(\frac{D}{H}\right)_p = (2.8 \pm 0.2) \times 10^{-5}. \quad (14)$$

Ove dve vrednosti daju novo ograničenje na PF (2008) model:

$$\frac{D_{ISM, gas+dust}}{D_p} = 0.66^{+0.09}_{-0.08} \quad (15)$$

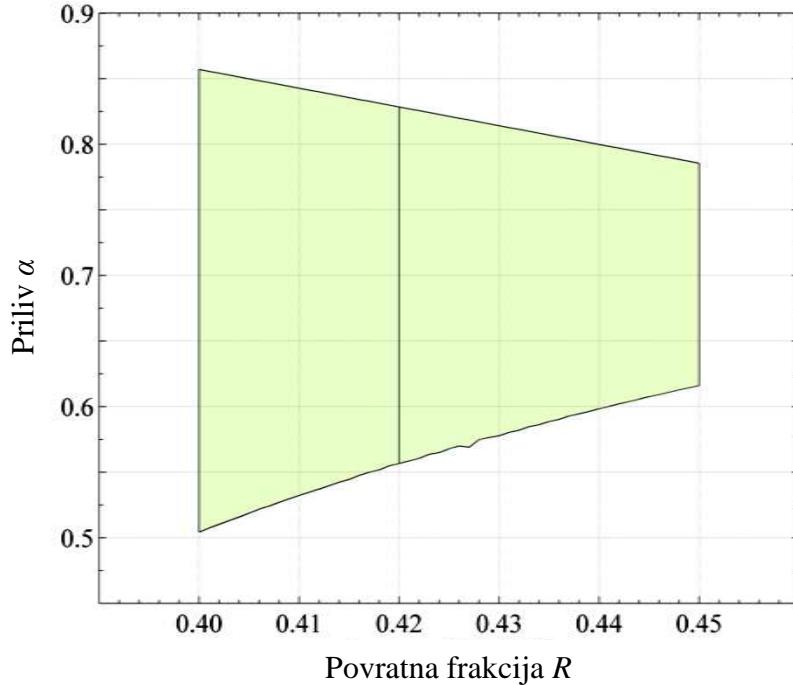
Na Slici 8. je prikazan isti model kao na Slici 6, samo sa drukčijim vrednostima za povratnu frakciju: $R = 0.4$ (levi) i $R = 0.45$ (desni grafik), što su minimalna i maksimalna vrednost dobijene korišćenjem nekolicine različitih IMF. Svetloplava traka označava novo ograničenje (15), iz [8].

Za slučaj $R = 0.4$, prilivi α koji prolaze kroz ograničavajući pravougaonik su u opsegu $0.5 < \alpha < 0.85$, dok su za slučaj $R = 0.45$ mogući prilivi u opsegu $0.62 < \alpha < 0.78$. Za usvojenu vrednost u ovom radu, $R = 0.42$, taj opseg je $0.56 < \alpha < 0.83$.



Slika 8. Prikaz modela. Levi grafik: $R = 0.4$, desni grafik: $R = 0.45$. Crvene krive predstavljaju različite prilive, od 1 do 0, sa korakom 0.1. Svetloplava traka predstavlja novo ograničenje (15). Crna kriva je granica ka kojoj se model asimptotski približava.

Na Slici 9. je prikazana oblast dozvoljenih priliva u zavisnosti od povratne frakcije u opsegu $0.40 < R < 0.45$.



Slika 9. Oblast dozvoljenih priliva u zavisnosti od povratne frakcije R . Crna vertikalna linija prikazuje opseg priliva za $R = 0.42$.

7. Diskusija

Rezultati ovog modela pokazuju da postoji značajni galaktički prлив koji održava relativno visok nivo zastupljenosti deuterijuma u Galaksiji/galaktičkom disku. Ovaj model, u načelu, važi samo za *galaktički disk*, jer oba ograničenja (11) i (15), tj. D_{ISM}/D_p i ω_{obs} predstavljaju rezultate posmatranja unutar diska, ili delimično izvan njega, ali nemaju nikakve veze sa galaktičkim haloom. Stoga se prirodno može prepostaviti da sam prлив potiče najvećim delom iz galaktičkog haloa koji sadrži slabo procesuirani, približno primordijalni gas, koji se konstantno uliva u galaktičku potencijalnu jamu. Koeficijent α , koji kvantitativno označava prлив, predstavlja faktor stope formiranja zvezda (SFR), što je pojednostavljeni pristup u ovom GCE modelu. Vezivanje priliva za SFR je delimično opravdana aproksimacija (simulacije formiranja galaksija, [9]) kako bi se izbegao problem sa nedovoljno istraženom istorijom SFR. Takođe, bitno pojednostavljenje predstavlja IRA aproksimacija u kojoj se svaki prлив instantno transformiše u produkte završene zvezdane evolucije. Pojedini modeli (Vangioni-Flam et al, 1994) pokazuju da se rezultati D/H sa i bez IRA mogu razlikovati za $\sim 30\%$. Iako je određen novi (veći) povratni faktor R u odnosu na PF (2008), koji je izведен pomoću modernog IMF-a, ovaj model sigurno pati zbog nevarijabilnosti IMF-a kroz istoriju Galaksije. Konstantnost IMF-a u kombinaciji sa IRA drastično pojednostavljuje evoluciju D/H koja dobija karakter uravnoteženog monotonog opadanja. Ne bi trebalo zanemariti

mogućnost da je rani IMF izgledao bitno drugačije od današnjeg, kao ni vreme koje je potrebno zvezdama određenih masa da vrate svoj deo gasa u ISM; pored toga, funkcija finalnih masa zavisi od metaličnosti i ta zavisnost je verovatno jako značajna kod zvezda velikih masa [15, 16]. Ako bi se u taj detaljniji (i nepoznatiji) scenario ubacila i evolucija galaktičke hladne tamne materije, kao i mogućnost da je povremeno postojao odliv gasa, dobila bi se znatno komplikovanija kriva D/H zastupljenosti.

Što se tiče granica D_{ISM}/D_p i ω_{obs} u kojima se u ovom modelu traži odgovarajući priliv, o njihovoј pouzdanosti se može dosta diskutovati. Posmatrana barionska frakcija gasa $\omega_{\text{obs}} \sim 0.07 - 0.30$ određena je do na faktor ~ 2 , a njen preciznije određivanje otežava njena prostorna zavisnost (prvenstveno od udaljenosti od diska). Sa stanovišta ovog modela i rezultata ključna je gornja granica $\omega = 0.3$, jer rezultati, u obliku u kom se nalaze, nisu osetljivi na eventualno pomeranje donje granice ω . Nepouzdanost D_{ISM}/D_p zavisi od nepouzdanosti merenja ove dve veličine. S obzirom da D_p koje se meri različitim metodama (iz apsorpcije dalekih kvazara i iz kosmičke mikrotalasne pozadine) predstavlja donju granicu istinske primordijalne zastupljenosti deuterijuma (koja je nedetektabilna), samim tim obezbeđuje gornju granicu D_{ISM}/D_p . Međutim, određivanje $(\text{D}/\text{H})_{\text{ISM}}$ je i samo problematično. Dok su Linsky i saradnici (2006), na osnovu hipoteze da je sav „nedostajući“ gasni deuterijum inkorporiran u prašinu, uzeli da je vrednost međuzvezdane zastupljenosti D određena sa nekoliko najviših izmerenih tačaka, $(\text{D}/\text{H})_{\text{ISM}} = (2.31 \pm 0.24) \times 10^{-5}$, Prodanović, Steigman i Fields (2010) su upotrebili svih 49 merenja i pomoću Bayesove analize došli do nekoliko vrednosti $(\text{D}/\text{H})_{\text{ISM}}$ koje se, u zavisnosti od odabranog oblika verovatnoće oduzimanja D iz gasne faze, kreću od 1.8 do 2.3×10^{-5} (Tabela 1, [20]). Ne poznavajući detaljne mehanizme zahvatanja deuterijuma na prašinu i ne favorizujući nijednu specifičnu raspodelu, oni su se opredelili za normalnu raspodelu količine „zalepljenog“ deuterijuma na datom uzorku, na osnovu čega se dobija $(\text{D}/\text{H})_{\text{ISM}} = (2.0 \pm 0.1) \times 10^{-5}$. Dakle, može se reći da su posredi osetljivi rezultati i da je skoro izvesno da nepouzdanost D_{ISM}/D_p izlazi izvan datih granica iz (15).

8. Zaključak

Cilj ovog rada bio je da se jednostavnim, ali poučnim modelom, pokaže da se relativno visoka zastupljenost deuterijuma u međuzvezdanoj materiji može objasniti značajnim prilivom niskometaličnog gasa iz galaktičkog haloa. Ovaj model ne zavisi od vremena, već od stope formiranja zvezda (SFR) u odnosu na koju je definisan i priliv.

Najvažnije prepostavke i aproksimacije koje pojednostavljaju model su sažete u sledećem:

- Priliv i povratni ideo linearno zavise od SFR u toku čitave evolucije Galaksije
- IRA aproksimacija, tj. trenutno pretvaranje mase priliva u produkte završene zvezdane evolucije

U modelu je korišćeno novo opservaciono ograničenje $D_{\text{ISM}}/D_p = 0.66^{+0.09}_{-0.08}$ iz [8] koje je izvedeno na osnovu Bajesove analize kojom je određena srednja vrednost ukupne zastupljenosti deuterijuma u ISM. Sažeti rezultati ovog rada su sledeći:

- U datim opservacionim ograničenjima, za povratnu frakciju $R = 0.42$, koju preferiraju moderni GCE modeli, priliv je u granicama $\alpha = [0.56, 0.83]$ (Slika 8)
- Korišćenjem nekolicine modernih IMF-a izvedene su povratne frakcije u opsegu $R \approx [0.40, 0.45]$, a zavisnost odgovarajućih priliva od povratne frakcije na ovom domenu data je na Slici 9
- Za razliku od PF (2008), gde za uslov $R > 0.4$ nijedan priliv nije odgovarao opservacionim ograničenjima, sa novim ograničenjem $D_{\text{ISM}}/D_p = 0.66^{+0.09}_{-0.08}$ ta granica je pomerena na $R \approx 0.51$

Kao ideje za budući rad u ovoj oblasti na raspolaganju su sledeći zaključci:

1. Potrebno je tačnije odrediti ograničenja. Što se tiče zastupljenosti deuterijuma, od pomoći bi bila preciznija i brojnija merenja D/H u međuzvezdanoj sredini, kao i podrobnejše poznavanje mehanizama vezivanja deuterijuma za prašinu. U tom smislu poželjno je kvantitativno ispitati korelacije vezivanja deuterijuma u odnosu na druge refrakcione elemente i/ili pronaći neki drugi opservabilan (ili teorijsko-opservabilan) način da se odredi stepen vezivanja deuterijuma u različitim uslovima sredine i te nalaze eventualno uključiti (recimo, u vidu apriorne funkcije u [8]) u određivanje usrednjene zastupljenosti D u galaktičkom disku.
2. Definisati oblast u odnosu na koju se posmatra priliv. S obzirom da priliv najvećim delom, verovatno, potiče iz haloa i „sliva se“ u disk, potrebno je, makar fenomenološki, odrediti okvir u kom se interpretiraju zastupljenost D i gasni barionski ideo u Galaksiji/galaktičkom disku. Kao primer, veličine se mogu posmatrati u kontekstu solarnog cilindra ili galaktičke ravni.
3. Detaljniji GCE model bi podrazumevao istoriju stope formiranja zvezda i, možda, vremensku zavisnost modela, kao i varijabilnost priliva i povratnog udela u toku evolucije.

9. Literatura

- [1] Scott Dodelson, *Modern Cosmology*, University of Chicago, 2003, USA
- [2] Kenneth Sembach, Measurements of deuterium in the Milky Way, *Proceedings IAU Symposium No. 268, 2010*
- [3] Jeffrey L. Linsky et al, What is the total deuterium abundance in the local Galactic disk?, *The Astrophysical Journal*, 647:1106-1124, 2006 August 20
- [4] Brian E. Wood et al, Two new low Galactic D/H measurements from the *Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer*, *The Astrophysical Journal*, 609:838–853, 2004 July 10

- [5] Guillaume Hébrard, What the D/O ratio tells us about the interstellar abundance of deuterium?, *Proceedings IAU Symposium No. 268, 2010*
- [6] Uroš Meštrić, Uticaj prašine na zastupljenost deuterijuma u međuzvezdanoj sredini (*diplomski rad*), 2010
- [7] Tijana Prodanović, Brian D. Fields, FUSE Deuterium Observations: A Strong Case For Galactic Infall, *arXiv:0804.3095v2 [astro-ph]* 5 Aug 2008
- [8] Tijana Prodanović, Gary Steigman & Brian D. Fields, The Deuterium Abundance in the Local Interstellar Medium, *arXiv:0910.4961v2 [astro-ph.GA]* 25 Mar 2010
- [9] Dušan Kereš et al, How Do Galaxies Get Their Gas?, *arXiv:astro-ph/0407095v2* 20 Jul 2005
- [10] Bernard Pagel, Nucleosynthesis and Chemical Evolution of Galaxies (Second Edition), *Cambridge University Press*, 2009, UK
- [11] Icko Iben, Jr. & Alexander V. Tutukov, Supernovae of type I as end products of the evolution of binaries with components of moderate initial mass ($M \lesssim 9M_{\odot}$), *Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 54, Feb. 1984, p. 335-372.
- [12] Edwin E. Salpeter, The luminosity function and stellar evolution, *Astrophys. J.* 121 161, 1955
- [13] Pavel Kroupa et al, The stellar and sub-stellar IMF of simple and composite populations, *arXiv:1112.3340v2 [astro-ph.CO]* 29 Jan 2012
- [14] Gilles Chabrier, Galactic stellar and substellar initial mass function, *arXiv:astro-ph/0304382v2* 9 Jul 2003
- [15] Chris L. Fryer et al, Compact Remnant Mass Function: Dependence on the Explosion Mechanism and Metallicity, *arXiv:1110.1726v1 [astro-ph.SR]* 8 Oct 2011
- [16] Chris L. Fryer & Vassiliki Kalogera, Theoretical black hole mass distributions, *The Astrophysical Journal*, 554:548-560, 2001 June 10
- [17] Glenn E. Miller & John M. Scalo, The initial mass function and stellar birthrate in the solar neighborhood, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 41:513-547, 1979 November
- [18] Fred C. Adams & Gregory Laughlin, A dying universe: the long-term fate and evolution of astrophysical objects, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 69, No. 2, April 1997
- [19] Pavel Kroupa, On the variation of the initial mass function, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 322, 231-246, 2001
- [21] S. Burles et al, Big-Bang Nucleosynthesis: Linking Inner Space and outer Space, *arXiv:astro-ph/9903300v1* 19 Mar 1999
- [20] S. Burles & D. Tytler, *The Astrophysical Journal* 499, 699, 1998
- [22] Kirkman et al, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 149:1-28, 2003
- [23] M. Jura, *Advances in UV Astronomy: 4 Years of IUE Research*, 54, 1982
- [24] M. A. de Avillez & M.-M. Mac Low, *The Astrophysical Journal*, 581, 1047, 2002
- [25] B. T. Draine, *Carnegie Observatories Centennial Symp.*, Origin and Evolution of the Elements, 317, 2004

- [26] B. T. Draine, *ASP Conf. Ser.* 348, *Astrophysics in the Far Ultraviolet: Five Years of Discovery with FUSE*, 58, 2006
- [27] Y. J. Pendleton & L. J. Allamandola, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 138, 75, 2002
- [28] E. Peeters et al, *The Astrophysical Journal*, 604, 252, 2004
- [29] G. Steigman, D. Romano & M. Tosi, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 378, 576, 2007
- [30] S. J. Kannappan, *The Astrophysical Journal Letters*, 611, L89, 2004
- [31] M. Schmidt, *The Astrophysical Journal*, 137, 758, 1963
- [32] J. Holmberg & C. Flynn, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 313, 209, 2000
- [33] J. Holmberg & C. Flynn, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 352, 440, 2004
- [34] M. Pettini et al, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 391, 1499, 2008
- [35] Richard H. Cyburt, Brian D. Fields & Keith A. Olive, Primordial Nucleosynthesis in Light of WMAP, *arXiv:astro-ph/0302431v2* 8 Sep 2003

Biografija

Rođen 17. jula 1985. godine u Novom Sadu. Pohađao osnovnu školu „Petefi Šandor“ i gimnaziju „Svetozar Marković“ u Novom Sadu.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

TD

Tip zapisa:

TZ

Vrsta rada:

VR

Autor:

AU

Mentor:

MN

Naslov rada:

NR

Jezik publikacije:

JP

Jezik izvoda:

JI

Zemlja publikovanja:

ZP

Uže geografsko područje:

UGP

Godina:

GO

Izdavač:

IZ

Mesto i adresa:

MA

Fizički opis rada:

FO

Naučna oblast:

NO

Naučna disciplina:

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

PO

UDK

Čuva se:

ČU

Važna napomena:

VN

Izvod:

IZ

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

Datum odrbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

dr Milan Ćirković

član:

dr Tijana Prodanović

član:

dr Dušan Mrđa

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type: Monograph publication

DT

Type of record: Textual printed material

TR

Content code: Final paper

CC

Author:

AU

Mentor/comentor:

MN

Title:

TI

Language of text: Serbian (Latin)

LT

Language of abstract: English

LA

Country of publication: Serbia

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2012

PY

Publisher: Author's reprint

PU

Publication place: Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

PP

Physical description: 5/182/32/0/71/0/3

PD

Scientific field:

SF

Scientific discipline:

SD

Subject/ Key words:

SKW

UC

Holding data: Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

HD

Note: none

N

Abstract:

AB

Accepted by the Scientific Board:

ASB

Defended on:

DE

Thesis defend board:

DB

President: dr Milan Ćirković

Member: dr Tijana Prodanović

Member: dr Dušan Mrđa