



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



**Problem zastupljenosti deuterijuma u međuzvezdanoj sredini
-master rad-**

Mentor: Prof. dr Tijana Prodanović

Novi Sad, 2018

Kandidat: Martin Hložan

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Nukleosinteza Velikog praska	1
2.1	Opis sinteze lakih jezgara	2
2.2	Zastupljenost primordijalnih elemenata	3
2.3	Primordijalne zastupljenosti iz modela nukleosinteze Velikog praska i posmatranja	4
3	Kosmička evolucija deuterijuma	5
3.1	Deuterijum na velikim crvenim pomacima	5
3.2	Izmerene vrednosti D/H u pravcima kvazara na velikim crvenim pomacima	6
4	Varijacije zastupljenosti deuterijuma u međuzvezdanoj sredini	8
5	Veza između D u prašini i D/H u gasu	11
6	Ispitivanje veze između zastupljenosti D i refraktornih elemenata	12
7	Diskusija i zaključak	30
8	Literatura	31
9	Biografija	33
10	Ključna dokumentacija	34

1 Uvod

Deuterijum (D) je izotop hemijskog elementa vodonika. Nastaje samo u procesu nukleosinteze Velikog praska (eng. Big Bang Nucleosynthesis-BBN). Njegova hemijska evolucija je vrlo jednostavna. Pošto nastaje samo prilikom BBN, a lako se uništava u zvezdama, očekuje se da zastupljenost deuterijuma monotono opada sa vremenom. Zato se merenjem zastupljenosti D u pravcima kvazara na velikim crvenim pomacima može odrediti približna vrednost zastupljenosti primordijalnog deuterijuma. Današnju zastupljenost D se meri u našoj galaksiji. Poređenjem ove dve vrednosti može se odrediti koliko se do sada deuterijuma potrošilo sagorevanjem u zvezdama, što se naziva astracija¹. Galaktički hemijski modeli evolucije daju teorijska predviđanja koliko je do sada potrošeno deuterijuma u zvezdama. Međutim, lokalna merenja pokazuju neočekivano velike prostorne varijacije zastupljenosti deuterijuma. Ako se očekuje da je lokalna zastupljenost deuterijuma homogena, koja je onda njena prava vrednost? Jedna od ideja je da se deuterijum vezuje za prašinu, gde prelazi iz gasovite u čvrstu fazu, pri čemu se zastupljenost D meri samo u gasovitoj fazi. Pretpostavlja se da se D lakše vezuje sa prašinu u odnosu na H, gde onda odnos D/H u gasu opada. Poznato je da se refraktorni elementi Fe, Si, O, Mg, Ti itd. vezuju za prašinu. Potrebno je ispitati da li postoji pozitivna korelacija između D i ovih elemenata. Ako se pokaže da je korelacija pozitivna, onda za pravu vrednost zastupljenosti deuterijuma treba uzeti onu merenu u oblastima sa najvećim vrednostima D, što predstavlja problem za astraciju i hemijske modele. Ako je to slučaj, onda se i na velikim crvenim pomacima očekuje da je D donekle vezan za prašinu, te su prave vrednosti zastupljenosti D veće od izmerenih. Ako se pokaže da nema korelacije između trošenja D i refraktornih elemenata na prašini, onda vezivanje D u prašine ne može da bude jedino objašnjenje prostornih varijacija u našoj okolini. Potrebno je naći neko drugo rešenje, ili modifikovati modele hemijske evolucije ili sam model Velikog praska.

2 Nukleosinteza Velikog praska

Teorija Velikog praska predstavlja kosmoloski model nastanka univerzuma. Na samom početku, univerzum je bio u vrlo gustom i vrelom stanju, nakon čega počinje da se širi i hlađi. Hablov zakon, nukleosinteza Velikog praska, i Kosmičko pozadinsko zračenje (eng. Cosmic microwave background-CMB) potvrđuju tačnost teorije Velikog praska. CMB predstavlja ostatke elektromagnetskog zračenja iz ranog univerzuma. Kosmičko pozadinsko zračenje, koje potiče 380 000 god. nakon Velikog paska, nam daje informacije o zastupljenosti barionske materije, tamne materije i tamne energije. Hablov zakon pokazuje da se univerzum širi. Izmerene zastupljenosti većine lakih elemenata su u slaganju sa predviđanjima iz nukleosintezom Velikog praska.

Nukleosinteza Velikog praska čini temelj moderne kosmologije. Opisuje proces nastajanja prvih hemijskih elemenata u univerzumu, od 10 s do 10 min nakon Velikog praska. Vrlo je važno što preciznije izmeriti zastupljenosti primordijalnih elemenata. Ova merenja testiraju preciznost modela primordijalne nukleosinteze, fizičke uslove ranog svemira, modele Galaktičke hemijske evolucije, kao i hemijske osobine intergalaktičkog medijuma (eng. intergalactic medium-IGM). U primordijalne elemente spadaju vodonik, deuterijum (D ili ^2H), ^3H , ^4He , ^7Li . Teži elementi od litijuma do gvožđa, se stvaraju mnogo kasnije, prilikom zvezdane nukleosinteze. Teži elementi od Fe, nastaju prilikom eksplozija supernovih, sudaru neutronskih zvezda, ili u drugim tipovima zvezdama, putem r (eng. rapid) ili s (eng. slow) procesa.

Od svih lakih, primordijalnih elemenata očekuje se da je evolucija deuterijuma vrlo jednostavna. Deuterijum se proizvodi samo u procesu nukleosinteze Velikog praska, i zavisi samo od odnosa koncentracije barionske materije (n_b) i koncentracije fotona (n_γ). U nuklearnim reakcijama u zvezdama, D se pretvara u ^3He i ^4He i druge teže elemente. Ovaj proces se naziva astracija. Solarni vetrovi i eksplozije supernovih obogaćuju međuzvezdanu sredinu (eng. interstellar medium-ISM) materijalom, koji u sebi ne sadrži deuterijum, ali je obogaćen metalima². Nakon što se gas preradi u zvezdama, dolazi do monotonog opadanja zastupljenosti D. Drugi laci elementi kao što su ^3He , ^4He , ^7Li imaju mnogo kompleksniji proces stvaranja i uništenja.

Do nukleosinteza Velikog praska dolazi nekoliko minuta nakon Velikog praska. Nakon inflacije, u univerzumu dominira zračenje. Kako vreme prolazi, univerzum se hlađi i širi, formiraju se nova jezgra. Od ključne važnosti je brzina reakcije (Grupen 2005 [1]):



¹Astracija je proces koji nam govori koji udeo nekog elementa se potrošio u zvezdama, prilikom nuklearnih reakcija

²U astronomiji se metalima smatraju svi hemijski elementi, koji su teži od ^4He

gde je ν_e elektronski neutrino, n neutron, e^- elektron i p je proton, e^+ je pozitron. Ova jednačina prikazuje mogućnost transformacije neutrona u protone, i obrnuto, dok je slaba interakcija u ravnoteži. Proton je lakši od neutrona za $\Delta m = m_n - m_p \approx 1,3$ MeV (Grupen 2005 [1]), gde je m_n masa neutrona, m_p masa protona i Δm razlika ove dve mase. Sve dok se reakcija (1) odvija dovoljno brzo u odnosu na brzinu širenja svemira, odnos broja neutrona prema broju protona je srazmeran Boltzmanovom faktoru $e^{-\frac{\Delta m}{k_b T}}$. Na temperaturi od oko 1 MeV reakcije (1) i (2) postaju nedovoljno brze. Ta temperatura se naziva temperatura zamrzavanja T_f . Zatvara se kanal kojim se proizvode neutroni, odnosno reakcija sa desne na levu stranu. U ovom trenutku dolazi do zamrzavanja odnosa broja neutrona i protona, i taj broj iznosi (Grupen 2005 [1]):

$$\frac{n_n}{n_p} = \frac{1}{6} \quad (3)$$

gde je (n_n) koncentracije neutrona a (n_p) koncentracije protona. Nakon zamrzavanja, dok se ne steknu uslovi za nuklearne reakcije, ovaj broj opadne na $n_n/n_p \simeq 1/7$. Na osnovu temperature zamrzavanja T_f , pod predpostavkom da se svi neutroni potroše na stvaranje ${}^4\text{He}$, može se odrediti zastupljenost ${}^4\text{He}$.

Za vreme nukleosinteze, ukupnoj gustini energije najviše doprinosi zračenje koje rukovodi širenjem svemira (relativističke čestice, fotoni, elektronski, mionski, tau neutrini, kao i njihove antičestice).

2.1 Opis sinteze lakih jezgara

Do sinteza ${}^4\text{He}$ dolazi preko nekoliko reakcija:



gde je γ gama foton. Energija veze deuterijuma je $E = 2,2$ MeV. U eri gde dominira zračenje ima mnogo više fotona od barionske materije. Postoje fotoni sa dovoljnom energijom za razbijanje veze deuterijuma, gde se dobijaju proton i neutron. Potrebno je da prode neko vreme i da opadne energija fotona, kako bi deuterijum mogao da opstane, a sinteza D počinje na temperaturi od 0,085 MeV (Grupen 2005 [1]).

Masena zastupljenost elementa (Y_i) je jednaka količniku gustine tog elementa ρ_i i gustine bariona ρ_{tot} :

$$Y_i = \frac{\rho_i}{\rho_{\text{tot}}} \quad (7)$$

Ukupna masa u nekom elementu jednaka zbiru masa svih nukleona tog elementa. Masena zastupljenost primordijalnog ${}^4\text{He}$ (Y_p) jednaka je:

$$Y_p = \frac{M_p({}^4\text{He})}{M_{\text{tot}}} \quad (8)$$

gde je $M_p({}^4\text{He})$ ukupna masa primordijalnog ${}^4\text{He}$, a M_{tot} ukupna masa svih nukleona.

Sinteza D počinje $t \approx 3$ min nakon Velikog praska. Sledеćih nekoliko minuta, većina neutrona se ili raspala, ili učestvuje u stvaranju ${}^4\text{He}$. Masena zastupljenost ${}^4\text{He}$ se opisuje pomoću ukupne mase ${}^4\text{He}$, u odnosu na ukupnu masu svih nukleona.

$$Y_p = \frac{m_{^4\text{He}} n_{^4\text{He}}}{m_p n_p + m_{^4\text{He}} n_{^4\text{He}}} \quad (9)$$

gde je masa nukleona $m_N \approx 0,94$ GeV i približno jednaka masi neutrona i protona, $n_{^4\text{He}}$ koncentracije ${}^4\text{He}$, $m_{^4\text{He}}$ masa ${}^4\text{He}$. Jezgro ${}^4\text{He}$ sa sastoje iz 4 nukleona, odnosno 2 protona i 2 neutrona. Daljim proračunom dobija se da masena zastupljenost ${}^4\text{He}$ zavisi od odnosa koncentracije neutrona i protona.

$$Y_p = \frac{2(n_n/n_p)}{1 + n_n/n_p} \quad (10)$$

Očekuje se da je maseni udeo primordijalnog He približno 25 % (Grupen 2005 [1]). Zastupljenosti ostalih primordijalnih elemenata se predstavlja u odnosu na zastupljenost H. Njihove zastupljenosti zavise od efikasnosti nuklearnih reakcija. Očekivane reda veličina zastupljenosti elemenata u odnosu na H su: za $D/H \approx 10^{-5}$, ${}^3\text{He}/H \approx 10^{-5}$, $\text{Li}/H \approx 10^{-10}$ (Grupen 2005 [1]). Vrednosti D/H , ${}^4\text{He}/H$, ${}^3\text{He}/H$ su definisane kao:

$$\frac{D}{H} = \frac{N(D)}{N(H)} \quad (11)$$

$$\frac{^3\text{He}}{\text{H}} = \frac{N(^3\text{He})}{N(\text{H})} \quad (12)$$

$$\frac{^7\text{Li}}{\text{H}} = \frac{N(\text{Li})}{N(\text{H})} \quad (13)$$

gde je $N(\text{DI})$ izmerena linijska gustina deuterijima, $N(\text{H})$ linijska gustina vodonika, $N(^3\text{He})$ linijska gustina ^3He , a $N(^7\text{Li})$ izmerena linijska gustina ^7Li .

Zastupljenosti primordijalnih elemenata zavise od koncentracije bariona n_b i od koncentracije fotona n_γ . Odnosa koncentracija bariona i fotona je definisan:

$$\eta = \frac{n_b}{n_\gamma} \quad (14)$$

Parametar η je jedini slobodni parametar u standardnoj BBN-i.

2.2 Zastupljenost primordijalnih elemenata

Zastupljenosti primordijalnih elemenata je moguće posmatrati tek mnogo kasnije nakon BBN-e. Najpovoljnija za posmatranja su mesta sa što manjom metaličnošću, jer se tu mogu izmeriti vrednosti koje su najpribližnije primordijalnim. Najpogodnije je posmatrati primordijalni D na mestima sa malom metaličnošću, gde možemo smatrati da je malo gasa prerađeno u zvezdama, npr. u pravcima kvazara na velikim crvenim pomacima z , sa malom metaličnošću. Posmatra se apsorpciona Lajmanova alfa linija ovog izotopa. Problem prilikom posmatranja predstavlja to što se ova linija nalazi u Lajmanovoj alfa šumi apsorpcionih H linija. U Lajmanovim alfa sistemima sa $N(\text{H}) > 5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ je moguće preciznije merenje zastupljenosti D.

Zastupljenost primordijalnog ^4He se može posmatrati iz rekombinacionih emisionih linija ^4He i H izvan galaktičkih HII (jonizvovanih) regiona sa malom metaličnošću. Zastupljenost ^7Li se može posmatrati u Pop II zvezdama male metaličnosti.

Masena zastupljenost ^4He , kao i zastupljenosti ostalih elemenata u odnosu na vodonik, u zavisnosti od slobodnog parametra η predstavljena je na grafiku 1. Očekivane vrednosti za parametar $\eta_{10} \equiv \eta \cdot 10^{10}$, su približno od 5,8 do 6,6 (95 % nivo poverljivosti) (Fields et al. 2014 [2]). Ove vrednosti ograničavaju $\Omega_b h^2$ približno od 0,021 do 0,025 (Fields et al. 2014 [2]). Koncentracija fotona je poznata, ako se zna da je temperatura CMB-a $T = 2,725 \text{ K}$. Koncentracija fotona se može izračunati pomoću formule:

$$n_\gamma = \frac{2\zeta(3)T^3}{\pi^2} \quad (15)$$

gde je $\zeta(3)$ Rimanova Zeta funkcija. Vrednost Ω_b je definisana kao gustina bariona podeljenu sa kritičnom gustinom.

$$\Omega_b = \frac{\rho_b}{\rho_c} \quad (16)$$

Kritična gustina ρ_c je definisana:

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \quad (17)$$

gde je H_0 današnja vrednost Hablove konstante. Danas barioni su nerelativistički i njihova gustina ρ_b je jednaka proizvodu koncentracije bariona i mase nukleona, gde je masa nukleona $m_N \approx 0,94 \text{ GeV}$. Kombinujući jednačine (14), (15), (16) i (17) dobija se:

$$\Omega_b = 3,67 \cdot 10^7 \cdot \eta \cdot h^{-2} \quad (18)$$

gde je vrednost h definisana kao $H_0 = 100 \cdot h \cdot \frac{\text{km}}{\text{s}} \cdot (\text{Mpc})^{-1}$.

Ukupna gustina u univerzumu je približno jednaka kritičnoj gustini, gde danas dominiraju tamna materija i tamne energije, a barioni doprinose samo oko 5% ukupne gustine. Posmatranja Kosmičkog pozadinskog zračenja pokazala su da je (Planck collaboration et al. (2014) [11]):

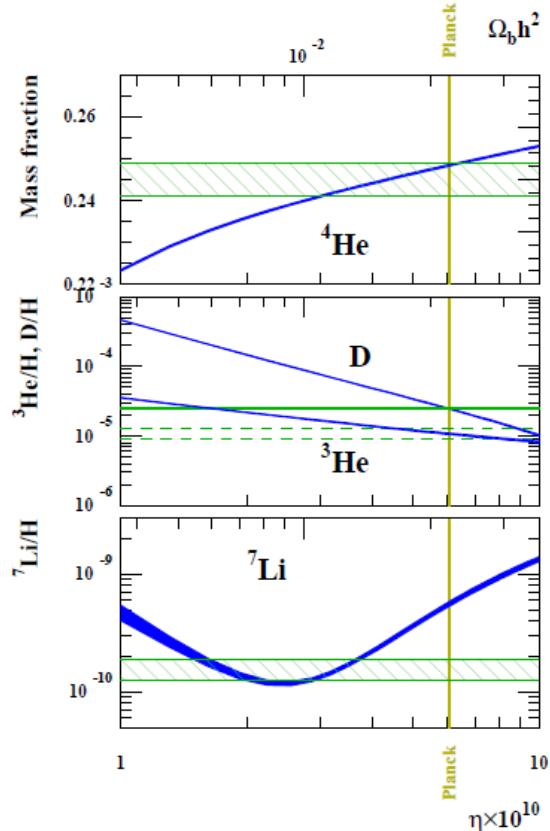
$$\Omega_b \cdot h^2 = 0,02225 \pm 0,00016 \quad (19)$$

Vrednost veličine $\Omega_b \cdot h^2$ se dobija iz analize CMB-a, i upoređuje se sa vrednošću dobijenom iz BBN. Zavisnost η od Ω_b je:

$$\eta = 2,7377 \cdot 10^{-8} \cdot \Omega_b \cdot h^2 \quad (20)$$

2.3 Primordijalne zastupljenosti iz modela nukleosinteze Velikog praska i posmatranja

Na grafiku 1, tzv. Šram grafik, se mogu videti teorijske vrednosti zastupljenosti za ^4He , D, ^3He , ^7Li iz nukleosinteze Velikog praska u zavisnosti od η ili $\Omega_b \cdot h^2$ (plava linija). Žuta linija daje rezultate merenja za η iz Kosmičkog pozadinskog zračenja (Plank misija). Vrednosti iz posmatranja sa nesigurnostima merenja su predstavljena zelenom linijom. Debljina linija predstavlja neodređenost nuklearnih reakcija, koje su teorijski izračunate Monte-Karlovom metodom. Horizontalne oblasti predstavljaju primordijalne zastupljenosti iz posmatranja. Vertikalne pruge predstavljaju gustinu bariona, određenu iz CMB-a.



Grafik 1: Zastupljenosti ^4He , D, ^3He , ^7Li u zavisnosti od parametra η ili $\Omega_b h^2$ (Coc & Vangioni 2017 [5])

Teorijske zastupljenosti iz BBN-e i gustine bariona iz CMB-a, ili zastupljenosti primordijalnih elemenata iz posmatranja su predstavljene u tabeli 1. Može se primetiti da su posmatranja u saglasnosti sa teorijskim predviđanjima, za sve elemente osim ^7Li , čija je teorijski predviđena primordijalna zastupljenost mnogo veća (za faktor $\approx 3,5$). Još nije utvrđen razlog odstupanja.

Element	Zastupljenost elementa iz Coc et al. (2014) [4]	Zastupljenosti elementa iz Coc & Vangioni (2017) [5]	Posmatranja
^4He	$0,248 \pm 0,003$	$0,2484 \pm 0,0002$	$0,2449 \pm 0,0040$
$\frac{D}{H} \cdot 10^{-5}$	$2,64^{+0,08}_{-0,07}$	$2,45 \pm 0,05$	$2,53 \pm 0,04$
$\frac{^3\text{He}}{H} \cdot 10^{-5}$	$1,05 \pm 0,03$	$1,07 \pm 0,03$	$0,9 - 1,3$
$\frac{^7\text{Li}}{H} \cdot 10^{-10}$	$4,94^{+0,40}_{-0,38}$	$5,61 \pm 0,26$	$1,58 \pm 0,31$

Tabela 1: Zastupljenosti primordijalnih elemenata izračunate pomoću nukleosinteze i CMB-a ili iz posmatranja. Zastupljenost ^4He je data kao masena zastupljenost Y_p . Zastupljenosti D, ^3He , ^7Li su date u odnosu na H. [3]

gde je $Y_p = \frac{M_{^4\text{He}}}{M_{tot}}$, $M_{^4\text{He}}$ ukupna masa ^4He , a M_{tot} ukupna masa svih nukleona, a zastupljenosti primordijalnih elemenata u odnosu na vodonik $\frac{D}{H} = \frac{N(D)}{N(H)}$, $\frac{^3\text{He}}{H} = \frac{N(^3\text{He})}{N(H)}$, $\frac{^7\text{Li}}{H} = \frac{N(^7\text{Li})}{N(H)}$. Teorijske zastupljenosti se mogu poboljšati preciznijim vrednostima vremena poluraspada neutrona, kao i preciznijim merenjima efikasnih preseka reakcija: $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$, $D(p, \gamma)^3\text{He}$, $D(d, n)^3\text{He}$, $D(D, p)^3\text{He}$, $^7\text{Be}(n, \alpha)^4\text{He}$. Primordijalne zastupljenosti iz BBN-e i CMB-a i posmatranja su u dobrom slaganju za sve elemente, osim za ^7Li , čija je teorijska zastupljenost značajno veća od posmatranih zastupljenosti, i vrlo su važan dokaz za model Velikog praska. Problem Li još nije rešen.

3 Kosmička evolucija deuterijuma

Deuterijum se samo uništava u zvezdama nakon BBN epohe, i zanimljivo je dalje pratiti kosmičku evoluciju deuterijuma. Već na temperaturi od $T > 10^5$ K deuterijum se uništava u unutrašnjosti zvezda. Veličina y_D je definisana:

$$y_D \equiv 10^6 \cdot \frac{D}{H} \quad (21)$$

Dakle y_D je današnja zastupljenost deuterijuma u odnosu na vodonik, u gasu u ISM-u. Veličina y_p je definisana kao:

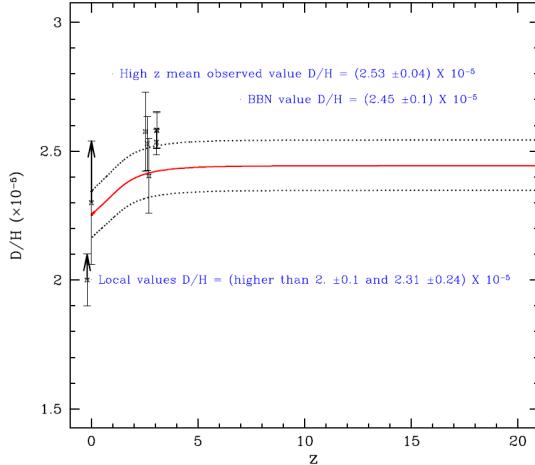
$$y_p \equiv 10^6 \cdot \left(\frac{D}{H} \right)_p \quad (22)$$

gde je $\left(\frac{D}{H} \right)_p$ primordijalna zastupljenost D/H. U radu Prodanovic, Steigman, & Fields (2010) [6] se procenjuje da je donja granica zastupljenosti D u ISM-u, $y_D > (20 \pm 1)$ ppm. Ppm (eng. parts per million) označava milioniti deo jedne celine. Astracioni faktor f_D je odnos zastupljenosti primordijalnog deuterijuma i zastupljenosti deuterijuma u ISM-u. Definisan je kao:

$$f_D = \frac{y_p}{y_D} \quad (23)$$

U radu Prodanovic, Steigman, & Fields (2010) [6] se procenjuje da je gornja granica za astracioni faktor $f_D < 1,26 \pm 0,1$.

U radu Linsky et al. (2006) [7] se mogu videti prostorne varijacije vrednosti y_D u ISM-u. Po ovim autorima onda je donja granica prave zastupljenost $y_D > (23, 1 \pm 2, 4)$ ppm a astracioni faktor $f_D < 1,1$.

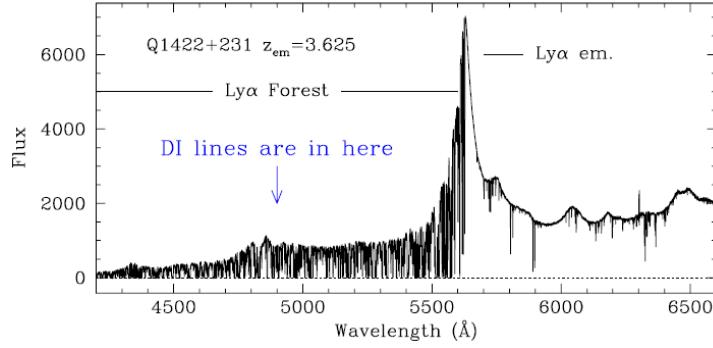


Grafik 2: Evolucija kosmičkog deuterijuma kao funkcija crvenog pomaka (Coc & Vangioni 2017 [5])

Na grafiku 2 crvena linija predstavlja evoluciju D/H nakon BBN-e, a crna tačkasta linija predstavlja gornju i donju granicu od 2σ . Mogu se videti rezultati merenja zastupljenosti D/H u našoj galaksiji, kao i na većim crvenim pomacima (Coc & Vangioni 2017 [5]). Na velikim crvenim pomacima se očekuje da je zastupljenost primordijalna i konstantna. Kada počne D da se troši u zvezdama, dolazi do monotonog opadanja zastupljenosti. Kosmička hemijska evolucija elemenata zavisi od početne funkcije mase zvezda (eng. initial mass function-IMF) i brzine formiranja zvezda (eng. star formation rate-SFR). Različiti modeli hemijske evolucije, predviđaju brzinu kojom strukture nagomilavaju masu. Model prati evoluciju barionske mase u zvezdama, u strukturama iz ISM-a, i IGM-a. Modeli hemijske evolucije opisuju razmene mase među ISM i IGM (formiranje struktura, odliv materije), i razmeni materije između ISM-a i zvezda (formiranje zvezda, zvezdani vetrovi, eksplozije supernove).

3.1 Deuterijum na velikim crvenim pomacima

Misija Kopernikus je omogućila priliv novih informacija o IGM-u. Sredinom 1970-tih, dolazi do povećanja broja detektovanih apsorpcionih linija iz pravaca kvazara. Spektroskopskom analizom ovih linija, mogu se dobiti informacije o gasu u galaksijama i između galaksija. Adams (1976) [8] je prvi primetio da nas ova posmatranja mogu približiti rešavanju primordijalne zastupljenosti deuterijuma. Posmatrani gas je stariji i manje ga je prerađeno u zvezdama, u poređenju sa gasom iz ISM-a. Sredinom 1970-tih je bilo teško detektovati D u apsorpcionim linijama u pravcima kvazara, na velikim



Slika 3: Primer Lajmanove alfa šume (Pettini 2006 [9])

crvenim pomacima. Precizna merenja nisu bila moguća zbog velike gustine H apsorpcionih linija u tzv. Lajmanovoj alfa šumi (primer na slici 3).

Na slici 3 se vidi spektar visoke rezolucije tipičnog kvazar objekta na visokim crvenim pomećima. Na crvenim pomacima $z > 2$ postaje vrlo teško razlikovati DI apsorpcione linije od stotinak apsorpcionih linija u Lajmanovoj alfa šumi. Prva merenja su bila način da se posmatranjem D na velikim z , uz predpostavku da je to njegova primordijalna zastupljenost, odredi gustina bariona. Zato je deuterijum nazvan kosmičkim bariometrom. Međutim, danas gustinu bariona možemo preciznije odrediti iz posmatrana CMB-a, a merenja D na velikim crvenim pomacima nam služe za kao test modela BBN-e.

3.2 Izmerene vrednosti D/H u pravcima kvazara na velikim crvenim pomacima

Izmerene vrednosti D/H u gasu u pravcima kvazara na velikim crvenim pomacima su predstavljeni u tabeli 2. Podaci su iz rada Zavarygin et al. (2018) [10].

Kvazar	z_{abs}	y_p (ppm)	$\log N(\text{HI})$	D(X)	X
HS 0105 + 1619	2,536	$25,8^{+1,6}_{-1,5}$	$19,426 \pm 0,005$	-1,77	O
J0407-4410	2,621	28^{+8}_{-6}	$20,45 \pm 0,10$	-1,99	O
Q0913+072	2,618	$25,3^{+1,1}_{-1,0}$	$20,312 \pm 0,008$	-2,40	O
Q1009+2956	2,504	$24,8^{+4,1}_{-3,5}$	$17,362 \pm 0,005$	-2,5	Si
J1134+5742	3,411	20^{+7}_{-5}	$17,95 \pm 0,05$	<-4,2	Si
Q1243+3047	2,526	$23,9 \pm 0,8$	$19,761 \pm 0,026$	-2,77	O
J1337+3152	3,168	12^{+5}_{-3}	$20,41 \pm 0,15$	-2,68	Si
SDSS J1358+0349	2,853	$26,2 \pm 0,7$	$20,524 \pm 0,006$	-2,80	O
J1358+6522	3,067	$25,8 \pm 0,7$	$20,495 \pm 0,008$	-2,33	O
J1419+0829	3,050	$25,1 \pm 0,5$	$20,392 \pm 0,003$	-1,92	O
J1444+2919	2,437	$19,7^{+3,3}_{-2,8}$	$19,983 \pm 0,010$	-2,04	O
J1558-0031	2,702	$24^{+1,5}_{-1,4}$	$20,75 \pm 0,03$	-1,55	O
Q1937-1009	3,256	$24,5^{+3}_{-2,7}$	$18,08 \pm 0,03$	-1,87	O
	3,572	$26,2 \pm 0,5$	$17,925 \pm 0,006$	-2,26	O
Q2206 - 199	2,076	$16,5 \pm 3,5$	$20,436 \pm 0,008$	-2,04	O

Tabela 2: Zastupljenost D u pravcima kvazara na velikim crvenim pomacima Zavarygin et al. (2018) [10]

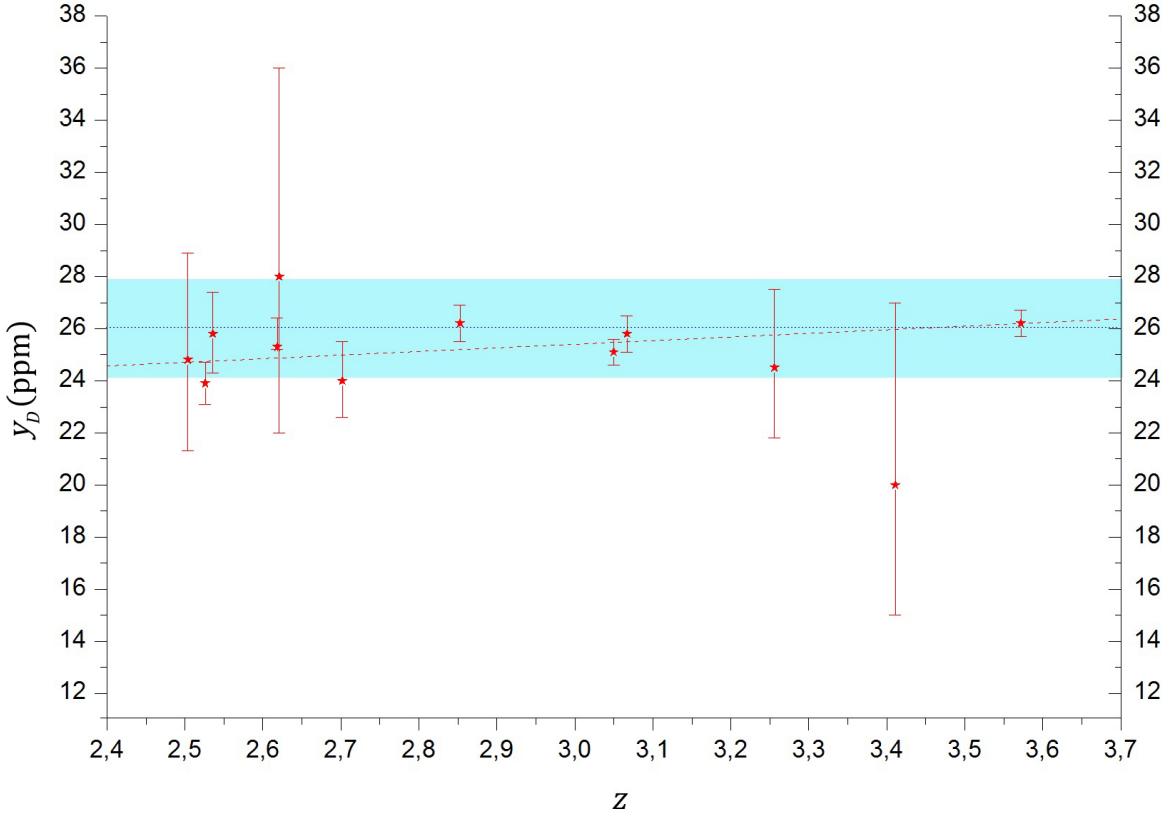
U tabeli 2 vrednost trošenje elementa X, D(X) i definisana je kao:

$$D(X) = \log \frac{(X/H)}{(X/H)_\odot} \quad (24)$$

gde je izmerena (X/H) zastupljenost elementa X u gasu, a $(X/H)_\odot$ zastupljenost elementa X u Suncu.

U tabeli 2 se mogu videti rezultati merenja zastupljenosti deuterijuma na velikim crvenim pomacima z . Ova zavisnost je prikazana na grafiku 4. Isprekidana plava linija predstavlja teorijsku vrednost iz rada Planck collaboration et al. (2014) [11]. Svetlo plava linija predstavlja greške merenja. Teorijska vrednost zastupljenosti primordijalnog D je označena kao $(y_D)_{\text{teo}}$, i iz rada Planck collaboration et al. (2014) [11] iznosi:

$$(y_D)_{\text{teo}} = (26,06^{+1,81}_{-1,84}) \text{ ppm} \quad (25)$$



Grafik 4: Zastupljenost D na velikim crvenim pomacima z

Mesto	k	σ_k	n	σ_n	R ²
Kvazari	1,389	0,719	21,234	2,215	0,323

Tabela 3: Linearna regresija zastupljenosti D u zavisnosti od crvenog pomaka

Linearna regresija je predstavljena funkcijom:

$$y = (k \pm \sigma_k) \cdot x + (n \pm \sigma_n) \quad (26)$$

gde je k koeficijent pravca, σ_k greška koeficijenta pravca, n je vrednost gde y funkcija preseca x osu, a σ_n greška n . Koeficijent determinacije R^2 takođe može pomoći u određivanju linearnog modela:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (27)$$

gde je N broj merenja, y_i su izmerena veličina. Pojedinačne vrednosti veličina su indeksovane sa i , a \bar{y} je srednja vrednost veličine y_i definisana:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N y_i \quad (28)$$

Veličina \hat{y}_i vrednost predvidena linearnom regresijom. Koeficijent determinacije R^2 predstavlja koliko odstupa linearna regresija od izmerenih vrednosti. Ima vrednosti između 0 i 1, i što je bliža jedinici, linearna regresija bolje odgovara eksperimentalnim merenjima. Može se desiti da R^2 ima negativnu vrednost, što znači da linearni model daje lošiji fit od horizontalne linije.

Linearna regresija je rađena pomoću metode najmanjeg kvadrata, u programu OriginPro 8. U tabeli 3 se mogu videti vrednosti parametara linearne regresije zastupljenosti D na velikim crvenim pomacima. Vidi se monotono opadanje prema $z=0$, što predstavlja današnju epohu. Iz linearne regresije očekuje se da je današnja zastupljenost ($y_D = 21,23 \pm 1,12$) ppm. Regresija dosta odstupa od izmerenih vrednosti što se može videti iz $R^2 = 0,323$. Na grafiku 4 su izostavljene tri vrednosti iz tabele 2, jer mnogo odstupaju od ostalih merenja. I linearna regresija zajedno sa te tri tačke ne pokazuje monotono opadanje, kao što

se očekuje. Kada se izbace tri problematične tačke, linearna regresija daje monotono opadanje. Onda otežana srednja vrednost zastupljenosti D za kvazare y_p iznosi:

$$y_p = (25, 46 \pm 0, 24) \text{ ppm} \quad (29)$$

U radu Planck Collaboration (2016) [12] izračunate vrednosti zastupljenost primordijalnog D i $\Omega_b \cdot h^2$ su:

$$(y_D)_{\text{teo}} = \left(26, 06^{+(0,51)+1,3}_{-(0,54)-1,3} \right) \text{ ppm} \quad (30)$$

$$\Omega_b \cdot h^2 = 0, 02229^{+0,00029}_{-0,00027} \quad (31)$$

U jednačini (30) greške u zgradama predstavljaju greške iz $\Omega_b \cdot h^2$ (CMB-a), a pored su greške teoretske nesigurnosti iz BBN-e. Merenja iz CMB-a su najpreciznija moguća merenja za gustinu bariona. Dalje se mogu samo teoretski poboljšavati nuklearni efikasni preseci iz BBN-e. Ako se uporede vrednosti primordijalnog D iz ovog rada (29) i teorijsku vrednost primordijalnog D (30) može se videti da su one u dobrom slaganju.

Galaktička hemijska evolucija deuterijuma je takva da što više gasa prođe kroz zvezdu, zastupljenost D u odnosu na H opada. Jednostavan izraz za hemijsku evoluciju D se može napisati na sledeći način (Pettini 2006 [9]):

$$\frac{y_D}{y_p} = e^{-Z(1/\alpha-1)} \quad (32)$$

gde je Z metaličnost, i α udeo mase, koji je zaključan u dugoživećim zvezdama. U astronomiji se metalima smatraju svi hemijski elementi, koji su teži od ${}^4\text{He}$. Metaličnost Z je zastupljenost svih elemenata težih od ${}^4\text{He}$.

$$Z = \sum_{i > {}^4\text{He}} \frac{M_i}{M_{tot}} \quad (33)$$

Dakle, metaličnost Z je suma svih masenih udela elemenata težih od ${}^4\text{He}$. Jednačina (32) važi za jednostavan slučaj hemijske evolucije, tzv. model „zatvorene kutije“. Realističniji modeli moraju uzeti u obzir priliv i odliv materijala. Vrlo teško je izračunati koliko ostaje zaključanog materijala (takođe i deuterijuma) u zvezdama, i ta veličina je predstavljena koeficijentom (α). Može se jedino teorijski odrediti ako poznajemo raspodelu zvezda po masama (IMF), i uz proračune odrediti koji udeo od početne mase zvezda vraća u međuzvezdani prostor. Koliko se očekuje da iznosi astracioni faktor f_D ? Stepen astracije D u Mlečnom putu može biti između 20% i 90%, u zavisnosti vrednosti zaključane materije α (Pettini 2006 [9]).

Zastupljenosti deuterijuma u međuzvezdanoj sredini se može meriti na različite načine: radio merenjima na 92 cm u apspcionom spektru, posmatranjem deuterizovanih molekula, pomoću emisionog spektra u Balmerovoј seriji, i absorpcionom spektru u Lajmanovoј seriji. Od navedenih najpreciznija merenja su posmatranje Lajmanovih absorpcionih linija, u dalekoj ultraljubičastojoj oblasti, gde se posmatraju direktno vodonik i deuterijum u njihovoј atomskoj formi. Ovakvim posmatranjem se može odrediti njihova linijska gustina.

Zašto je bitno da se mere današnje zastupljenost D? Što ima više merenja današnjih zastupljenosti D bolje će se razumeti galaktička hemijska evolucija i koliko je ona u skladu sa primordijalnom. Poznavanje y_D je potrebno da bi se odredio kompletan model, koji će povezati vrednosti y_D , y_p i $(\text{D}/\text{H})_{\text{pre}\odot}^3$ sa hemijskom evolucijskim modelom, koji je u skladu sa ostalim posmatranjima. Npr. kao što su zastupljenosti ostalih primordijalnih elemenata iz BBN-e i CMB-a.

4 Varijacije zastupljenosti deuterijuma u međuzvezdanoj sredini

Današnja zastopljenost y_D se meri u međuzvezdanoj sredini. Odnos D/H za međuzvezdanu sredinu se može odrediti pomoću daleke ultraljubičaste apsorbciione linije, i ovakva merenja su rađena još od 1970-tih godina. Zastupljenost D/H u međuzvezdanom gasu varira od nekoliko stotina pc lokalno u ISM-u, sa vrednostima od $y_D \approx 7$ ppm za nekoliko pravaca sa najmanjim vrednostima y_D , do $y_D \approx 22$ ppm za nekoliko pravaca sa najvećim vrednostima y_D (Draine 2004 [18]). Niže vrednosti y_D se možda mogu objasniti trošenjem D na prašini. PAH⁴ molekuli mogu da zahvate D iz gasne faze. Interakcijom deuterijuma u gasnoj fazi sa prašinom, može doći do deuterizacije karbonatnih materijala, odnosno vezanjem D za karbonatne materijale. Uništenjem prašine se D oslobađa iz prašine. Tada se gasna faza obogaćuje D, i njegova zastupljenost se povećava. Uništenjem prašine, najčešće udarnim talasima, takođe dolazi do obogaćavanja gasne faze drugim materijalima kao što su Mg, Si, Ti, O i Fe, ali ne u istoj meri

³(D/H)_{pre}○ je zastupljenost u protosolarnom oblaku, kada je naša galaksija bila 2/3 stara u odnosu na današnju vrednost
⁴eng. Polycyclic aromatic hydrocarbons-PAH

u poređenju sa D. Varijacije zastupljenosti Si/H ili Fe/H, za različite linije posmatranja, su posledica vezivanja Si i Fe za prašinu. Kasnije je pokazano da se deuterijum može vezati za prašinu, konkretno za PAH molekule. Tako D prelazi iz gasovite faze u čvrstu fazu. U radu Draine (2004) [18] se tvrdi da karbonatna međuzvezdana prašina može da prihvati dovoljno atoma D, u poređenju sa H, da se zastupljenost D/H smanji u gasovitoj fazi. Na nekim mestima dolazi do vraćanja atoma D iz zrna prašne u gas. Vezivanjem D u prašini, sledi:

$$y_D < (y_D)_{\text{ukupno}} \quad (34)$$

gde je $(y_D)_{\text{ukupno}}$ ukupna zastupljenost D zajedno u gasu i prašini. Pod ovom pretpostavkom, za različite linije posmatranja, varijacije y_D u gasovitoj fazi zavise od toga koliko se D vezalo za prašinu.

Zastupljenost D pokazuju neočekivano velike prostorne varijacije. Ne treba isključiti mogućnost da su varijacije zastupljenosti D posledica sistematskih grešaka merenja, ali najnovija merenja pokazuju da to najverovatnije nije slučaj. U radu Linsky et al. 2006 [7] se smatra da su najveće zastupljenosti D/H prave zastupljenosti D u ISM-u, zbog toga što se deuterijum vezuje za prašinu, te su najveće vrednosti D najmanje potrošene. Velike vrednosti y_D predstavljaju problem za astraciju. Za velike zastupljenosti D, astracioni faktor je manji od $\approx 1,5$. Ovo je vrednost koju predviđaju modeli hemijske evolucije (Hebrard 2006 [14]). Ovo dovodi u problem modele hemijske evolucije elemenata. Rešenje problema zastupljenosti D će doneti bolje razumevanje međuzvezdanog sredine, modela galaktičke hemijske evolucije, i barionske gustine u univerzumu.

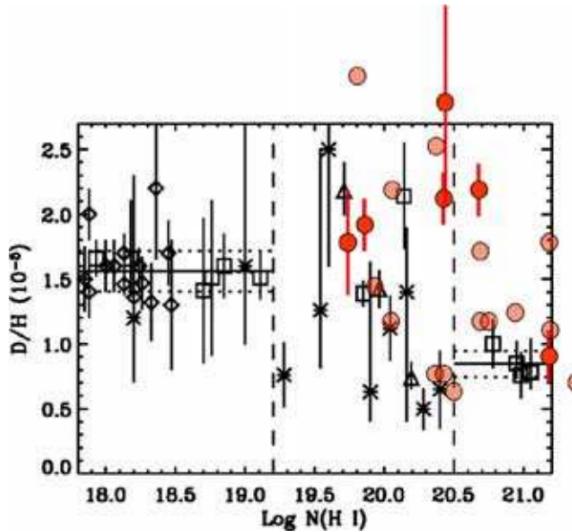
U Lokalnom mehuru (eng. Local bubble-LB) y_D ima vrednosti u opsegu od 13 ppm do 15 ppm. Lokalni mehur je prostor male gustine koji ima radius približan 100 pc, u kojem se nalazi i Sunčev sistem. Lokalni mehur se prostire do $\log N(\text{HI})_{\text{LB}} = 19,20$ jer na toj vrednosti y_D počinje da varira (Linsky et al. 2006 [7]). Na udaljenostima većim od 100 pc, y_D pokazuje drugačije vrednosti nego što su lokalne vrednosti, približno 22 ppm. Ako se deuterijum troši u prašini, onda je prava zastupljenost $y_D = (23 \pm 0,44)$ ppm (Hebrard 2006 [14]). Jedan način da se izračuna y_D , je preko zastupljenosti deuterijuma u odnosu na kiseonik u ISM-u. Veličina D/O je zastupljenost deuterijuma u odnosu na kiseonik u ISM-u. Veličina D/O pokazuje manju varijaciju od D/H, i daju vrednost $y_D = (7 \pm 2)$ ppm (Hebrard 2006 [14]).

U radovima Wood et al. (2004) [13] i Linsky et al. (2006) [7] su sakupljena sva merenja za linije posmatranja za zvezde na udaljenosti od 3,2 do 2200 pc od Sunca. U tabeli 5 su predstavljeni rezultati iz misija FUSE, Kopernikus, IMAPS, GHRS i STIS na HST. Veličina y_D zavisi od linijskih gustina N(HI) i N(DI). Za linijske gustine izvan Lokalnog mehura (LB) treba uraditi korekcije za N(HI) i N(DI). Razlog ove korekcije je da bi se smanjio uticaj Lokalnog mehura na merenja linijskih gustina N(HI) i N(DI) izvan LB, i time bi se izdvojile linijske gustine za D i H samo izvan LB. Od linijskih gustina u y_D će se oduzeti vrednosti linijskih gustina $N(\text{HI})_{\text{LB}}$ i $N(\text{DI})_{\text{LB}}$ iz LB. Linijske gustine unutar Lokalnog mehura su $N(\text{HI})_{\text{LB}} = 10^{19,20} \text{ cm}^{-2}$ i $N(\text{DI})_{\text{LB}} = 10^{14,39} \text{ cm}^{-2}$ (Linsky et al. 2006 [7]). Nova korigovana veličina za zastupljenost D u gasu, samo izvan LB, se označava kao $y_{D(\text{gas-LB})}$.

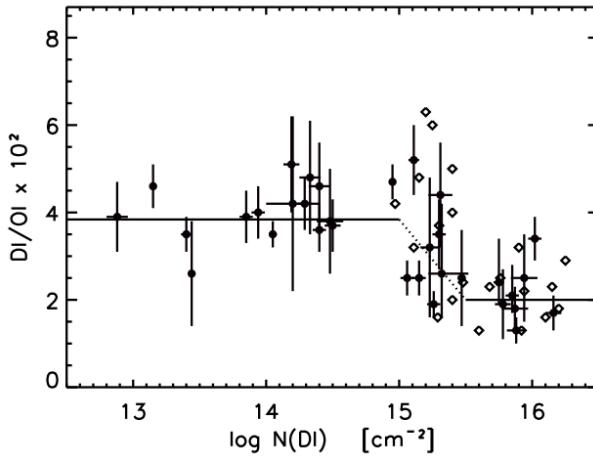
$$y_{D(\text{gas-LB})} \equiv 10^{-6} \cdot \left(\frac{D}{H} \right)_{\text{gas-LB}} \quad (35)$$

gde je $\left(\frac{D}{H} \right)_{\text{gas-LB}}$ je korigovana zastupljenost D u gasu, izvan Lokalnog mehura.

Ako se deuterijum u dovoljnoj meri troši na prašini, prave vrednosti y_D se mogu izmeriti samo u međuzvezdanim oblacima u kojima se deuterijum vraća iz prašine u gasovitu fazu. Vraćanje D u gasovitu fazu može da dođe nakon prolaska udarnih talasa kroz sredinu. Manje vrednosti y_D su izmerene za pravce u kojima međuzvezdani oblici nisu doživeli udarni talas u bliskom vremenskom intervalu. U tim oblacima deuterijum ostaje vezan u prašini. U Lokalnom mehuru y_D ima homogene vrednosti.



Grafik 5: Zavisnost D/H od linijske gustine logN(HI) (Hebrard 2006 [14])



Grafik 6: Zavisnost D/O od linijske gustine logN(DI) (Hebrard 2006 [14])

Drugačiji način na koji se može izračunati zastupljenost D/H je pomoću zastupljenosti D/O i O/H u gasu u ISM-u (Hebrard 2006 [14]).

$$y_D = \left(\frac{D}{O} \right) \cdot \left(\frac{O}{H} \right) \text{ ppm} \quad (36)$$

gde je D/O zastupljenost deuterijuma u odnosu na kiseonik, a D/O zastupljenost kiseonika u odnosu na vodonik u ISM-u.

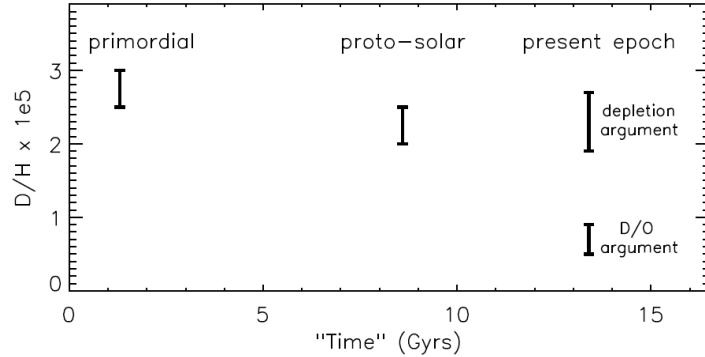
Na graficima 5 i 6 iz rada Hébrard 2006 [14] su predstavljene zavisnosti y_D i D/O od linijske gustine HI i DI. Na grafiku 6 se može videti da D/O u zavisnosti od $\log N(DI)$ pokazuje dva platoa, i manje varijacije u odnosu na y_D na grafiku 5.

Varijacije za D/O zahtevaju drugačije objašnjenje od trošenja D na prašini. Vrednosti (D/O) na udaljenostima većim od $\log N(DI) \geq 15,5$ su relativno homogene i iznose $D/O \sim (2,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$ (Hebrard 2006 [14]). Međutim, ove vrednosti su dva puta manje od vrednosti $D/O = (3,8 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$ koje su izmerene u regionima $\log N(DI) \leq 15,5$ (Hebrard 2006 [14]). Središnji region izgleda više kao prelaz između ove dve vrednosti.

Iz merenja zastupljenosti D/O, dobija se da je $y_D = (7 \pm 2)$ ppm (Hébrard (2006) [14]). Ova procena vrednosti D/H je razlikuje od eksperimentalnih merenja.

Trošenja D na prašini i izračunata vrednost y_D pomoću D/O, daju dve različite vrednosti za današnju zastupljenost deuterijuma, $y_D = (23 \pm 4)$ ppm i $y_D = (7 \pm 2)$ ppm (Hébrard (2006) [14]). Kao što se vidi na grafiku 7, iz velikih vrednosti za y_D sledi da je malo deuterijuma uništeno putem astracije. Male vrednosti y_D ukazuju na veći faktor trošenja za astraciju, posebno u poslednjim fazama evolucije univerzuma. Obe vrednosti, kombinovane sa vrednostima y_p i $(D/H)_{\text{pre}\odot}$, predstavljaju probleme današnjim modelima hemijske evolucije deuterijuma.

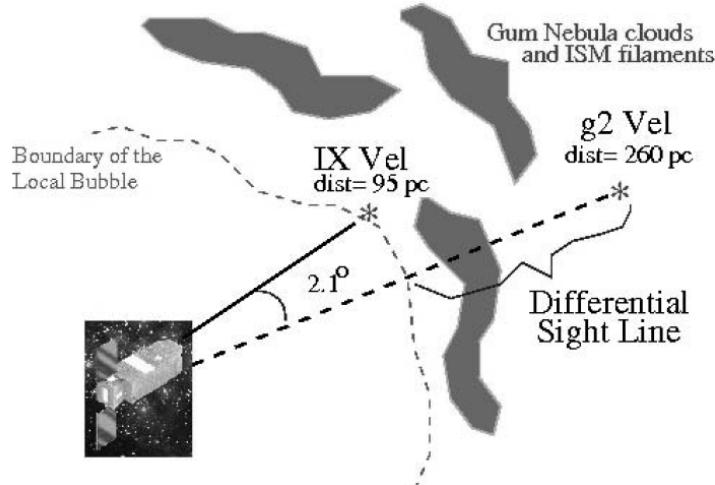
Na grafiku 7 se vidi neusaglašenost između dve D/H vrednosti. U radu Oliveira et al. (2005) [15] se



Grafik 7: Deuterijum kao pokazatelj galaktičke evolucije [14]

prepostavlja da su konstantne vrednosti O/H pokazatelj da varijacije y_D nisu posledica priliva gasa sa malom metaličnošću. Veliki prлив гаса би допринео смањењу заступљености OI у линијама посматрана. Време потребно да се гас измеши је 350 Myr (De Avillez & Mac Low 2002 [16]). Велики прлив гаса богатог деутерјумом, који има малу заступљеност метала би смањио вредности O/H за фактор већи од 3. Толико мале вредности O/H нису забележене. Констатне вредности O/H у poređenju sa varijacijama u y_D ne idu u prilog локалном прливу гаса, као објашњењу варијација у заступљености D.

Kao пример за просторне варијације y_D може се узети γ^2 Velorum. Налази на удаљености ~ 260 pc. IMAPS (eng. interstellar Medium Absorption Profile Spectrograph-IMAPS) мерења ове звезде покazuју велику вредност од $y_D = 21,8$ ppm. Мета IX Velorumу је удаљена само ~ 95 pc и само $2,1^\circ$ угаоне раздалјине од γ^2 Velorum. Линије у правцу IX Vel су конзистентне са вредностима у Локалном интерстеларном гасу, и има вредност $y_D = 12,3$ ppm. Вредности заступљености y_D , за два блиска правца (за две звезде) се попрilično разликују. Ово се може применити и за друге линије посматрана изван Локалног међу.



Slika 8: Шематски приказ меренja заступљености D/H u pravcu γ^2 Velorum (Blair et al. 2006 [17])

5 Veza između D u prašini i D/H u gasu

У раду Keller (2000) [19] је извршено мерење заступљености D u interplanetarnim česticama prašine, које садре аморфне карбонатне материјале. Узорак L2009*E2 који је захваћен у вишим деловима атмосфере Земље, потиче из ISM-a, и има врло високе заступљености D/H u različitim vrstama molekula. За цео узорак заступљеност је $(D/H) = 220 \cdot 10^{-6}$ (Keller (2000) [19]), осим за један део где је $(D/H) = 1900 \cdot 10^{-6}$ (Keller (2000) [19]). Ово је директан доказ да долazi до везивања D за prašinu. Али чак и ове вредности су за 70 пута мање од потребне вредности $\approx 10^4$ да би се objasnije варијације заступљености D u ISM-u. Високе вредности D u prašini су измерене само за аморфне organske karbonate u ovim uzorcima (Keller (2000) [19]) i Peeters (2004) [20].

У раду Peeters (2004) [20] se проценjuju da je u PAH molekulima $D/H = 0,17 \pm 0,03$ za Orion bar i $D/H = 0,36 \pm 0,08$ за M17. Заступљеност D/H u PAH molekulima je 10^4 већа од заступљеност D/H u гасу. Zrna prašine moraju biti na niskoj temperaturi, da bi дошло до deuterizације molekula. Iz spektra

IR zračenja za talasne dužine veće od $80 \mu\text{m}$, očekuje se da je temperatura prašine približno 18 K (Draine 2003 [21]).

Koliko je vremena potrebno da se D veže za PAH molekule? Ako je okolina hladna neutralna sredina u radu Draine (2004) [18] se procenjuje da vreme potrebno da se D sudari sa PAH jonima približno 2 Myr. Trošenje za faktor e se može dostići za najmenje približno 2 Myr. Za difuznije regije, vreme deuterizacije će biti još veće. Za topnu neutralnu sredinu teorijski proračuni predviđaju trošenje D za ≈ 50 Myr. Trošenje D dominira u hladnjim, gušćim regionima, gde je frekvencija sudara veća.

Moguće je da zrna prašine uklanjaju D iz gasovite faze, u količinama koje su dovoljne da opravdaju posmatrane varijacije u gasu za D/H, za različite pravce posmatranja. Prilikom sudara D sa PAH kationima, i sudarima D⁺ sa PAH molekulima, očekuje se da se D ugradi u PAH molekule. Stopa ovih sudara je dovoljna da troši D iz gasne faze na vremenskoj skali od ≈ 2 Myr u hladnim HI oblacima. Uništenjem zrna prašine se D vraća u gasnu fazu, zajedno sa drugim refraktornim elementima, koji su takođe zarobljeni u zrnima prašine. Potrebno je naći vezu D/H u gasu i zastupljenosti drugih elemenata u gasu, kao što su Mg, Si, Ca, Ti, Fe, ili drugih elemenata, koji se troše na prašini.

U radu Linsky et al. [7] se tvrdi da je današnja prava vrednost y_D unutar 1 kpc od Sunca iznosi $y_D = (23,4 \pm 1,4)$ ppm. FUSE posmatranja su značano povećala broj linija sa preciznim merenjima D/H. Unutar Lokalnog mehura, zastupljenost D/H je homogena i ima vrednost $y_D = (15,6 \pm 0,4)$ ppm. Izvan Lokalnog mehura, merenja ukazuju na to da je zastupljenost $y_D = (8,7 \pm 0,8)$ ppm. Širok raspon izmerenih zastupljenosti D/H, nisu posledica greške merenja, što različiti instrumenti, autori i analize potvrđuju. Za modele prašine najbolja procena bi trebalo da je najveća izmerena vrednost za y_D , jer ove linije posmatranja bi trebale da imaju najmanje trošenje D.

Merjenja zastupljenosti D u našoj galasiji izvan Lokalnog mehura, daju određenja ograničenja na modele hemijske evolucije, tako i deuterijuma. Za različite uslove, ovi modeli daju astracioni faktor deuterijuma. Neki modeli hemijske evolucije (npr. Romano et al. 2006 [22]) računaju sa uništenjem deuterijuma u zvezdama i sa prlivom gase iz obližnjih galaksija, ili intergalaktičkog medijuma koji sadrži primordijalne vrednosti D/H.

U radu Pettini et al. (2008) [23] analizom sedam apsorpcionih linija u pravcima kvazara dobija se da je primordijalna zastupljenost $y_p = (28,2^{+2,0}_{-1,8})$ ppm. Najnovija teorijska vrednost primordijalne zastupljenosti D iz Plank misije je predstavljena u radu Planck et al. (2016) [12] i iznosi $(y_p)_{\text{teo}} = (26,06^{+1,81}_{-1,84})$ ppm, što posmatranja primordijalnog D dovodi u tenziju sa teorijskim predviđanjima.

Posmatranja	y_D (ppm)	$100 \Omega_{b,0} h^2$	f_D	Udeo
ISM	$\geq 22,9 \pm 0,5$	$\leq 2,411 \pm 0,33$	$\approx 1,5$	$\approx 66\%$
Kvazari	$28,2^{+2}_{-1,8}$	$2,13 \pm 0,09$	$\leq 1,23 \pm 0,09$	$\geq 81 \pm 7\%$
WMAP	$25,2 \pm 1,1$	$2,273 \pm 0,062$	$\leq 1,10 \pm 0,07$	$\geq 91 \pm 6\%$

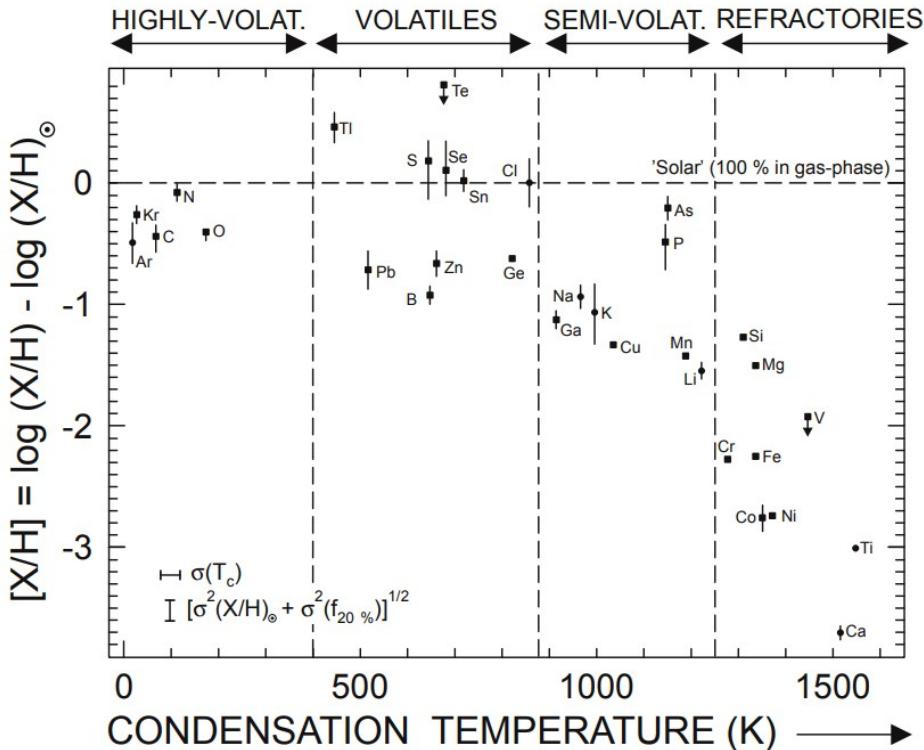
Tabela 4: Zastupljenost D, $\Omega_{b,0} h^2$, astracioni faktor i udeo utrošenog deuterijuma iz različitih posmatranja

U tabeli 4 posmatranja u ISM su za 7 linija sa najvećim vrednostima, za kvazare iz 7 linija posmatranja, i WMAP misije koja je trajala 5 god. Vrednosti u tabeli 4 za kvazare i WMAP predstavljaju problem za Galaktičke hemijske modele. Model u radu Chiappini (2002) [24] predviđa $f_D \approx 1,5$ u okolini Sunca. Noviji modeli Romano et al. 2006 [22] mogu da očekuju i niže vrednosti astracije $f_D \approx 1,3$ u okolini Sunca. Dakle, iz različitih izvora dobijamo da vrednosti y_D nisu konzistentne, kao što se vidi u tabeli 4. Jedno od mogućih rešenja (Prodanovic & Fields (2008) [25]) je da prliv primordijalnog gase od $1\text{M}_\odot\text{yr}^{-1}$ može da objasni veliki procenat neprocesovanog deuterijuma, odnosno velike zastupljenosti deuterijuma.

6 Ispitivanje veze između zastupljenosti D i refraktornih elemenata

Jedan od načina da se pokaže da li dolazi do trošenje D u dovoljnoj meri prašini je da se nađe zavisnost između trošenja D na prašini i trošenja refraktornih elemenata u prašini, tj. da se ispita da li postoji korelacija između zastupljenosti D u gasu i refraktornih elemenata u gasu. U radu Frisch et al. (1999) [26] tvrde da zastupljenost Si, Mg i Fe u Lokalnom međuzvezdanom oblaku su u slaganju sa trošenjem u prašini za udarne talase brzine 100 km/s. Sudari u prašini, doprinose malo oslobađanju refraktornih elemenata i njihovog vraćanja u gas. Pretpostavlja se da će se iz prašine prvo osloboditi D pa tek onda Fe. Ukupna zastupljenost jednak je zastupljenosti zajedno u gasu i prašini. Gde y_D ima veće vrednosti udarni talasi su samo delimično ili u potpunosti vratili D u gasnu fazu. Radio posmatranja HI linije na 21 cm daju najbolje podatke za difuzne HI oblake u ISM-u, na temperaturi ≈ 80 K.

Na grafiku 9 se može videti trošenje hemijskih elemenata na prašini u zavisnosti od kondezacione temperature u gasnoj fazi u ISM-u, u pravcu linije posmatranja ζ Oph (Meyer, Drury & Ellison 1997 [27]). Horizontalna isprekidana linija predstavlja solarnu zastupljenost. Što je vrednost trošenja elementa X ($D(X) = [X/H]$) bliža solarnoj, to se manje hemijskog elementa X vezalo za prašinu. Može se videti trend da se refraktorni metali više troše. Najviše se vezuje Ti, onda Fe, Si a najmanje O. Razlika između trošenja Fe i trošenja Si je skoro 1 red veličine. Razlika između trošenja Si u odnosu na O je oko 0,7 redova veličine.



Grafik 9: Trošenje hemijskih elemenata u ISM-u u gasnoj fazi prema liniji posmatranja ζ Oph (Meyer, Drury & Ellison 1997 [27])

Linije posmatranja, koje prolaze izvan Lokalnog mehura, mogu da prolaze kroz više različitih oblasti. U nekim oblastima je gas bio podložan udarnim talasima, a neke oblasti nisu bile pod uticajem udarnih talasa. Za regione sa velikom vrednošću y_D se prepostavlja da su nedavno prošli kroz udarni talas. Onda prava zastupljenost odgovara najvećim zastupljenostima. Za linije posmatranja sa nižim vrednostima y_D očekuje se da ove oblasti nisu bili pod uticajem udarnih talasa duži vremenski period. Najveće vrednosti se nalaze u regionima izvan Lokalnog mehura, $(y_D)_{\text{gas-LB}}$ iznad 21 ppm, prema γ^2 Vel, Lan 23, WD 1034+001, Feige 110, i LSE 44. Ako linije posmatranja ne prolaze kroz difuzni gas, očekuju se vrednosti iste kao u blizini Sunca. U gasu koji je delimično ionizovan, nije prošlo dovoljno vremena da se D potroši na prašini.

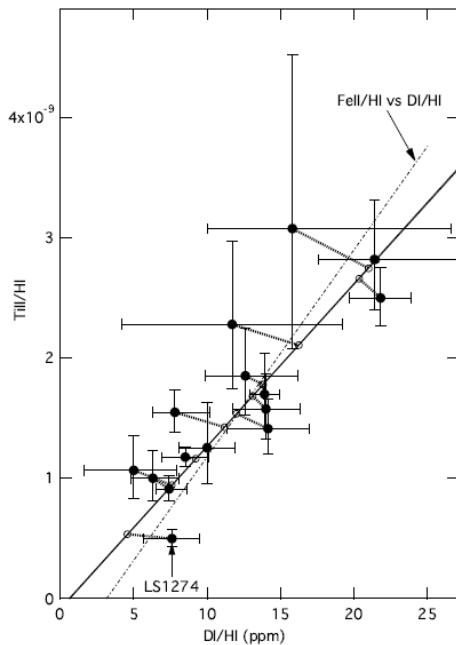
Iz jednačine (24) sledi da je trošenje Fe, $D(\text{Fe})$ je definisano kao:

$$D(\text{Fe}) = \log[(\text{Fe}/\text{H})/(\text{Fe}/\text{H})_\odot] \quad (37)$$

gde je (Fe/H) izmerena zastupljenost Fe u odnosu na H, u gasu u ISM-u a $(\text{Fe}/\text{H})_\odot$ solarna zastupljenost Fe. $D(\text{Fe})$ tipično varira od -1,2 u toplim difuznim oblacima do -2,2, a u hladnim difuznim oblacima (Jenkins 2004 [28]). Malo trošenje Fe znači da je prašina uništena, ili da je ima malo. Uništenjem prašine se D i Fe oslobođaju iz prašine. Velike negativne vrednosti $D(\text{Fe})$ bi trebalo da odgovaraju malim vrednostima za y_D za model trošenja D na prašini. Ako Fe nije vezan za prašinu, onda se očekuju vrednost približno jednaka solarnim vrednostima, $\log(\text{Fe}/\text{H})_\odot = -4,55 \pm 0,05$ (Asplund et al. 2005 [29]). Za Fe većina linija u Lokalnom mehuru ima vrednosti trošenja $-0,7 > D(\text{Fe}) > -1,3$, što su tipične vrednosti za tople difuzne oblake. Silicijum je još jedan refraktorni metal. Solarna vrednost za Si je $\log(\text{Si}/\text{H})_\odot = -4,49 \pm 0,04$ (Asplund et al. 2005 [29]).

U radu Lallement et al. (2008) [30] je pokazano da postoji vrlo dobra pozitivna korelacije između ionizovanog TiII/HI i DI/HI. Titanijum je refraktorni metal, i pokazuje jaku korelaciju sa D, što daje nadu i za ostale refraktorne metale. Ova zavisnost se može videti na grafiku 10, gde nije uzeta u obzir jedno merenje μCol . Takođe, na istoj grafiku se vidi i zavisnost FeI/HI u odnosu na DI/HI, i može se

zaključiti da TiII i FeI imaju sličnu korelaciju. Spearmanov test daje pozitivnu korelaciju sa sigurnošću od 98 %. Vrednosti TiII i FeII takođe pokazuju pozitivnu korelaciju sa DI/OI.



Grafik 10: Zavisnost jonizovanog titanijuma u odnosu na DI/HI (Lallement et al. (2008) [30])

Za vrednosti trošenja Ti i Fe u zavisnosti od DI/HI i DI/OI, oba metala ukazuju na pozitivnu korelaciju u odnosu na DI/HI i DI/OI. Ove korelacije nisu posledica sistematskih grešaka, i sledi da postoji zavisnost između trošenja metala na prašini i DI/OI u ISM-u. Gradijenti TiII je sličan ali manji u poređenju sa gradijentom FeII. Ovo je neočekivano, jer je kondenzaciona temperatura za TiII veća od FeII, time bi se očekivalo da TiII ima veće varijacije. U radu Lallement et al. (2008) [30] tvrde da ionizacioni efekti utiču na Fe ali ne i na Ti, što bi moglo da objasni sličnosti u gradijentu.

Meta	d(pc)	logN(HI)	y_D	$(y_D)_{\text{gas-LB}}$	D(Fe)	D(Si)	Ref
Sirius	$2,64 \pm 0,02$	$17,60^{+0,14}_{-0,12}$	$16,2^{+6,4}_{-7,2}$	...	$-1,11^{+0,12}_{-0,14}$	$-0,63 \pm 0,16$	[7]
36 Oph	$5,99 \pm 0,04$	$17,850 \pm 0,075$	$15 \pm 2,5$	...	$-0,65 \pm 0,27$	...	[7]
ϵ Eri	$3,22 \pm 0,01$	$17,875 \pm 0,035$	$14,3 \pm 1,6$	...	$-1,07 \pm 0,10$	$-0,63 \pm 0,14$	[7]
31 Com	94 ± 8	$17,884 \pm 0,03$	$20,2 \pm 1,9$	...	$-0,78 \pm 0,10$	...	[7]
Hz 43	68 ± 13	$17,93 \pm 0,03$	$16,6 \pm 1,4$	...	$-1,21 \pm 0,04$	$-0,75 \pm 0,07$	[7]
ϵ Ind	$3,63 \pm 0,01$	$18,00 \pm 0,05$	16 ± 2	...	...	...	[7]
Procyon	$3,50 \pm 0,01$	$18,06 \pm 0,05$	$16,2 \pm 2$	...	$-1,24 \pm 0,05$	...	[7]
β Cas	$16,7 \pm 0,1$	$18,132 \pm 0,025$	$16,9 \pm 1,6$	...	$1,22 \pm 0,10$	...	[7]
HR 1099	$29,0 \pm 0,7$	$18,131 \pm 0,020$	$14,6 \pm 1$	...	...	...	[7]
G191-B2B	69 ± 15	$18,18 \pm 0,09$	$16,6 \pm 4,1$	...	$-0,58 \pm 0,09$	$-1,14^{+0,17}_{-0,16}$	[7]
β CMa	153 ± 15	$18,20^{+0,14}_{-0,20}$	≥ 16	...	$-0,61^{+0,20}_{-0,14}$	$+0,04^{+0,20}_{-0,14}$	[7]
σ Gem	37 ± 1	$18,201 \pm 0,037$	$13,8 \pm 2,1$	...	...	...	[7]
Capella	$12,9 \pm 0,1$	$18,239 \pm 0,035$	$15,9 \pm 1,5$	...	$-1,20 \pm 0,04$	$-0,75 \pm 0,06$	[7]
β Gem	$10,34 \pm 0,09$	$18,261 \pm 0,037$	$14,8 \pm 2,2$	...	$-1,29 \pm 0,05$	...	[7]
α Tri	$19,7 \pm 0,3$	$18,327 \pm 0,035$	$13,3 \pm 2$	...	$-1,13 \pm 0,20$	...	[7]
β Cet	$29,4 \pm 0,7$	$18,36 \pm 0,05$	$21,9^{+5,2}_{-6,8}$	...	...	$0,30 \pm 0,41$	[7]
λ And	$25,8 \pm 0,5$	$18,45 \pm 0,075$	17 ± 5	...	...	...	[7]
Feige 24	74 ± 20	$18,47 \pm 0,03$	13 ± 5$	...	...	-0,44 \pm 0,08$	[7]
WD 0621-376	78 ± 23	$18,70 \pm 0,15$	$14,1 \pm 6,0$	...	$-1,21 \pm 20$	...	[7]
WD 2211-495	53 ± 16	$18,76 \pm 0,15$	$15,1 \pm 6,5$	...	$-0,96 \pm 0,16$	$-0,27 \pm 0,16$	[7]
WD 1634-573	37 ± 3	$18,85 \pm 0,06$	$15,8 \pm 2,5$	...	$-1,22 \pm 0,09$	$-0,60^{+0,14}_{-0,18}$	[7]
α Vir	80 ± 6	$19,0 \pm 0,1$	$15,8^{+10,1}_{-5,8}$	...	$-1,29^{+0,10}_{-0,12}$	$-0,35^{+0,10}_{-0,12}$	[7]
GD 246	79 ± 24	$19,11 \pm 0,025$	$15,1 \pm 1,9$	...	$-1,26 \pm 0,06$	$-0,55^{+0,06}_{-0,04}$	[7]
λ Sco	216 ± 42	$19,23 \pm 0,03$	$7,6^{+1,8}_{-1,4}$	...	$-1,64 \pm 0,05$	$-1,32 \pm 0,05$	[7]
β Cen	161 ± 15	$19,63 \pm 0,10$	$11,7 \pm 7,5$	$9,5^{+11,9}_{-25,9}$	$-1,16 \pm 0,11$	$-0,55 \pm 0,10$	[7]
γ^2 Vel	258 ± 35	$19,710 \pm 0,026$	$21,8 \pm 2,1$	$24,7 \pm 3,2$	$-1,21 \pm 0,11$	$-0,19 \pm 0,05$	[7]
α Cru	98 ± 6	$19,85^{+0,07}_{-0,10}$	$12,6^{+3,6}_{-2,7}$	$11,7^{+4,7}_{-3,4}$	$-1,30^{+0,14}_{-0,12}$	...	[7]
BD +28 4211	104 ± 18	$19,846 \pm 0,018$	$13,9 \pm 1,0$	$13,4 \pm 1,3$	$-1,20 \pm 0,10$	...	[7]
Lan 23	122 ± 37	$19,89^{+0,25}_{-0,04}$	$21,9^{+4,1}_{-17,4}$	$23,5^{+5,3}_{-23,4}$	$-1,31^{+0,07}_{-0,25}$	...	[7]
μ Col	400^{+100}_{-70}	$19,86 \pm 0,015$	$6,9^{+6,9}_{-1,8}$	$4,5^{+8,2}_{-3,1}$	$-1,18 \pm 0,02$	$-0,27 \pm 0,02$	[7]
ξ Pup	429 ± 94	$19,963 \pm 0,026$	$14,0 \pm 2,3$	$13,7^{+2,7}_{-2,8}$	$-1,28^{+0,17}_{-0,07}$	$-0,40^{+0,07}_{-0,03}$	[7]
TD1 32709	520 ± 90	$20,03 \pm 0,10$	$18,6 \pm 5,3$	$19,1^{+6,7}_{-6,4}$	$-1,53 \pm 0,14$	...	[7]
WD 1034+001	155^{+58}_{-43}	$20,07 \pm 0,07$	$21,4 \pm 5,3$	$22,3 \pm 6,3$	$-1,42 \pm 0,12$	...	[7]
BD +39 3226	290^{+140}_{-70}	$20,08 \pm 0,09$	$11,7 \pm 3,1$	$11,2 \pm 3,4$	$-1,38 \pm 0,11$	$-0,79 \pm 0,21$	[7]
Feige 110	179^{+265}_{-67}	$20,14^{+0,065}_{-0,10}$	$21,4^{+5,7}_{-3,8}$	$22,1^{+6,9}_{-4,4}$	...	...	[7]
γ Cas	188 ± 20	$20,16^{+0,08}_{-0,10}$	$9,8^{+2,7}_{-2,3}$	$9,1^{+2,9}_{-2,5}$	$-1,53^{+0,14}_{-0,18}$	...	[7]
ς Ori	407 ± 127	$20,15^{+0,06}_{-0,07}$	$14,1 \pm 2,8$	$13,9 \pm 3,1$	$-1,41^{+0,21}_{-0,16}$	$-0,51 \pm 0,07$	[7]
δ Ori	281 ± 65	$20,19 \pm 0,03$	$7,4^{+1,2}_{-0,9}$	$6,5^{+1,3}_{-1}$	$-1,56 \pm 0,04$	...	[7]
ω Car	135 ± 9	$20,28 \pm 0,10$	$5^{+2,9}_{-3,4}$	$4^{+3}_{-4,5}$	$-1,54 \pm 0,11$	$-1,41^{+0,26}_{-0,12}$	[7]
ϵ Ori	412 ± 154	$20,45^{+0,08}_{-0,10}$	$6,3^{+1,8}_{-1,5}$	$5,8^{+1,8}_{-1,5}$	$-1,70^{+0,14}_{-0,12}$	$-0,94^{+0,12}_{-0,14}$	[7]
PG 0038+199	297^{+164}_{-104}	$20,48 \pm 0,04$	$19,1 \pm 2,6$	$19,2 \pm 2,8$	$-1,51^{+0,05}_{-0,04}$	...	[7]
LSE 44	554 ± 66	$20,52^{+0,10}_{-0,18}$	$22,4^{+11,7}_{-6,2}$	$22,7^{+12,8}_{-6,6}$	...	...	[7]
JL 9	590 ± 160	$20,78 \pm 0,05$	$10,0 \pm 1,9$	$9,8 \pm 2,0$	$-1,54 \pm 0,10$	...	[7]
HD 195965	794 ± 200	$20,95 \pm 0,025$	$8,5 \pm 1,6$	$8,4 \pm 1,6$	$-1,59 \pm 0,03$	...	[7]
LSS 1274	580 ± 100	$20,98 \pm 0,04$	$7,6 \pm 1,9$	$7,5 \pm 1,9$	$-1,62 \pm 0,08$	...	[7]
HD 191877	2200 ± 550	$21,05 \pm 0,05$	$7,8^{+2,4}_{-1,5}$	$7,6^{+2,5}_{-1,5}$	$-1,55 \pm 0,05$	...	[7]
HD 90087	2740 ± 800	$21,22 \pm 0,05$	$8,7 \pm 1,7$	$8,6 \pm 1,7$	$-1,45 \pm 0,05$	...	[7]
REJ 1738+665	243	$19,83 \pm 0,05$	$17,8^{+2,8}_{-2,5}$	18 ± 3	$-1,19^{+0,07}_{-0,07}$	...	[31]
HD 41161	1253	$21,08 \pm 0,08$	$21,4^{+5,1}_{-4,3}$	$21,4^{+5,1}_{-4,3}$	$-1,55^{+0,11}_{-0,11}$	...	[15]
HD 53975	1318	$21,14^{+0,06}_{-0,06}$	$10,2^{+2,3}_{-2}$	$10,2^{+2,30}_{-2}$	$-1,75 \pm 0,09$	...	[15]
HD93521	1500	$19,61 \pm 0,055$	$17,4^{+2}_{-0,8}$	$18,5^{+2,2}_{-1}$	...	...	[32]
LSE 234	460 ± 120	$20,68^{+0,025}_{-0,05}$	$22^{+4}_{-2,5}$	$22,4^{+4}_{-2,5}$	...	...	[31]

Tabela 5: Sažetak svih merenja y_D , D(Fe) i D(Si) u ISM-u

Meta	y_{Fe} (ppm)	y_{Si} (ppm)
Sirius	$2, 19^{+0,65}_{-0,75}$	$7, 59^{+2,88}_{-2,88}$
36 Oph	$6, 31^{+3,99}_{-3,99}$	...
ϵ Eri	$2, 40^{+0,62}_{-0,62}$	$7, 59^{+2,54}_{-2,54}$
31 Com	$4, 68^{+1,20}_{-1,20}$	...
Hz 43	$1, 74^{+0,26}_{-0,26}$	$5, 75^{+1,07}_{-1,07}$
ϵ Ind	...	...
Procyon	$1, 62^{+0,26}_{-0,26}$	...
β Cas	$1, 70^{+0,44}_{-0,44}$	...
HR 1099	...	...
G191-B2B	$7, 41^{+1,76}_{-1,76}$	$2, 34^{+0,94}_{-0,90}$
β CMa	$6, 92^{+3,28}_{-2,37}$	$35, 48^{+16,66}_{-11,89}$
σ Gem	...	...
Capella	$1, 78^{+0,26}_{-0,26}$	$5, 75^{+0,95}_{-0,95}$
β Gem	$1, 45^{+0,23}_{-0,23}$	...
α Tri	$2, 09^{+0,99}_{-0,99}$	...
β Cet	...	$64, 57^{+61,24}_{-61,24}$
λ And	...	...
Feige 24	...	$11, 74^{+2,42}_{-2,42}$
WD 0621-376	$1, 74^{+0,82}_{-0,82}$	...
WD 2211-495	$3, 09^{+1,19}_{-1,19}$	$17, 38^{+6,6}_{-6,6}$
WD 1634-573	$1, 70^{+0,40}_{-0,40}$	$8, 13^{+2,72}_{-3,45}$
α Vir	$1, 45^{+0,37}_{-0,43}$	$14, 45^{+3,58}_{-4,21}$
GD 246	$1, 55^{+0,28}_{-0,28}$	$9, 12^{+1,51}_{-1,29}$
λ Sco	$0, 65^{+0,10}_{-0,10}$	$1, 55^{+0,23}_{-0,23}$
β Cen	$1, 95^{+0,54}_{-0,54}$	$9, 12^{+2,61}_{-2,61}$
γ^2 Vel	$1, 74^{+0,48}_{-0,48}$	$20, 89^{+3,08}_{-3,08}$
α Cru	$1, 41^{+0,48}_{-0,42}$	...
BD +28 4211	$1, 78^{+0,46}_{-0,46}$	...
Lan 23	$1, 38^{+0,27}_{-0,81}$	...
μ Col	$1, 86^{+0,23}_{-0,23}$	$17, 38^{+1,79}_{-1,79}$
ξ Pup	$1, 48^{+0,60}_{-0,29}$	$12, 88^{+2,40}_{-1,48}$
TD1 32709	$0, 83^{+0,28}_{-0,25}$	...
WD 1034+001	$1, 08^{+0,32}_{-0,32}$	...
BD +39 3226	$1, 17^{+0,33}_{-0,33}$	$5, 25^{+2,58}_{-2,58}$
Feige 110	...	...
γ Cas	$0, 83^{+0,28}_{-0,36}$	...
ζ Ori	$1, 10^{+0,54}_{-0,42}$	$10^{+1,86}_{-1,86}$
δ Ori	$0, 78^{+0,11}_{-0,11}$	...
ω Car	$0, 81^{+0,22}_{-0,26}$	$1, 26^{+0,76}_{-0,37}$
ϵ Ori	$0, 56^{+0,19}_{-0,17}$	$3, 72^{+1,08}_{-1,25}$
PG 0038+199	$0, 87^{+0,14}_{-0,13}$	...
LSE 44	...	...
JL 9	$0, 81^{+0,21}_{-0,21}$	...
HD 195965	$0, 72^{+0,1}_{-0,1}$	...
LSS 1274	$0, 68^{+0,0,15}_{-0,15}$	...
HD 191877	$0, 79^{+0,13}_{-0,13}$	...
HD 90087	$1^{+0,16}_{-0,16}$	...
REJ 1738+665	$1, 82^{+0,36}_{-0,36}$	...
HD 41161	$0, 79^{+0,0,22}_{-0,22}$	...
HD 53975	$0, 50^{+0,12}_{-0,12}$	...
HD93521	...	...
LSE 234	...	...

Tabela 6: Veličine y_{Fe} i y_{Si} za ISM

Veličina y_{Fe} izmerena u gasu je definisana:

$$y_{\text{Fe}} \equiv 10^6 \cdot \frac{\text{Fe}}{\text{H}} \quad (38)$$

Veličina y_{Si} izmerene u gasu je definisana:

$$y_{\text{Si}} \equiv 10^6 \cdot \frac{\text{Si}}{\text{H}} \quad (39)$$

Izmerene vrednosti y_D u gasu u ISM-u, predstavljene su u tabeli 5. Iznad duple horizontalne linije su rezultati iz Linsky et al. 2006 [7] a ispod su nova merenja iz Linsky et al. 2009 [31]. U ovom radu smo izračunali vrednosti y_{Fe} i y_{Si} koje su predstavljene u tabeli 6. Tačka β CMA je nije uzeta u obzir jer nema greške merenja za y_D . Greške veličina iz tabele 6 smo izračunali na sledeći način. Iz formule (37) se može izračunati zastupljenost Fe/H u gasu.

$$\log(\text{Fe}/\text{H}) = D(\text{Fe}) + \log(\text{Fe}/\text{H})_\odot \quad (40)$$

Solarne vrednosti za Fe i Si (Linsky et al. 2006 [7]) su:

$$\log(\text{Fe}/\text{H})_\odot = -4,55 \pm 0,05 \quad (41)$$

$$\log(\text{Si}/\text{H})_\odot = -4,49 \pm 0,04 \quad (42)$$

Greška merenja za Fe, $\sigma_{\log(\text{Fe}/\text{H})}$ smo izračunali:

$$\sigma_{\log(\text{Fe}/\text{H})} = \sqrt{\sigma_{D(\text{Fe})}^2 + \sigma_{\log(\text{Fe}/\text{H})_\odot}^2} \quad (43)$$

gde je $\sigma_{D(\text{Fe})}$ greška merenja iz tebele 5 a $\log(\text{Fe}/\text{H})_\odot$ greška merenja iz jednačine (41). Grešku za Fe/H, $\sigma_{\text{Fe}/\text{H}}$ smo izračunali na sledeći način:

$$\sigma_{(\text{Fe}/\text{H})} = \frac{\text{Fe}}{\text{H}} \cdot \ln(10) \cdot \sigma_{\log(\text{Fe}/\text{H})} \quad (44)$$

Greška $\sigma_{y_{Fe}}$ je predstavljena u tabeli 6 i definisana:

$$\sigma_{y_{Fe}} = 10^6 \cdot \sigma_{(\text{Fe}/\text{H})} \quad (45)$$

Jednakim postupkom, kao što smo izračunali Fe/H i $\sigma_{(\text{Fe}/\text{H})}$ se može izračunati Si/H i $\sigma_{(\text{Si}/\text{H})}$.

Prava vrednost zastupljenosti y_D iz rada Linsky et al. (2006) [7], pod uslovom da se D u značajnoj meri veže za prašinu je:

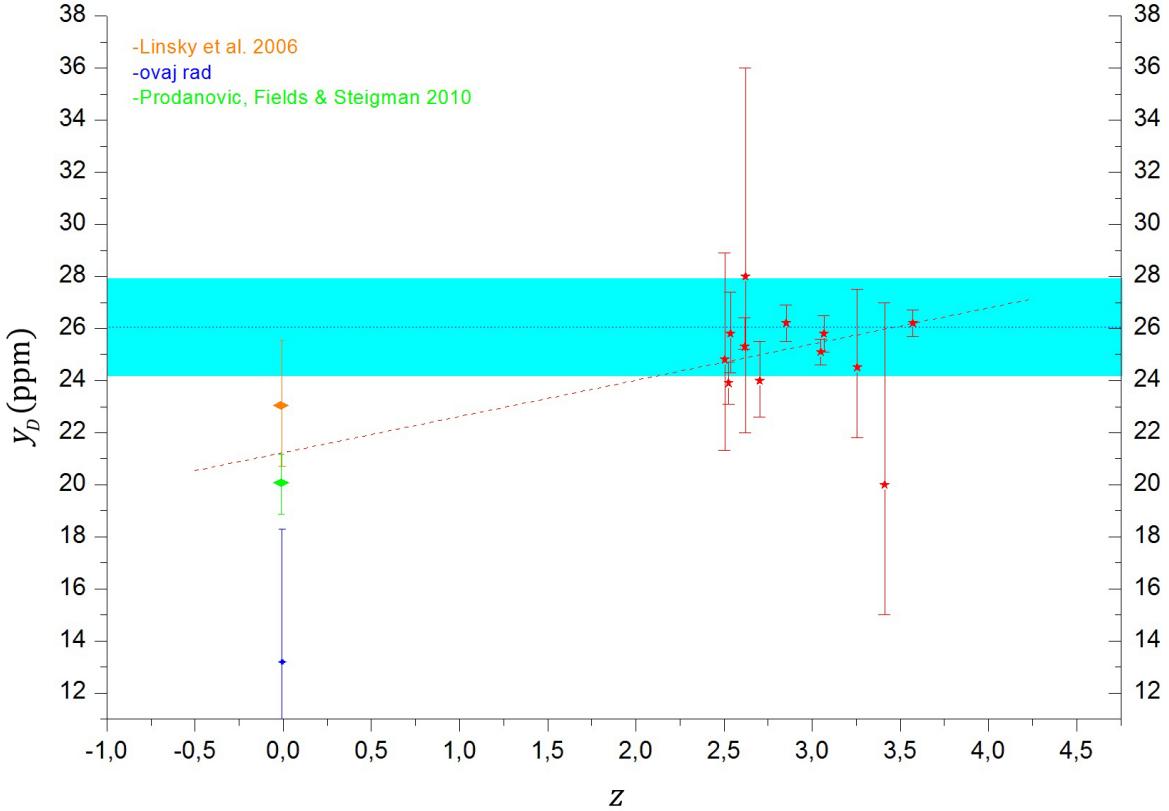
$$y_D = (23,1 \pm 2,4) \text{ ppm} \quad (46)$$

Zastupljenost D iz rada Prodanovic, Fields & Steigman (2010) [6], gde se se pomoću Bajesove analize odredila najverovatnija vrednost prave zastupljenosti D u ISM-u je:

$$y_D = (20 \pm 1) \text{ ppm} \quad (47)$$

Otežana srednja vrednost zastupljenosti D u ISM-u izračunatu u ovom radu je:

$$y_D = (13 \pm 5) \text{ ppm} \quad (48)$$



Grafik 11: Zastupljenost D na velikim crvenim pomacima z

Na grafiku 11 su predstavljeni podaci iz tabele 2. Može se videti linearna regresija monotonog opadanja zastupljenosti D koja je izračunata u ovom radu. Zastupljenosti y_D iz radova Linsky et al. (2006) [7] i Prodanovic, Fields & Steigman (2010) [6] se poklapaju u okviru greške sa monotonim opadanjem D na $z = 0$ (današnja epoha). Otežana srednja vrednost y_D iz ovog rada na $z = 0$ se ne poklapa sa monotonim opadanjem. Da bi se dobila prava vrednost y_D na $z = 0$ mora se uzeti u obzir dodatni efekti, kao što su npr. vezivanje D u prašini ili priliv gasa koji je siromašan metalima.

Pre nego što se počne sa analizom korelacije deuterijuma sa refraktornim elementima, potrebno je objasniti kako će se analizirati korelacije. Zavisnosti će se analizirati pomoću statističke analize, odnosno Pirsonovog i Spirmanovog koeficijenta korelacije. Pirsonova analiza daje tzv. Pirsonov r koeficijent. Pirsonov r koeficijent ukazuje na jačinu linearne zavisnosti između dve veličine. Može imati vrednosti između 1 i -1. Vrednost $r = 1$ predstavlja savršenu pozitivnu korelaciju, $r = -1$ savršenu negativnu korelaciju, a $r = 0$ da nema korelacije.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (49)$$

gde je N broj merenja, x_i i y_i su izmerene veličine, i dve veličine između kojih se traži jačina korelacije. Pojedinačne vrednosti veličina su indeksovane sa i, a \bar{x} je srednja vrednost definisana:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (50)$$

Za uzorak veličine N, X_i i Y_i su rangovi, a Spirmanov koeficijent korelacije je definisan kao:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N d_i^2}{N(N^2 - 1)} \quad (51)$$

gde je $d_i = X_i - Y_i$. Spirmanov koeficijent daje jačinu monotonog odnosa između dve veličine. Monotona veza znači da stopa porasta ili smanjenja jedne veličine uticati na stopu porasta ili smanjenja druge veličine.

Svakoj izmerenoj vrednosti se može pripisati određena težina koja utiče na srednju vrednost. Otežana srednja vrednost veličine x je $m(x, \omega)$ i razlikuje se od aritmetičke srednje vrednosti. Otežana srednja vrednost je definisana:

$$m(x, \omega) = \frac{\sum_i \omega_i \cdot x_i}{\sum_i \omega_i} \quad (52)$$

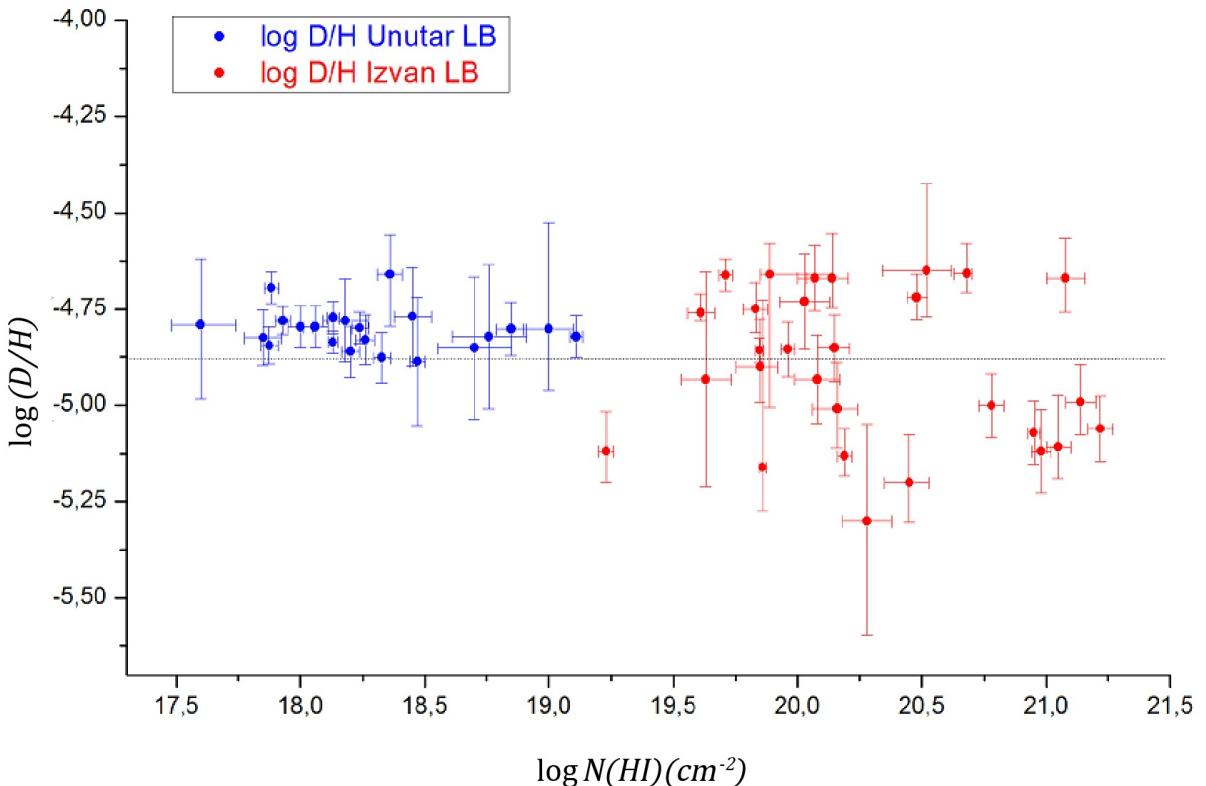
gde je x izmerena vrednost, a ω_i je težina koja je definisana:

$$\omega_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (53)$$

gde je σ_i greška pojedinačnog merenja.

Cilj ovog rada je da utvrdi da li postoji korelacija i jačina korelacije između zastupljenosti deuterijuma i refraktornih metala Fe, Si i O u gasu. Odnosno, potrebno je ispitati da li vezivanje D za prašinu uzrok varijacija D u ISM-u. Ako se D u dovoljnoj meri veže za prašinu, onda D mora imati pozitivnu korelaciju sa svim navedenim refraktornim metalima. Vrednosti sa najmanjom zastupljenošću D u gasu bi trebala da odgovaraju najmanjim vrednostima zastupljenosti refreaktornih metala u gasu. Pomoću jednačine (24) i tabele 5 se može izračunati zastupljenost metala u gasu. Ako makar jedan metal pokazuje antikorelaciju ili ako nema korelacije, onda model vezivanja D za prašinu nije ispravan, i treba ga modifikovati.

Na grafiku 12 je prikazana zastupljenost deuterijuma u odnosu na linijsku gustinu vodonika $\log N(\text{HI})$. Vrednosti su iz tabele 5.



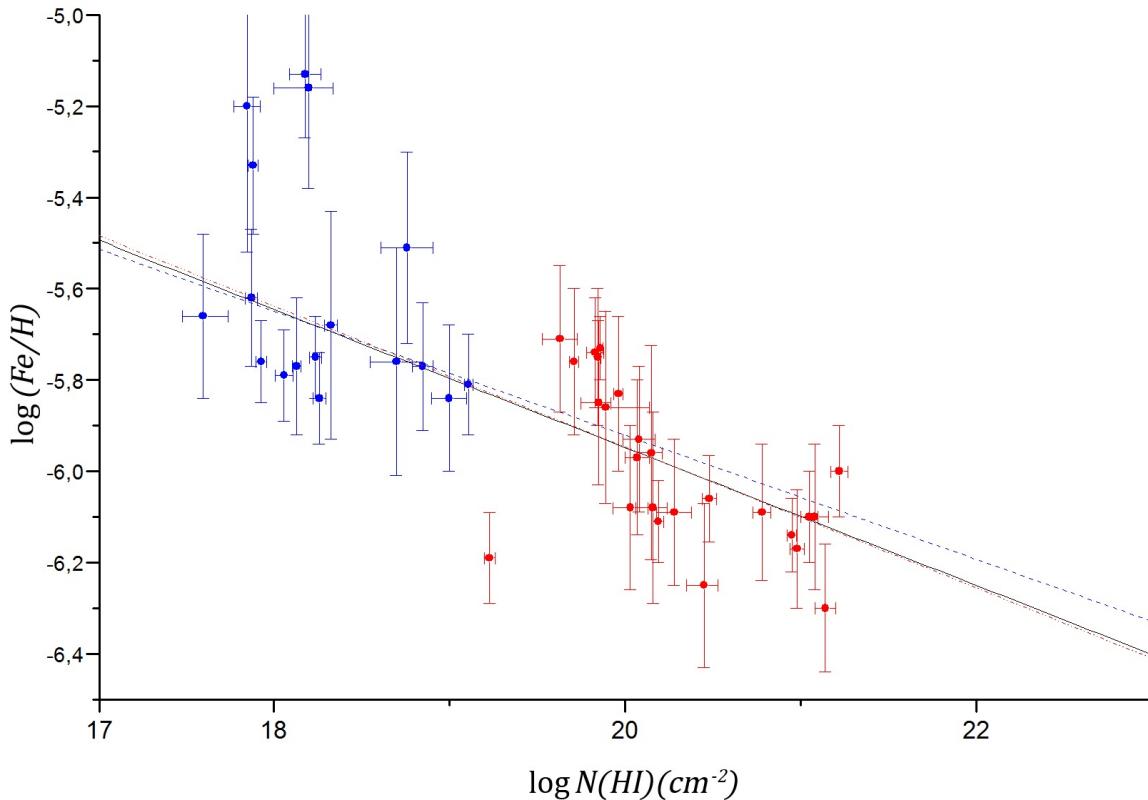
Grafik 12: Zavisnost $\log D/H$ od linijske gustine $\log N(\text{HI})$

Plavi kružići predstavljaju vrednosti unutar Lokalnog mehura (LB) za $\log N(\text{HI}) < 19,2$. Crveni krugovi predstavljaju vrednosti izvan Lokalnog mehura $\log N(\text{HI}) > 19,2$. Crna isprekidana linija je otežana srednja vrednost deuterijuma za sve podatke i iznosi $y_D = (13 \pm 5)$ ppm. Na grafiku 12 mogu se jasno videti prostorne varijacije za y_D , pogotovo izvan LB. Srednja vrednost unutar LB iznosi $y_D = (15,58 \pm 5,67)$ ppm, a izvan LB $y_D = (11,56 \pm 5,91)$ ppm. Otežana srednja vrednost znači da prilikom računanja srednje vrednosti najviše uticaja imaju najpreciznija merenja.

Zavisnost $\log(\text{Fe}/\text{H})$ u gasu od linijske gustine $\log N(\text{HI})$ je predstavljena na grafiku 13. Podaci su iz tabele 5 i 6.

Mesto	k	σ_k	n	σ_n	R^2
log Fe/H vs log N(HI) ISM	-0,15	0,078	-2,92	0,35	0,49
log Fe/H vs log N(HI) unutar LB	-0,14	0,08	-3,22	1,47	0,013
log Fe/H vs log N(HI) izvan LB	-0,15	0,04	-2,86	0,88	0,23

Tabela 7: Koeficijenti linearne regresije zavisnosti log (Fe/H) od log N(HI)



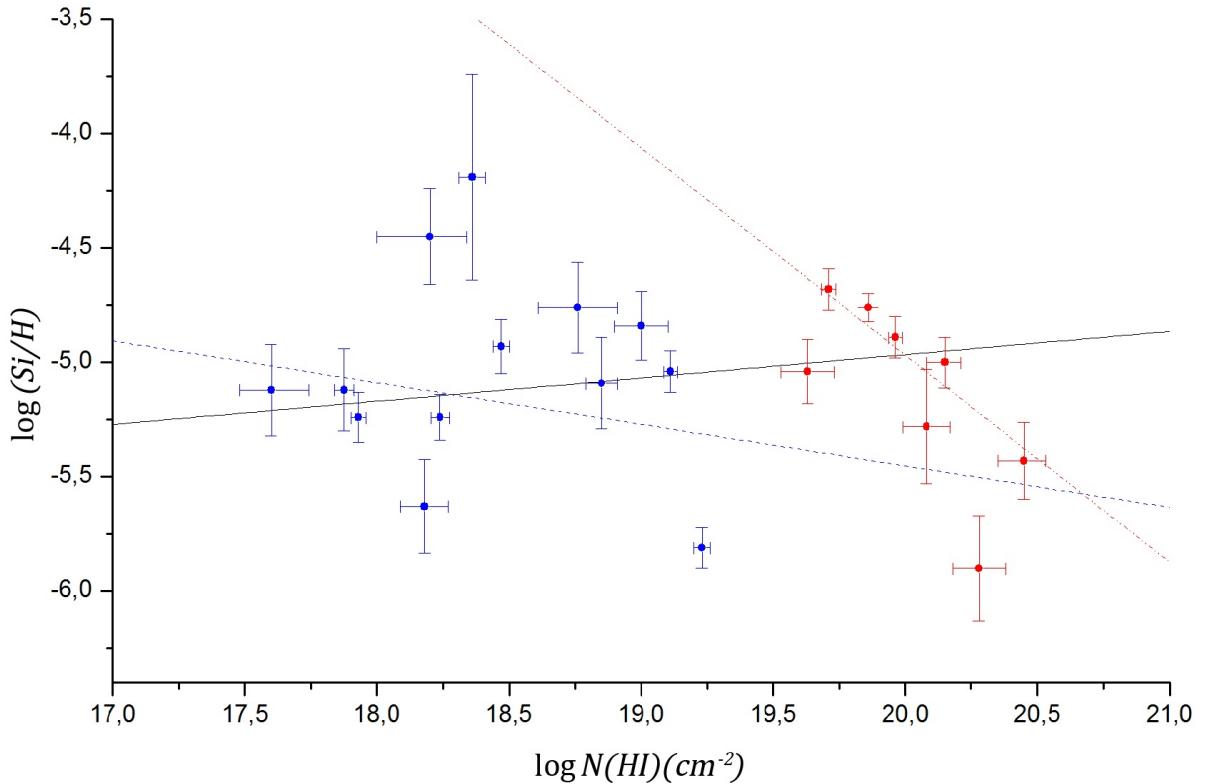
Grafik 13: Zavisnost log Fe/H od log N(HI) u ISM-u

Zanimljivo je primetiti na grafiku 13 trend da zastupljenost Fe opada sa porastom linijske gustine, unutar, izvan LB i u celosti u ISM-u. Crna puna linija predstavlja linearnu regresiju za ISM, zajedno Lokalni mehur i region izvan Lokalnog mehura. Plava isprekidana linija predstavlja linearnu regresiju unutar Lokalnog mehura. Crvena crtica tačka tačka, predstavlja linearnu regresiju za vrednosti izvan Lokalnog mehura. Sve tri linearne regresije daju vrlo približne rezultate.

Zavisnost log (Si/H) u gasu od linijske gustine log N(HI) je predstavljena na grafiku 14. Podaci su iz tabela 5 i 6. Unutar LB zastupljenost Si blago opada, dok izvan Lokalnog mehura zastupljenost naglo opada. Linearna regresija za ceo ISM daje neočekivanu linearnu zavisnost koja raste sa porastom log N(HI). Što se linijska gustina povećava očekuje se zastupljenost elemenata u gasu raste. Oba jaka refraktorna metala Si i Fe imaju sličnu opadajuću zavisnost unutar Lokalnog mehura. Izvan Lokalnog mehura takođe oba elementa imaju opadajuću zavisnost, gde je koeficijent pravca linearne regresije za Si mnogo veći.

Mesto	k	σ_k	n	σ_n	R^2
log (Si/H) vs log N(HI) ISM	0,10	0,03	-7,00	0,67	0,00193
log (Si/H) vs log N(HI) unutar LB	-0,18	0,07	-1,80	1,34	-0,01
log (Si/H) vs log N(HI) izvan LB	-0,90	0,19	13,14	3,77	0,43

Tabela 8: Koeficijenti linearne regresije zavisnosti log (Si/H) od log N(HI)

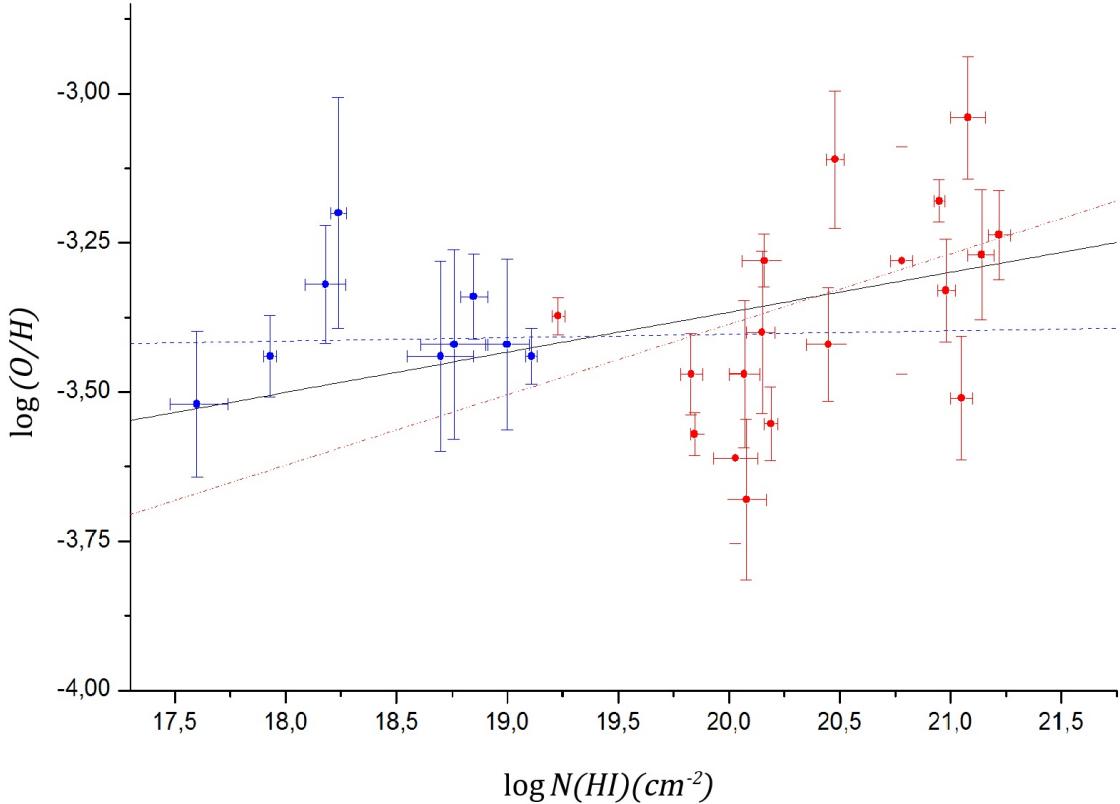


Grafik 14: Zavisnost $\log \text{Si}/\text{H}$ od $\log \text{N}(\text{HI})$ u ISM-u

Zavisnost $\log (\text{O}/\text{H})$ u gasu od linijske gustine $\log \text{N}(\text{HI})$ je predstavljena na grafiku 15. Podaci su iz tabele 5 i 14. Unutar LB kiseonik pokazuje konstantnu vrednost, a izvan da se zastupljenost povećava sa porastom linijske gustine. Kiseonik je najmanje refraktoran element od navedena tri elementa. Pokazuje drugačiji trend u poređenju sa Fe i Si unutar i izvan LB.

Mesto	k	σ_k	n	σ_n	R^2
$\log (\text{O}/\text{H})$ vs $\log \text{N}(\text{HI})$ ISM	0,07	0,01	-4,71	0,29	0,15
$\log (\text{O}/\text{H})$ vs $\log \text{N}(\text{HI})$ unutar LB	0,006	0,06	-3,52	1,04	-0,14
$\log (\text{O}/\text{H})$ vs $\log \text{N}(\text{HI})$ izvan LB	0,118	0,02	-5,75	0,45	0,22

Tabela 9: Koeficijenti linearne regresije zavisnosti $\log (\text{O}/\text{H})$ od $\log \text{N}(\text{HI})$



Grafik 15: Zavisnost $\log (\text{O}/\text{H})$ od $\log \text{N}(\text{HI})$ u ISM-u

Zavisnost y_D u odnosu na y_{Fe} u gasu je predstavljena na grafiku 16. Podaci su iz tabele 5 i 6. Plavi kružići predstavljaju vrednosti unutar Lokalnog mehura, a isprekidana plava linija linearnu regresiju unutar Lokalnog mehura. Crveni kružići predstavljaju vrednosti izvan Lokalnog mehura, a crvena crtica tačka linearnu regresiju izvan Lokalnog mehura. Puna crna linija predstavlja linearnu regresiju za sva merenja u ISM-u, odnosno zajedno unutar i izvan LB.

Mesto	k	σ_k	n	σ_n	R^2	Pirsonov koef.	Spirmanov koef.
y_D vs y_{Fe} ISM	2,04	0,3	9,80	0,58	0,27	0,31	0,43
y_D vs y_{Fe} unutar LB	0,37	0,39	15,04	1,06	0,04	0,29	0,12
y_D vs y_{Fe} izvan LB	6,56	0,93	4,10	1,09	0,44	0,34	0,47

Tabela 10: Koeficijenti linearne regresije i koeficijenti korelacije r zavisnosti y_D od y_{Fe}

U tabeli 10 se mogu videti parametri linearne regresije, njihove greške, kao i koeficijenti korelacije za y_D u zavisnosti od y_{Fe} u gasu, u ISM-u. Koeficijent pravca je 0,37 unutar LB. Mala vrednost koeficijenta pravca, daje skoro konstantnu vrednost y_D unutar LB. Izvan LB koeficijent pravca linearne regresije je 6,56 i veći je u odnosu na unutar LB. Pirsonovi i Spirmanovi koeficijenti daju vrlo slabu korelaciju za ISM, kao i unutar Lokalnog mehura i izvan Lokalnog mehura, pri čemu je najveći Spirmanov koeficijent 0,47.

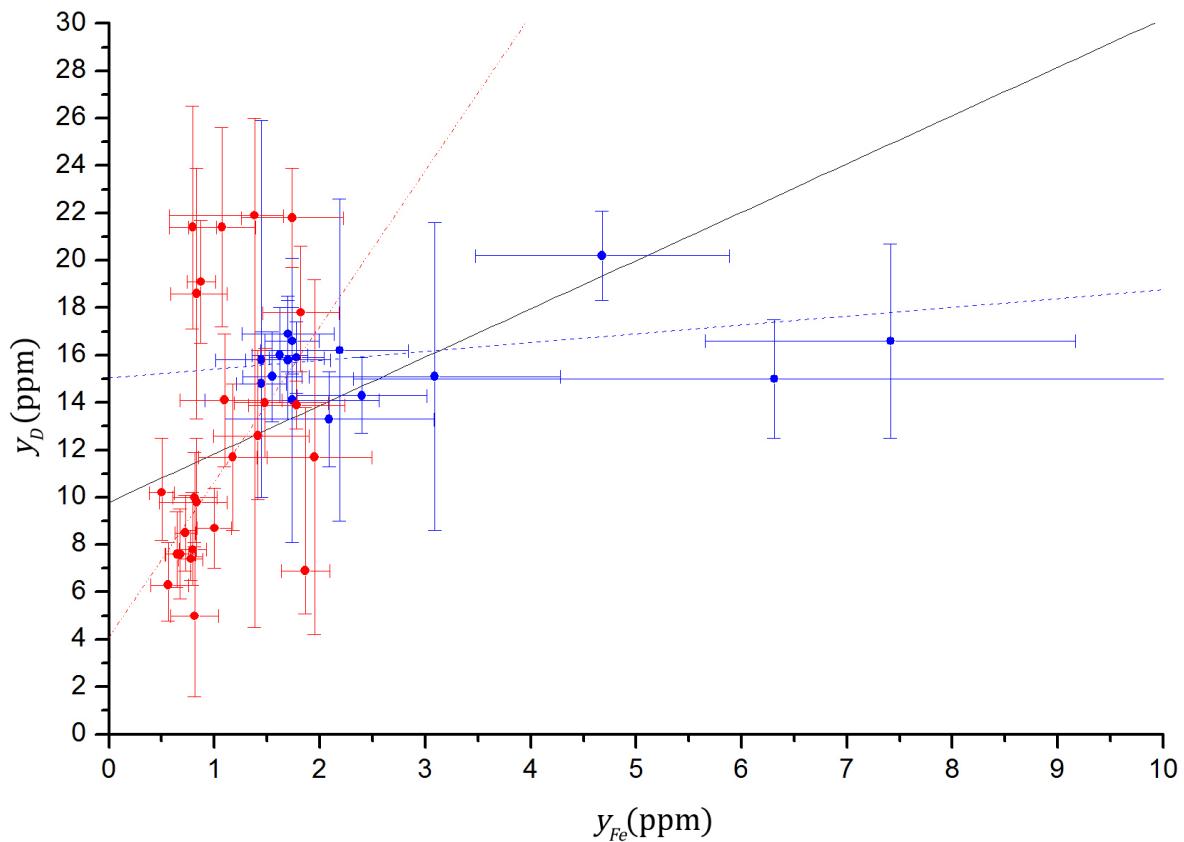
Da li će se dobiti bolje korelacije veličina sa korigovanim vrednostima za zastupljenost D izvan LB (y_D)_{gas-LB}? Za korigovane zastupljenost deuterijuma (y_D)_{gas-LB} se uzimaju vrednosti iz radova Linsky et al. (2006) [7] i Linsky (2009) [31]. Koregovanje se vrši tako što se za vrednosti y_D izvan LB, oduzimaju se vrednosti Lokalnog mehura, da bi se izračunalo kolika je korigovana vrednost zastupljenosti deuterijuma (y_D)_{gas-LB} izvan LB.

Zavisnost korigovanih vrednosti izvan Lokalnog mehura (y_D)_{gas-LB} u odnosu na Fe/H je predstavljena na grafiku 17. Podaci su iz tabele 5 i 6. Linearna regresija za korigovane vrednosti je predstavljena u tabeli 11. Kao i za nekorigovane vrednosti y_D , koeficijenti pravaca za korigovane vrednosti (y_D)_{gas-LB} su poprilično različiti. Vrednosti R^2 takođe imaju male vrednosti, što znači da izmerene vrednosti mnogo odstupaju od vrednosti koje predviđa linearna regresija.

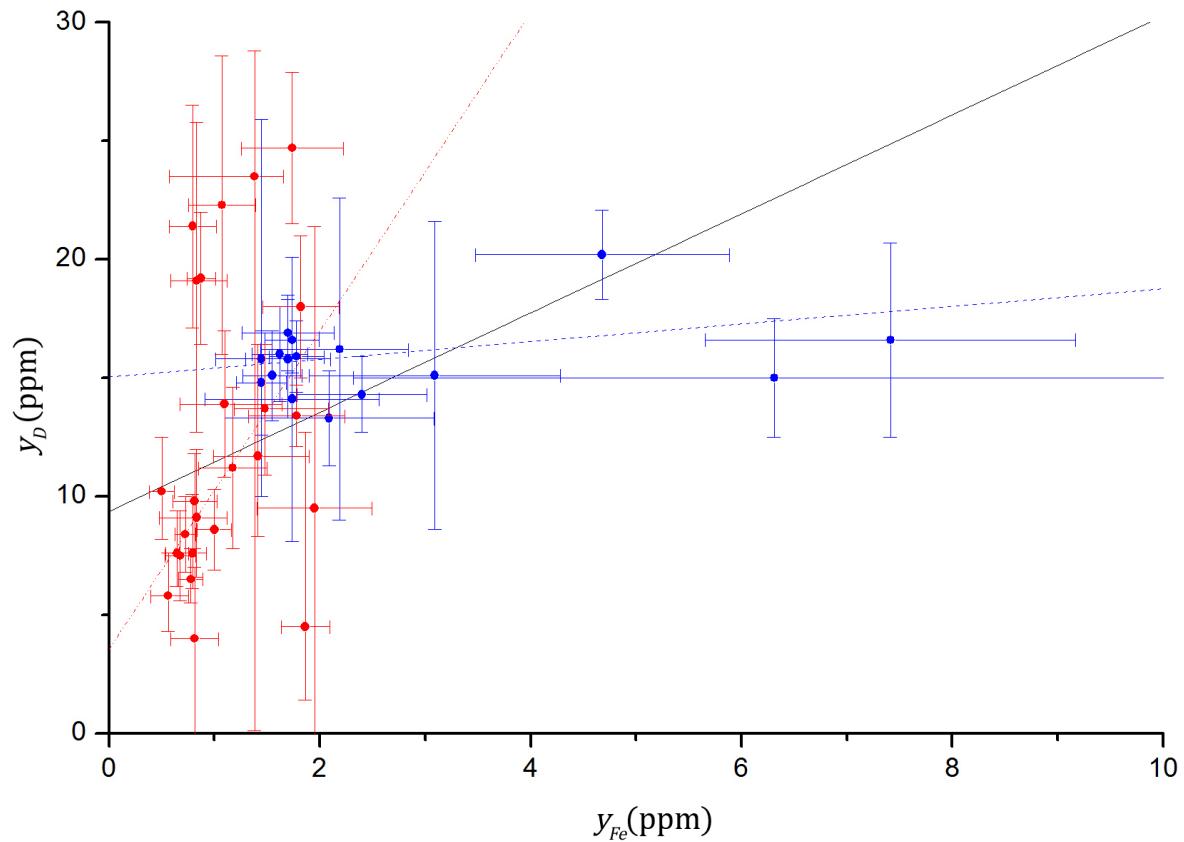
Mesto	k	σ_k	n	σ_n	R^2	Pirsonov koef.	Spirmanov koef.
y_D vs y_{Fe} ISM	2,09	0,30	9,37	0,59	0,28	0,28	0,42
y_D vs y_{Fe} izvan LB	6,72	1,11	3,55	1,19	0,38	0,29	0,42

Tabela 11: Koeficijenti linearne regresije i koeficijenti korelacije r u zavisnosti korigovanih vrednosti y_D od y_{Fe}

Ako se uporedi grafik 10 i grafik 16, razlike za linearnu regresiju nastaju jer su u ovom radu na grafiku predstavljena zavisnost y_D od y_{Fe} , a u radu Lallement et al. [30] zavisnost Fe/H od D/H. Takođe smo koristili drugačije metode linearne regresije. U ovom radu smo koristili metod najmanjih kvadrata, a u drugom radu je korišćena metoda ODR (eng. weighted orthogonal distance regression).



Grafik 16: Zavisnost y_D od y_{Fe} u ISM-u



Grafik 17: Zavisnost y_D od y_{Fe} za korigovane vrednosti y_D izvan LB

Na grafiku 18 se može videti zavisnost y_D od y_{Si} unutar i izvan Lokalnog mehura. Podaci su iz tabela 5 i 6. Kao i kod zavisnosti y_D od y_{Fe} , linearna regresija unutar LB ima manji nagib od linearne regresije

izvan LB. Najbolji koeficijent korelaciјe od 0,80 ima zavisnost y_D od y_{Si} unutar LB. Zatim sledeћа po jačini korelaciјe je izvan LB, i iznosi 0,69. Za korigovane vrednosti $y_{D(gas-LB)}$ izvan LB, koeficijenti korelaciјe su manji nego za nekorigovane vrednosti. Zavisnost y_D od y_{Si} daje vrlo male vrednosti R^2 , osim za vrednosti izvan LB.

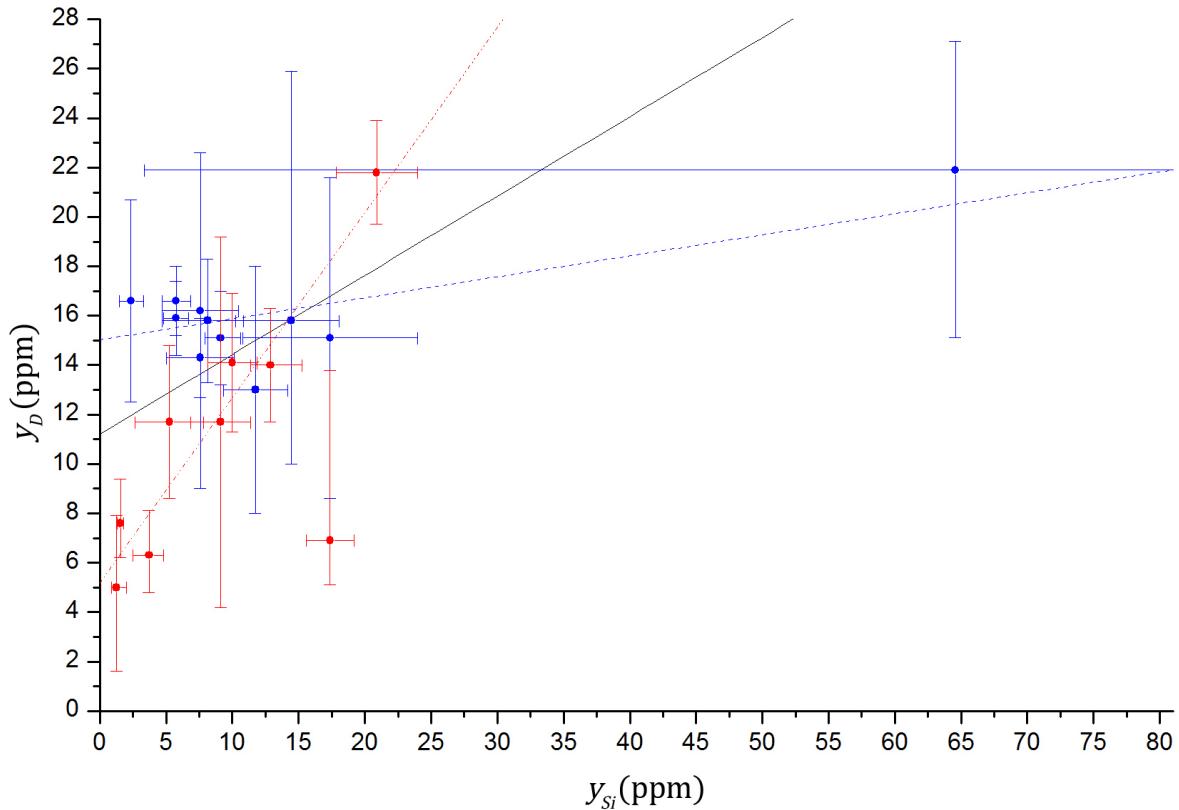
Mesto	k	σ_k	n	σ_n	R^2	Pirsonov koef.	Spirmanov koef.
y_D vs y_{Si} ISM	0,321	0,07	11,22	0,79	0,28	0,53	0,33
y_D vs y_{Si} unutar LB	0,09	0,09	15,02	1,00	0,22	0,80	-0,27
y_D vs y_{Si} izvan LB	0,75	0,12	5,18	1,27	0,86	0,69	0,69

Tabela 12: Koeficijenti linearne regresije i Pirsonov koeficijent korelaciјe r zavisnosti y_D od y_{Si}

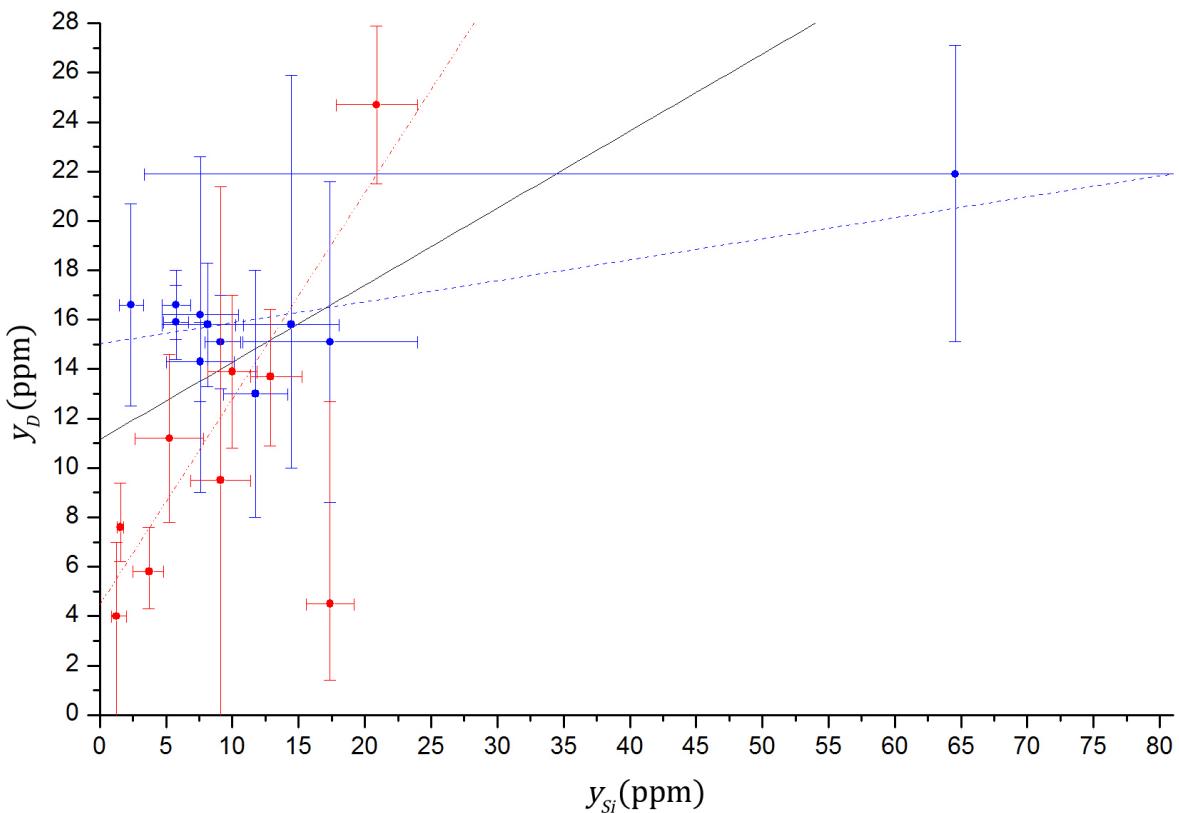
Zavisnost korigovanih vrednosti izvan Lokalnog mehura (y_D)_{gas-LB} u odnosu na y_{Si} je predstavljena na grafiku 19. Podaci su iz tabela 5 i 6.

Mesto	k	σ_k	n	σ_n	R^2	Pirsonov koef.	Spirmanov koef.
y_D vs y_{Si} ISM	0,31	0,08	11,16	0,8	0,21	0,49	0,30
y_D vs y_{Si} izvan LB	0,83	0,15	4,48	1,22	0,78	0,64	0,6

Tabela 13: Koeficijenti linearne regresije i Pirsonov koeficijent korelaciјe r zavisnosti korigovanih vrednosti y_D od y_{Si}



Grafik 18: Zavisnost y_D od y_{Si} u ISM-u



Grafik 19: Zavisnost y_D od y_{Si} za korigovane vrednosti y_D izvan LB

Rezultati merenja y_O u gasu su predstavljeni u tabeli 14 iz rada Oliveira et al. (2006) [33], a ispod duple horizontalne linije merenja su iz rada Linsky (2009) [31].

Mesto	$\log N(\text{HI})$	y_D (ppm)	y_O (ppm)	$y_{D(\text{gas-LB})}$ (ppm)
Sirius B	17, 6 _{-0,12} ^{+0,14}	11, 7 _{-3,7} ^{+3,7}	302 ₋₇₅ ⁺⁹⁵	...
Capella	18, 239 _{-0,035} ^{+0,035}	16 _{-1,9} ^{+1,4}	631 ₋₁₉₅ ⁺³⁶⁹	...
WD 1634-573	18, 85 _{-0,06} ^{+0,06}	16 _{-2,5} ^{+2,5}	4, 7 ₋₇₅ ⁺⁷⁵	...
WD 2211-495	18, 76 _{-0,15} ^{+0,15}	15, 1 ₋₆ ⁺⁶	380 ₋₁₁₆ ⁺¹⁶¹	...
HZ 43	17, 93 _{-0,03} ^{+0,03}	16, 6 _{-1,4} ^{+1,4}	363 ₋₇₀ ⁺⁴⁴	...
G191-B2B	18, 18 _{-0,09} ^{+0,09}	16, 6 _{-4,5} ^{+4,5}	479 ₋₉₉ ⁺¹¹⁹	...
Feige 24	18, 47 _{-0,03} ^{+0,03}	13 ₋₅ ⁺⁵	333 ₋₅₆ ⁺⁵⁹	...
WD 0621-376	18, 7 _{-0,15} ^{+0,15}	14, 1 _{-5,6} ^{+5,6}	363 ₋₁₁₀ ⁺¹⁵⁶	...
GD 246	19, 11 _{-0,025} ^{+0,025}	15, 1 _{-1,7} ⁺²	363 ₋₃₄ ⁺⁴⁴	...
alpha Vir	19 _{-0,1} ^{+0,1}	15, 8 _{-4,6} ^{+10,1}	380 ₋₁₁₁ ⁺¹³⁹	...
BD +28 4211	19, 846 _{-0,018} ^{+0,018}	12, 6 _{-0,8} ^{+0,8}	269 ₋₂₂ ⁺²³	13, 4 _{-1,3} ^{+1,3}
WD 1034+001	20, 07 _{-0,07} ^{+0,07}	21, 4 _{-4,5} ^{+5,3}	339 ₋₈₆ ⁺¹⁰⁶	22, 3 _{-6,3} ^{+6,3}
Feige 110	20, 14 _{-0,1} ^{+0,065}	21, 4 _{-4,1} ^{+4,1}	832 ₋₁₉₉ ⁺²⁴¹	22, 1 _{-4,4} ^{+6,9}
γ Cas	20, 16 _{-0,1} ^{+0,08}	11, 2 _{-2,5} ^{+2,5}	525 ₋₃₅ ⁺⁷²	9, 1 _{-2,5} ^{+2,9}
λ Sco	19, 23 _{-0,03} ^{+0,03}	7, 6 _{-2,5} ^{+2,5}	424 ₋₃₁ ⁺³⁰	7, 6 _{-2,5} ^{+2,5}
δ Ori	20, 19 _{-0,03} ^{+0,03}	7, 4 _{-0,9} ^{+1,2}	280 ₋₄₀ ⁺⁴⁰	6, 5 ₋₁ ^{+1,3}
BD+393226	20, 08 _{-0,09} ^{+0,09}	11, 7 _{-2,5} ^{+3,1}	209 ₋₅₈ ⁺⁷²	11, 2 _{-3,4} ^{+3,4}
PG 0038+199	20, 48 _{-0,04} ^{+0,04}	19, 1 _{-2,4} ^{+2,6}	776 ₋₂₃₃ ⁺¹⁷⁸	19, 2 _{-2,8} ^{+2,8}
nesto Ori	20, 15 _{-0,07} ^{+0,06}	14 ₋₁₀ ⁺⁵	398 ₋₁₁₁ ⁺¹³⁸	13, 9 _{-3,1} ^{+3,1}
ϵ Ori	20, 45 _{-0,1} ^{+0,08}	6, 5 ₋₃ ⁺³	380 ₋₇₆ ⁺⁹⁰	5, 8 _{-1,5} ^{+1,8}
TDI 32709	20, 03 _{-0,1} ^{+0,1}	18, 6 _{-4,3} ^{+5,3}	245 ₋₇₁ ⁺⁹⁰	19, 1 _{-6,4} ^{+6,7}
LSE 44	20, 52 _{-0,18} ^{+0,1}	22, 4 _{-6,7} ⁺⁷	1130 ₋₃₆₀ ⁺⁴⁸⁰	22, 7 _{-6,6} ^{+12,8}
LS 1274	20, 98 _{-0,04} ^{+0,04}	7, 6 _{-1,8} ^{+1,8}	468 ₋₈₁ ⁺¹⁰⁵	7, 5 _{-1,5} ^{+2,5}
JL 9	20, 78 _{-0,05} ^{+0,05}	10 _{-1,9} ^{+1,9}	525 ₋₁₄₇ ⁺³¹⁴	9, 8 ₋₂ ⁺²
HD 195965	20, 95 _{-0,025} ^{+0,025}	8, 5 _{-1,2} ^{+1,7}	661 ₋₅₆ ⁺⁵²	8, 4 _{-1,6} ^{+1,6}
HD 191877	21, 05 _{-0,05} ^{+0,05}	7, 8 _{-1,3} ^{+2,6}	309 ₋₄₉ ⁺⁹⁹	7, 6 _{-1,5} ^{+2,5}
HD 90087	21, 22 _{-0,05} ^{+0,05}	9, 8 _{-1,9} ^{+1,9}	580 ₋₁₀₀ ⁺¹⁰⁰	8, 6 _{-1,7} ^{+1,7}
REJ 1738+665	19, 83 _{-0,05} ^{+0,05}	17, 8 _{-2,5} ^{+2,8}	339 ₋₅₃ ⁺⁵³	18 ₋₃ ⁺³
HD 41161	21, 08 _{-0,08} ^{+0,08}	21, 4 _{-4,3} ^{+5,1}	912 ₋₂₁₅ ⁺²¹⁵	21, 4 _{-4,3} ^{+5,1}
HD 53975	21, 14 _{-0,06} ^{+0,06}	10, 2 ₋₂ ^{+2,3}	537 ₋₁₃₅ ⁺¹³⁵	10, 2 ₋₂ ^{+2,3}
HD 93521	19, 61 _{-0,055} ^{+0,055}	17, 4 ₋₈ ⁺²	525 ₋₇₃ ⁺⁷³	18, 5 ₋₁ ^{+2,2}

Tabela 14: Rezultati merenja za y_O iz rada Oliveira et al. (2006) [33] i Linsky (2009) [31]

Veličina y_O izmerene u gasu je definisana:

$$y_O \equiv 10^6 \cdot \frac{O}{H} \quad (54)$$

Na grafiku 20 se može videti zavisnost y_D od y_O . Podaci su iz tabela 5 i 14. Za neke vrednosti y_D iz tabela 5 i 14 postoje male razlike, jer autori koriste različite izvore. Linearne regresije za oba regionala pokazuju vrlo malo slaganje sa posmatranim vrednostima, jer R^2 ima vrednost približnu 0. Izvan LB ova vrednost je negativna, što znači da linearan fit uopšte nije odgovarači, i da horizontalna konstantna vrednost daje bolji fit.

Mesto	k	σ_k	n	σ_n	R^2	Pirsonov koef.	Spirmanov koef.
y_D vs y_O ISM	0,0037	0,0026	1,14	0,0037	-0,015	0,20	0,03
y_D vs y_O unutar LB	0,002	0,006	14,89	3,03	-0,08	0,55	0,12
y_D vs y_O izvan LB	0,0010	0,0029	10,40	1,24	-0,06	0,23	0,05

Tabela 15: Koeficijenti linearne regresije i Pirsonov koeficijent korelacije r zavisnosti y_D od y_O

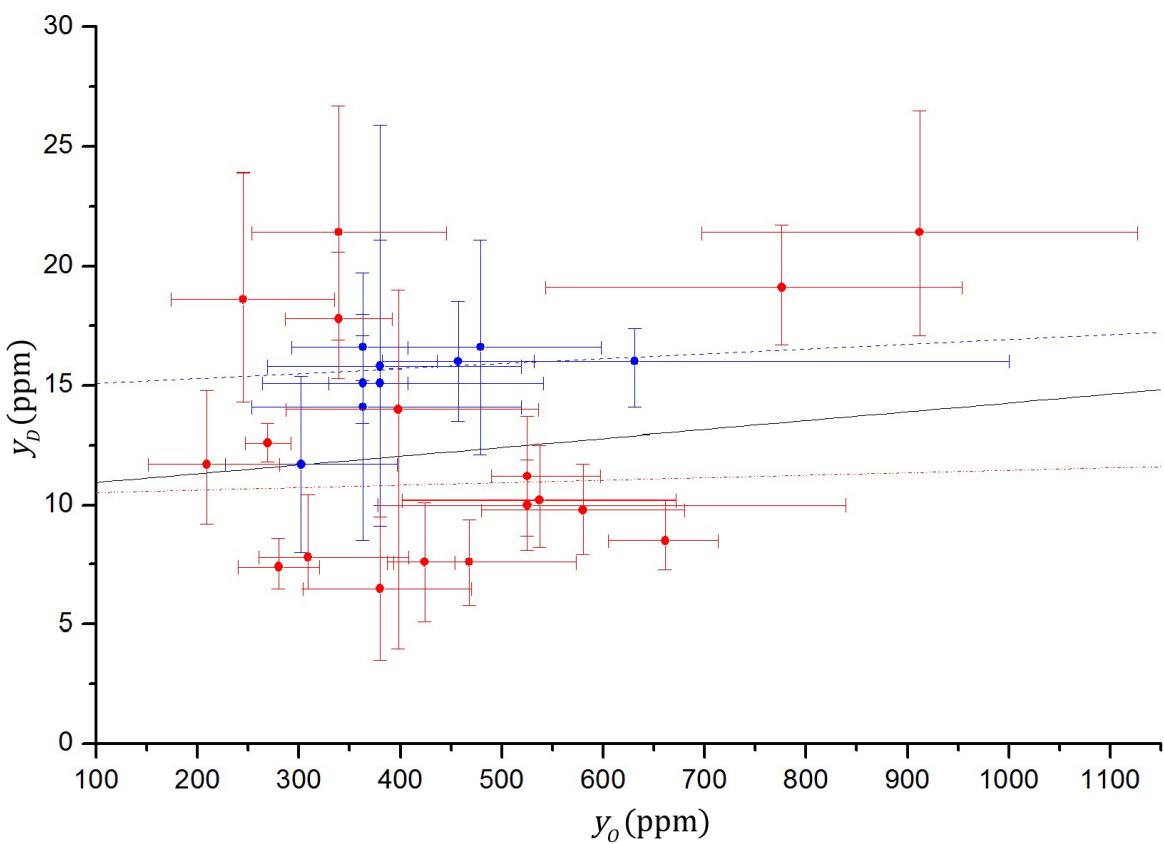
Za kiseonik sve korelace vrednosti daju slabe zavisnosti, pri čemu je najveća unutar LB. Generalno smo za sve elemente videli da je ponašanje uniformnije unutar LB, što ima smisla jer pokazuje da je LB dobro homogenizovan. Sa grafika 20 i 21 se može videti da se y_O mnogo više rasejava od y_D , što predstavlja veliki problem da se pokaze da postoji pozitivna korelacija između deuterijuma i kiseonika.

Na graficima 20 i 21 su predstavljeni podaci iz tabela 5 i 14. Na grafiku 20 je predstavljena zavisnost y_D od y_O unutar i izvan Lokalnog mehura.

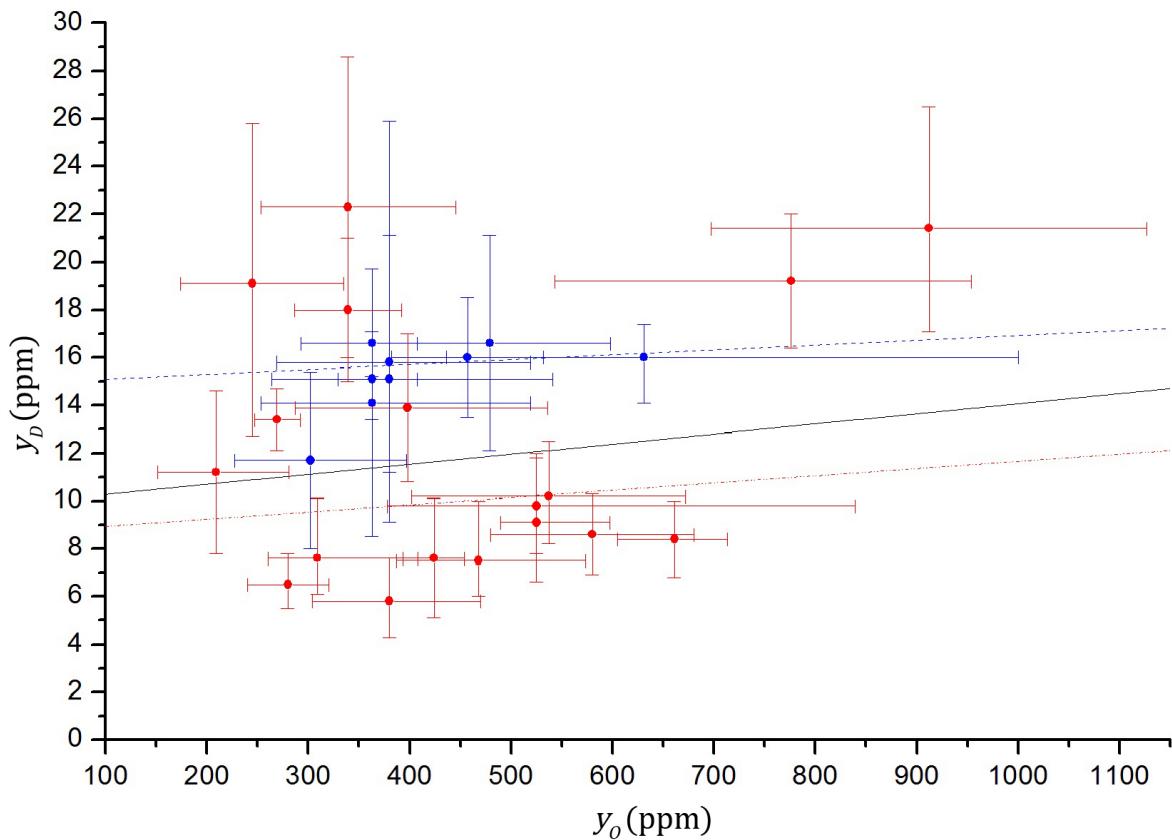
Mesto	k	σ_k	n	σ_n	R^2	Pirsonov koef.	Spirmanov koef.
y_D vs y_O ISM	0,004	0,003	9,85	1,33	-0,016	0,17	0,026
y_D vs y_O izvan LB	0,003	0,003	8,63	1,48	-0,045	0,20	0,05

Tabela 16: Koeficijenti linearne regresije i Pirsonov koeficijent korelacije r zavisnosti za korigovane vrednosti y_D od y_O

Na grafiku 21 je predstavljena zavisnost y_D od y_O unutar i izvan Lokalnog mehura za korigovane vrednosti y_D izvan LB. Varijacije za y_O su mnogo veće od varijacija za y_D , što predstavlja problem za model prašine. Linearna regresija daje vrlo slabe rezultate. Za Lokalni mehur R^2 daje negativne vrednosti i približne nule. Konstantna vrednost je bolji fit, od linearne regresije. Koeficijenti korelacije su vrlo slabi. Najbolji koeficijent korelacije daje vrednost od 0,55 unutar LB. Od svih refraktornih metala kiseonika daje najmanju korelaciju i predstavlja najveći problem za model vezivanja D za prašinu.



Grafik 20: Zavisnost y_D od y_O u ISM-u



Grafik 21: Zavisnost y_D od y_O za korigovane vrednosti y_D izvan LB

7 Diskusija i zaključak

Merenja zastupljenosti deuterijuma u našoj galaksiji daju neočekivane rezultate. Prostorne varijacije zastupljenosti D do sada predstavljaju nerešenu misteriju. U ovom radu je testirana jedna od mogućih rešenja, a to je da se D veže za prašinu u dovoljnoj meri da objasni prostorne varijacije zastupljenosti. Ono što je poznato, je to da se refraktorni metali Fe, Si, O, Ti vežu za prašinu. U radu Lallement et al. (2008) [30] je pokazano da Ti i D ima vrlo jaku pozitivnu korelaciju. U ovom radu se testirala zavisnost zastupljenosti D u odnosu na Fe, Si i O u našoj galaksiji u gasu. Ako se D u dovoljnoj meri vezuje za prašinu, najmanje vrednosti D u gasu bi trebalo da odgovaraju najmanjim vrednostima refraktornih metala, gde bi postojala jaka pozitivna korelacija između ove dve veličine. Izabrana je linearne skala, jer se onda može uraditi Pirsonova i Spirmanova analiza. Ako se pokaže da D ima zadovoljavajuću pozitivnu korelaciju sa refraktornim metalima, onda se može reći da se D u dovoljnoj meri vezuje za prašinu. Onda bi prave zastupljenosti D u našoj galaksiji bile najveće izmerene vrednosti u gasu. Za manje vrednosti zastupljenosti, D se vezao za prašinu, i prešao iz gasovitog u čvrsto stanje, pri čem se meri zastupljenost samo u gasovitom stanju.

Na velikim crvenim pomacima, u ovom radu izračunata zastupljenost deuterijuma je $y_p = (25,46 \pm 0,24)$ ppm, i u vrlo dobrom je slaganju sa teorijskom primordijalnom zastupljenosti deuterijuma (y_D)_{teo} = $(26,06^{+1,81}_{-1,84})$ ppm.

U ovom radu smo došli do rezultata da je otežana srednja vrednost zastupljenost deuterijuma u našoj galaksiji za današnju epohu $y_D = (13 \pm 5)$ ppm. Iz ovoga sledi da je koeficijent astracije $f_D = 1,959$, što je veća vrednost vrednosti predvedene iz hemijskih modela ($\approx 1,5$ Chiappini 2002 [24]). Izračunata zastupljenost u ovom radu je manja od vrednosti $y_D = (23,1 \pm 2,4)$ ppm u radu Linsky et al. (2006) [7], ako se D veže za prašinu prave vrednosti zastupljenosti D su najveće izmerene vrednosti. U radu Prodanovic, Fields & Steigman (2010) [6] pomoću Bajesove analize se dobija da je prava zastupljenost D u ISM-u $y_D = (20 \pm 1)$ ppm.

Da li postoji dovoljno dobra korelacija između zastupljenosti D i refraktornih metala? U ovom radu koristili smo Pirsonovu i Spirmanovu analizu. Za većinu kombinacija y_D od y_{Fe} , y_D od y_{Si} , u ISM-u, unutar LB, izvan LB, koeficijenti korelacije pokazuju vrlo slabe pozitivne korelacije. Najbolji korelaciju ima zavisnost y_D od y_{Si} unutar LB od 0,80. Sledeća najbolja korelacije je takođe za Si, ali unutar LB i iznosi 0,69. Linearne regresije daju različite vrednosti parametara linearne funkcije unutar, izvan Lokalnog mehura, i ISM. Koeficijent determinacije R^2 je mali većinu slučajeva, što znači da linearna regresija ima velika odstupanja od izmerenih vrednosti. Najbolji je takođe za Si, izvan i unutar LB. Za Fe je vrlo mali koeficijent determinacije, a za O daje negativne vrednosti, što znači da horizontalna linija daje bolji fit od linearne regresije. Kiseonik pokazuje najmanju korelaciju sa deuterijumom, i vidi se da kiseonik mnogo više varira od deuterijuma. Korigovane vrednosti ne daju mnogo bolje korelacije za Fe, Si i O.

Na osnovu analize u ovom radu, možemo zaključiti da zastupljenosti D u gasu pokazuju, skoro nikakvu ili vrlo slabu linearnu i monotonu zavisnost sa Fe, Si i O. Najbolju korelaciju D ima sa Si. Model vezivanja deuterijuma u prašini samostalno ne može da objasni varijacije zastupljenosti D u našoj galaksiji, već je potrebno koristiti druge modele, (npr. prililiv svežeg gasa siromašnim na metale) ili neka kombinacija modela, koja su u slaganju sa evolucijom hemijskih elemenata. U ovom radu korelacije između Fe i D je mnogo slabija u poređenju sa korelacijom u radu Lallement et al. (2008) [30], gde je Spirmanov koeficijent u ovom radu 0,42 a u radu Lallement et al. (2008) [30] Spirmanov koeficijent iznosi 0,99. Po tome koliko se refraktorni elementi troše u prašini, očekuje se najbolja korelacija sa D za Fe. Međutim u ovom radu vidi se da najbolju korelaciju ima Si. Kiseonik je najmanje refraktoran u poređenju sa Fe i Si, i očekuje se da on varira, što je u redu. Međutim D nije jako refraktoran kao i O, a pokazuje suprotan trend unutar Lokalnog mehura, gde D ne varira a O varira.

8 Literatura

Literatura

- [1] C. Grupen, *Astroparticle physics*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [2] B. D. Fields, P. Molaro, and S. Sarkar, “Big-bang nucleosynthesis,” *arXiv preprint arXiv:1412.1408*, 2014.
- [3] A. Coc and E. Vangioni, “Primordial nucleosynthesis,” *International Journal of Modern Physics E*, vol. 26, no. 08, p. 1741002, 2017.
- [4] A. Coc, J.-P. Uzan, and E. Vangioni, “Standard big bang nucleosynthesis and primordial cno abundances after planck,” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 2014, no. 10, p. 050, 2014.
- [5] A. Coc and E. Vangioni, “Primordial nucleosynthesis,” *International Journal of Modern Physics E*, vol. 26, no. 08, p. 1741002, 2017.
- [6] T. Prodanović, G. Steigman, and B. D. Fields, “The deuterium abundance in the local interstellar medium,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 406, no. 2, pp. 1108–1115, 2010.
- [7] J. L. Linsky, B. T. Draine, H. Moos, E. B. Jenkins, B. E. Wood, C. Oliveira, W. P. Blair, S. D. Friedman, C. Gry, D. Knauth, *et al.*, “What is the total deuterium abundance in the local galactic disk?”, *The Astrophysical Journal*, vol. 647, no. 2, p. 1106, 2006.
- [8] T. F. Adams, “The detectability of deuterium lyman alpha in qsos,” *Astronomy and Astrophysics*, vol. 50, p. 461, 1976.
- [9] M. Pettini, “Deuterium at high redshifts: recent advances and open issues,” *arXiv preprint astro-ph/0601428*, 2006.
- [10] E. Zavarygin, J. Webb, V. Dumont, and S. Riemer-Sørensen, “The primordial deuterium abundance at z abs= 2.504 from a high signal-to-noise spectrum of q1009+ 2956,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 477, no. 4, pp. 5536–5553, 2018.
- [11] P. Collaboration *et al.*, “Planck intermediate results: Xvi. profile likelihoods for cosmological parameters,” 2014.
- [12] P. A. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, A. Banday, R. Barreiro, J. Bartlett, N. Bartolo, *et al.*, “Planck 2015 results-xiii. cosmological parameters,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 594, p. A13, 2016.
- [13] B. E. Wood, J. L. Linsky, G. Hébrard, G. M. Williger, H. W. Moos, and W. P. Blair, “Two new low galactic d/h measurements from the far ultraviolet spectroscopic explorer,” *The Astrophysical Journal*, vol. 609, no. 2, p. 838, 2004.
- [14] G. Hebrard, “Deuterium variations in the interstellar medium of the milky way,” in *Astrophysics in the Far Ultraviolet: Five Years of Discovery with FUSE*, vol. 348, p. 47, 2006.
- [15] C. M. Oliveira and G. Hébrard, “Variations in the d/h ratio of extended sight lines from far ultraviolet spectroscopic explorer observations,” *The Astrophysical Journal*, vol. 653, no. 1, p. 345, 2006.
- [16] M. A. De Avillez and M.-M. Mac Low, “Mixing timescales in a supernova-driven interstellar medium,” *The Astrophysical Journal*, vol. 581, no. 2, p. 1047, 2002.
- [17] W. Blair, C. Oliveira, G. Hébrard, K. Sembach, S. Friedman, and H. Moos, “Deconvolving the gamma2 velorum sight line using ix as a foreground probe,” in *Astrophysics in the Far Ultraviolet: Five Years of Discovery with FUSE*, vol. 348, p. 73, 2006.
- [18] B. T. Draine, “Can dust explain variations in the d/h ratio?,” *arXiv preprint astro-ph/0410310*, 2004.
- [19] L. P. Keller, S. Messenger, and J. P. Bradley, “Analysis of a deuterium-rich interplanetary dust particle (idp) and implications for presolar material in idps,” *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, vol. 105, no. A5, pp. 10397–10402, 2000.

-
- [20] E. Peeters, L. Allamandola, C. Bauschlicher Jr, D. Hudgins, S. Sandford, and A. Tielens, “Deuterated interstellar polycyclic aromatic hydrocarbons,” *The Astrophysical Journal*, vol. 604, no. 1, p. 252, 2004.
 - [21] B. T. Draine, “Interstellar dust grains,” *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 41, no. 1, pp. 241–289, 2003.
 - [22] D. Romano, M. Tosi, C. Chiappini, and F. Matteucci, “Deuterium astration in the local disc and beyond,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 369, no. 1, pp. 295–304, 2006.
 - [23] M. Pettini, B. J. Zych, M. T. Murphy, A. Lewis, and C. C. Steidel, “Deuterium abundance in the most metal-poor damped lyman alpha system: converging on ω_b , 0 h 2,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 391, no. 4, pp. 1499–1510, 2008.
 - [24] C. Chiappini, A. Renda, and F. Matteucci, “Evolution of deuterium, 3he and 4he in the galaxy,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 395, no. 3, pp. 789–801, 2002.
 - [25] T. Prodanović and B. D. Fields, “Fuse deuterium observations: a strong case for galactic infall,” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 2008, no. 09, p. 003, 2008.
 - [26] P. C. Frisch, J. M. Dorschner, J. Geiss, J. M. Greenberg, E. Grün, M. Landgraf, P. Hoppe, A. P. Jones, W. Krätschmer, T. J. Linde, *et al.*, “Dust in the local interstellar wind,” *The Astrophysical Journal*, vol. 525, no. 1, p. 492, 1999.
 - [27] J.-P. Meyer, L. O. Drury, and D. C. Ellison, “Galactic cosmic rays from supernova remnants. i. a cosmic-ray composition controlled by volatility and mass-to-charge ratio,” *The Astrophysical Journal*, vol. 487, no. 1, p. 182, 1997.
 - [28] E. Jenkins, A. McWilliam, and M. Rauch, “Origin and evolution of the elements,” *Cambridge: Cambridge University*, vol. 339, 2004.
 - [29] M. Asplund, N. Grevesse, and A. Sauval, “Cosmic abundances as records of stellar evolution and nucleosynthesis (asp conf. ser. 336), ed,” *TG Barnes III & FN Bash (San Francisco, CA: ASP)*, vol. 25, 2005.
 - [30] R. Lallement, G. Hébrard, and B. Welsh, “Exploring interstellar titanium and deuterium abundances and other correlations,” *Astronomy & Astrophysics*, vol. 481, no. 2, pp. 381–392, 2008.
 - [31] J. L. Linsky, “The total deuterium abundance in the local galactic disk: decisions and implications,” *Proceedings of the International Astronomical Union*, vol. 5, no. S268, pp. 53–58, 2009.
 - [32] J. Kruk, C. Oliveira, K. Sembach, and B. Savage, “Abundances of d, o, and other species towards the halo star hd 93521,” in *Astrophysics in the Far Ultraviolet: Five Years of Discovery with FUSE*, vol. 348, p. 85, 2006.
 - [33] C. M. Oliveira, H. W. Moos, P. Chayer, and J. W. Kruk, “Variations in d/h and d/o from new fuse observations1,” *arXiv preprint astro-ph/0601114*.

9 Biografija

Martin Hložan je rođen 30.12.1991. god. u Novom Sadu. Osnovnu školu „Desanka Maksimović“ u Bačkoj Palanci završio 2007. god kao nosilac Vukove diplome. Srednju školu „Gimnazija Jan Kolar sa domom učenika“ u Bačkom Petrovcu je završio 2011. god kao nosilac Šturove diplome. Osnovne studije fizike, istraživački smer, završio u septembru 2017. god. sa prosekom 8,05 na Prirodnom matematičkom fakultetu, Univerzitet u Novom Sadu. Nakon osnovnih studija upisuje master akademske studije fizike, smer astronomija sa astrofizikom, na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu.



10 Ključna dokumentacija

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada: Master rad

VR

Autor: Martin Hložan

AU

Mentor: Prof. dr Tijana Prodanović

MN

Naslov rada: Problem zastupljenosti deuterijuma u međuzvezdanoj sredini

NR

Jezik publikacije: srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda: srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja: Republika Srbija

ZP

Uže geografsko područje: Vojvodina

UGP

Godina: 2018

GO

Izdavač: Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa: Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

MA

Fizički opis rada: 10 poglavlja/37 strana/2 slike/19 grafika/ 16 tabele

FO Naučna oblast: Fizika

NO

Naučna disciplina: Astrofizika

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči: deuterijum, zastupljenost deuterijuma, korelacija, refraktorni metali

PO

UDK

Čuva se: : Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU

Važna napomena: nema

VN

Izvod: Zastupljenost deuterijuma u međuzvezdanoj sredini pokazuje prostorne varijacije. Jedna od ideja da se objasne prostorne varijacije je da se deuterijum veže za prašinu, i tako ukloni iz gasne faze u kojoj ga merimo. U radu je analizirana korelacije između zastupljenosti deuterijuma i zastupljenosti refraktornih metala Fe, Si i O u međuzvezdanoj sredini u gasu. Refraktorni metali se u značajnoj meri vežu za prašinu. Korelacija je testirana pomoću Pirsonove i Spirmanove analize. Sva tri refraktorna metala pokazuju slabu korelaciju sa D, gde najjaču korelaciju pokazuje Si unutar i izvan Lokalnog mehura.

IZ

Datum prihvatanja teme od NN veća: Oktobar, 2018

DP

Datum odbrane: 30.10.2018.

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik: Prof. dr Miodrag Krmar, redovni profesor

Član: Prof. dr Svetlana Lukić-Petrović, redovni profesor

Član: Prof. dr Olivera Klisurić, redovni profesor

Član: Prof. dr Dušan Marčeta, docent

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 : Martin Hložan

AU

Mentor: Prof. dr Tijana Prodanović

MN

Title: The problem of deuterium abundance in interstellar medium

TI

Language of text: Serbian (Latin)

LT

Language of abstract: English

LA

Country of publication: Serbia

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year : 2018

PY

Publisher : Author's reprint

PU

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

PP

Physical description: 10 chapters/37 pages/2 pictures/19 graphs/ 16 tables

PD *Scientific field:* Physics

SF

Scientific discipline: Astrophysics

SD

Subject/Key words: deuterium, abundance of deuterium, correlation, refractory metals

SKW

UDK

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

HD

Note: None

N

Abstract: Abundance of deuterium in interstellar medium shows spatial variations. One possible solution is deplation of deuterium on the dust grains. This way D is removed from gas and measurements show lower values then expected. In this work we analyse correlation between abundance of deuterium and abundance of refractory metals (Fe, Si, O) in gas phase in ISM. Its important to note that refractory metals have very high deplation rate in dust grains. We use Pearson and Spearman analysis to find correlation coefficients of D and refractory metals. All three metals shows very low correlation. Out of three analysed metals, Si has strongest corelation in Local Bubble and outside of the Local Bubble.

AB

Accepted by the Scientific Board: October, 2018

ASB

Defended on: October 30th, 2018

DO

Thesis defend board:

DB

President: Prof. dr Miodrag Krmar, Full professor

Member : Prof. dr Svetlana Lukić-Petrović, Full professor

Member : Prof. dr Olivera Klisurić, Full professor

Member: Prof. dr Dušan Marčeta, Docent