

UDC 539.1 Nuclear physics. Atomic physics. Molecular physics

მეტასტაბილური ნაწილაკები იონურ წყაროში

მალხაზ გოჩიტაშვილი, რამაზ ლომსაძე, გოგიტა პაპალაშვილი

ივ.ჯავახიშვილის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი, ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი, ფიზიკის დეპარტამენტი, თბილისი, ჭავჭავაძის 3.

e-mail: malkhaz.gochitashvili@tsu.ge

მოცემულ სამუშაოში ძირითადად განხილულია ორი ტიპის იონური წყარო: ელექტრონულ დაჯახებითი და მაღალსიხშირული განმუხტვის წყაროები. კონკრეტულად შეისწავლება იონურ წყაროში O^+ იონების მეტასტაბილურ $O^+(^2P)$ და $O^+(^2D)$ მდგომარეობებში ფორმირების მექანიზმი. ნაჩვენებია, რომ მაღალ სიხშირულ იონურ წყაროში სამუშაო აირის წნევის გაზრდით, მეორადი დაჯახებების გამო, მიმდინარეობს ალგუნებული O^+ იონების მდგომარეობების ჩაქრობის (გადასვლა ძირითად ელექტრონულ მდგომარეობაში) პროცესი. მეტასტაბილური ნაწილაკების კონცენტრაციის ცვლილებაზე კონტროლი წყაროში განხორციელებულია დამოუკიდებელ ექსპერიმენტში. კერძოდ O^+ - N_2 დაჯახების პროცესში, იონების ენერჯის ფიქსირებული მნიშვნელობისათვის შეისწავლებოდა მოლეკულური აზოტის N_2^+ იონის პირველი უარყოფითი სისტემის ზოლის (გადასვლა $B^2\Sigma_u^+ - X^2\Sigma_g^+$) $(0,0)$, $\lambda=391.45\text{nm}$) გამოსხივების ინტენსივობის ცვლილება წყაროში სამუშაო პირობების - წნევის ცვლილებაზე დამოკიდებულებით.

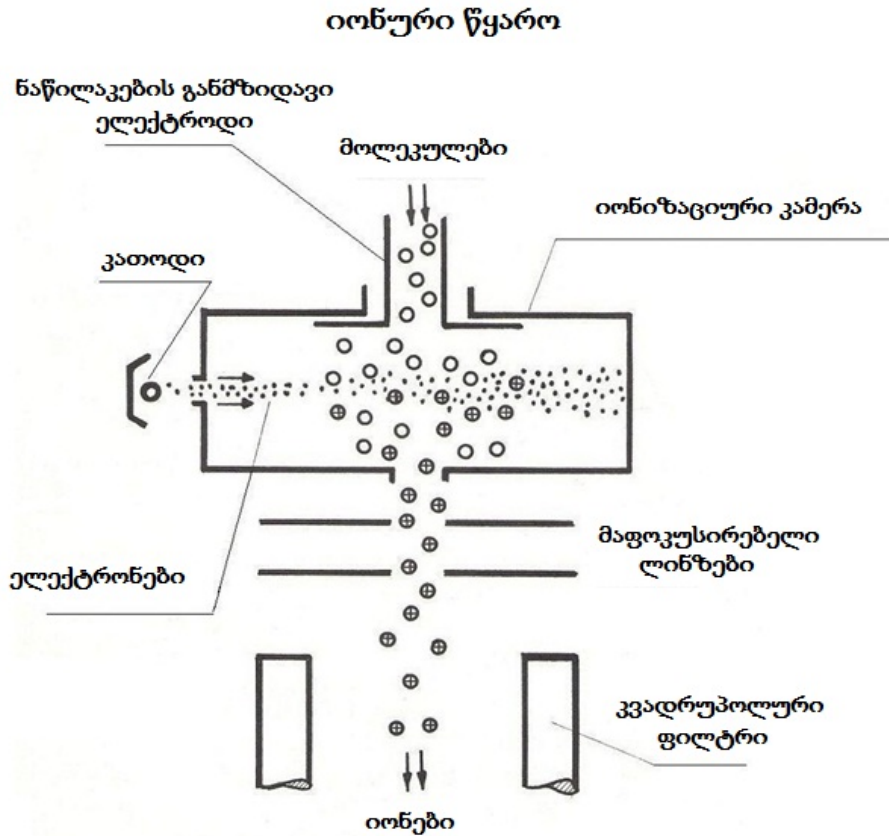
საკვანძო სიტყვები: მეტასტაბილური ნაწილაკები, იონების წყარო, ალგუნება, დისოციაცია.

ატომური ჟანგბადის იონები შეიძლება ფორმირდებოდნენ $O^+(^4S)$ ძირითად და მეტასტაბილურ 2P (სიცოცხლის ხანგრძლივობა 5წმ) და 2D (სიცოცხლის ხანგრძლივობა 3,6სთ) მდგომარეობებში. ეს იონები მნიშვნელოვან როლს თამაშობენ ასტროფიზიკურ პლაზმაში. ამ მიმართულებით ჩატარებულია უამრავი კვლევა ლაბორატორიულ პირობებში [1-16]. O^+ იონების $H_2, O_2, N_2, CO, CO_2, CS_2$ და სხვა მოლეკულებთან დაჯახებისას შესწავლილია გადამუხტვის პროცესები. ნაჩვენებია, რომ არადრეკად პროცესებში სხვადასხვა მდგომარეობაში მყოფი იონებისათვის სრული კვეთის განსაზღვრა ძალზედ რთულია, რადგან პრაქტიკულად შეუძლებელია ცალკეული მეტასტაბილის წილის დადგენა იონების პირვანდელ ნაკადში, რომელიც ფორმირდება წყაროში [2,3]. ექსპერიმენტებმა აჩვენა, რომ შესაძლებელია ნაკადიდან იონების გამოყოფა ძირითად 4S მდგომარეობაში [1-3]. ამისათვის გამოყენებულია, ცალკეულ კამერაში, ნაკადის შესუსტების მეთოდი აზოტის მოლეკულურ გარემოში. გადამუხტვის კვეთი მეტასტაბილური 2P და 2D ნაწილაკებისათვის დაჯახების მცირე ენერგეტიკულ არეში $E < 1\text{keV}$ ორი რიგით დიდია, ვიდრე იონებისათვის ძირითად ელექტრონულ მდგომარეობაში [1]. გადამუხტვის კვეთაში მნიშვნელოვანი განსხვავების გამო სპეციალურ შესუსტების კამერაში ხდებოდა იონების გაფილტვრა და კამერიდან

პრაქტიკულად გამოდიოდნენ იონები ძირითად ^4S მდგომარეობაში. ამ მეთოდით შეუძლებელია ცალცალკე ^2P და ^2D მეტასტაბილებისათვის კვეთის განსაზღვრა. მოცემულ სამუშაოებში შედეგები მოყვანილია მხოლოდ ნარევისათვის [2-10]. გარკვეულ ნაწილში სამუშაოებისა იონების ფორმირება ხდება ელექტრონული ბომბარდირებით, როდესაც ელექტრონების ენერჯის ცვლილება ხდება მაღალი სიზუსტით (მეათედი ევრიგის). ამ შემთხვევაში შესაძლებელია იონების ფორმირება მხოლოდ ძირითად მდგომარეობაში ან ნარევის სახით ძირითად ^4S და მეტასტაბილურ ^2D (აგზნების ენერჯია 3,32ევ) მდგომარეობებში [3]. მაგრამ იონების დენი არის მცირე და შეუძლებელია გაზომვების ჩატარება მაღალი სიზუსტით, განსაკუთრებით აგზნების პროცესებისათვის. სამუშაოში [19] გამოკვლეულია O^+ იონების ფარდობითი გამოსავალი, სხვადასხვა ელექტრონულ მდგომარეობაში ძირითად ^4S და ^2P აღზნებულში შესაბამისად, O_2 მოლეკულის დისსოციაციის პროცესში ელექტრონული დაჯახებით. კვლევა $e - \text{O}_2$ წყვილისათვის ჩატარებულია ელექტრონების ენერჯისათვის ზღურბლიდან 450 ევ-მდე. ნაჩვენებია, რომ მეტასტაბილების წარმოქმნის კვეთი ^2P მდგომარეობაში მკვეთრად ეცემა ძირითად ^4S ელექტრონულ მდგომარეობასთან შედარებით ელექტრონების ენერჯის ზრდასთან ერთად ენერგეტიკულ არეში $E > 130$ ევ (შეესაბამება კვეთის მაქსიმუმს). გაზომვები ჩატარებულია „თავისუფალი ფრენის დროის განსაზღვრის“ სპექტროსკოპიული მეთოდის გამოყენებით.

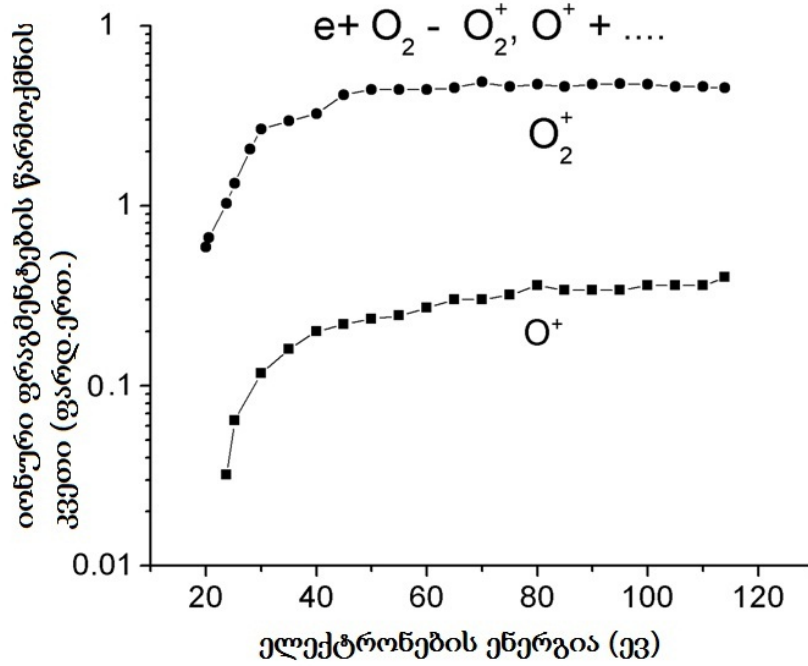
ჩვენს სამუშაოში შემუშავებულია მეთოდი, რომელიც საშუალებას მოგვცემს ვაკონტროლოთ იონური წყაროდან გამოსული ნაკადის შემადგენლობა. ამისათვის გამოყენებულია ოპტიკური სპექტროსკოპიის მეთოდი, რომელიც გაცილებით მგრძობიარეა ნაკადის შესუსტების მეთოდთან შედარებით. წყაროში სამუშაო პირობების (წნევა, სიმძლავრე) შეცვლა მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს იონური, ატომური ხაზებისა და მოლეკულური ზოლების გამოსხივების ინტენსივობაზე. ეს ცვლილება უშუალო ინფორმაციას გვაძლევს იონურ ნაკადში კომპონენტების შემადგენლობის ცვლილების შესახებ. ამ მიმართულებით ჩვენ ჩავატარეთ წინასწარი ექსპერიმენტული გამოკვლევა O^+ იონების აზოტის მოლეკულებთან დაჯახების პროცესში. გამოსხივების ხილულ არეში (400-800ნმ) შეისწავლებოდა აზოტის პირველი უარყოფითი და მეინელის სისტემების შესაბამისი ზოლოვანი სპექტრის აგზნება. ექსპერიმენტში გამოყენებული იყო მაღალსიხშირული (ტონემანის ტიპის) იონური წყარო. ნაჩვენებია, რომ წყაროში დაბალი წნევისა (10^{-3} ტორი) და მაღალი სიმძლავრის პირობებში (ვზრდით ანოდურ ძაბვას) იონურ ნაკადში მეტასტაბილური იონების წილი შეადგენდა დაახლოებით 20%. წნევის გაზრდით წყაროში მნიშვნელოვნად იზრდება (>95%) იონების წილი ძირითად მდგომარეობაში. ცხადია, რომ ამ შემთხვევაში მნიშვნელოვან როლს თამაშობს იონების ფილტრაცია იონური ზონდის შიგნით, სადაც ეფექტურად მიმდინარეობს გადამუხტვის პროცესი. იონურ წყაროში სხვადასხვა აირის ნარევის გამოყენებით საშუალება გვქონდა შეგვეცვალა (გაგვეზარდა) მეტასტაბილების წილი იონურ ნაკადში.

პირდაპირი და დისოციაციური იონიზაციის პროცესები შესწავლილ იქნა კვადრუპოლურ მასსპექტრომეტრზე. ნახ.1 მოცემულია იონების წყაროს სქემატური სურათი.

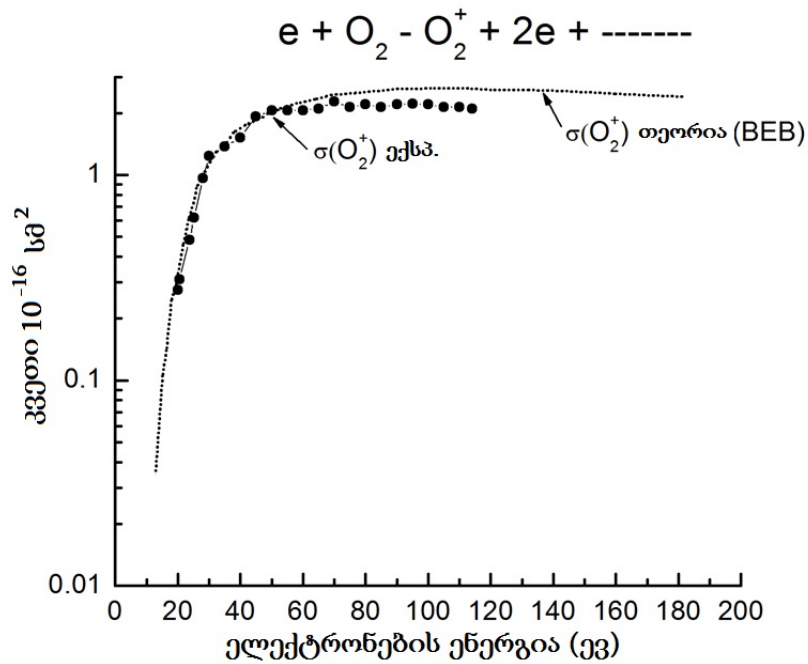


ელექტრონების აჩქარება შესაბამის ენერგიამდე რეალიზდებოდა კათოდსა და იონიზაციურ კამერას შორის ამაჩქარებელი პოტენციალის (15-200ვ) მოდებით. მოლეკულური აირის შეშვება იონიზაციურ კამერაში ხდებოდა ელექტრონების ნაკადის მართობულად. ელექტრონ-მოლეკულური დაჯახების შედეგად მიღებული დამუხტული ნაწილაკები (მოლეკულური იონები და ატომური იონები) ამოიწოვებოდნენ ურთიერთქმედების არიდან აჩქარდებოდნენ 100ევ ენერგიამდე, გაივლიდნენ კვადრუპოლურ მასს-ანალიზატორს და რეგისტრირდებოდნენ მეორადი ელექტრონული გამამლიერებლის საშუალებით. მიღებული სიგნალი მუშავდებოდა პროგრამულად და მოიცემოდა როგორც ციფრული ასევე გრაფიკული სახით.

მე-2 ნახაზზე მოყვანილია გაზომვის შედეგები $e-O_2$ წყვილისათვის. მიღებული შედეგები O_2^+ იონებისათვის, ენერგიისათვის $E=100$ ევ, დავაკალიბრეთ [17] სამუშაოში მოცემულ კვეთის აბსოლუტურ მნიშვნელობაზე და შევადარეთ თეორიული გამოთვლის შედეგებს [18] (ნახ.3).



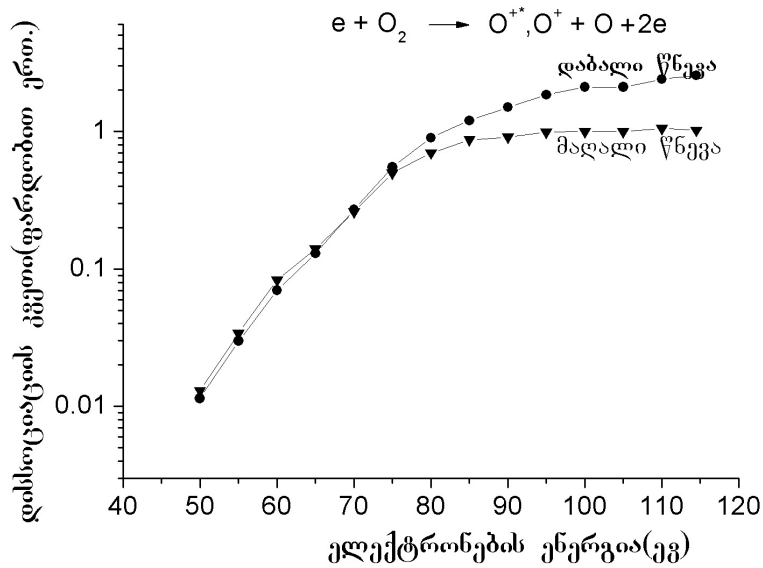
ნახ.2



ნახ.3

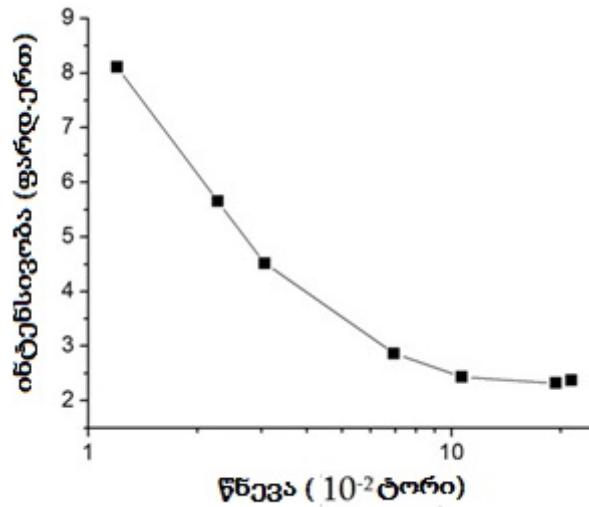
თანხვედრა თეორიულ გამოთვლებთან დამაკმაყოფილებელია. მე-4 ნახაზზე მოცემულია O^+ იონების ფორმირების კვეთის (ფარდობით ერთ.) დამოკიდებულება ელექტრონების ენერგიაზე, როდესაც ელექტრონული დაჯახების წყაროში შეშვებულია აირი ორი სხვადასხვა წნევის პირობებში (განსხვავება 5ჯერ).

ზღურბლურ ენერგეტიკულ არეში არ დაიკვირვება ისეთი სახის განსაკუთრებული თავისებურება, რაც მიუთითებდა იონების წარმოქმნის კვეთის დამოკიდებულებაზე ნაწილაკის შინაგან ელექტრონულ მდგომარეობაზე. ენერგეტიკულ დამოკიდებულებაში განსხვავება დაიკვირვება შედარებით მაღალ ენერგეტიკულ დიაპაზონში 80- 120ეე. ეს შედეგი შეიძლება აიხსნას იმით, რომ დაბალ ენერგეტიკულ ზღურბლურ არეში $E < 80$ ეე ენერგეტიკული ყოფაქცევა იონების წარმოქმნის კვეთისა იონებისთვის ძირითად $O^+(^4S)$ მდგომარეობაში და მეტასტაბილურ $O^+(^2P)$ მდგომარეობაში ერთნაირია, განსხვავება შეიძლება იყოს შედარებით მაღალი ენერგიებისათვის, რაც დასტურდება [19] სამუშაოს მონაცემებით. ამ შედეგებიდან გამომდინარე სხვადასხვა ტიპის იონური წყაროდან გამოსული იონების შემადგენლობა დამოკიდებული იქნება იონების მიღების პირობაზე. კერძოდ თუ დამჯახებელი ელექტრონების ენერგია არ აღემატება 120ეე მაშინ ჟანგბადის იონების გამოსავალი ძირითად და მეტასტაბილურ მდგომარეობაში უნდა იყოს ერთნაირი. თუმცა აუცილებლად გასათვალისწინებელია, რომ იონურ წყაროში წნევის გაზრდასთან ერთად იზრდება ალგზნების ჩაქრობისა და გადამუხტვის (მეტასტაბილების შემთხვევაში) პროცესების ალბათობა. ამიტომ კონკრეტული ტიპის წყაროსათვის აუცილებელია ყველა ფაქტორის გათვალისწინება. ეს საკითხი ჩვენ შევისწავლეთ მაღალსიხშირული იონური წყაროს მაგალითზე. წყაროს კონსტრუქციიდან გამომდინარე იონურ წყაროში შესაძლებელია დიდი ალბათობით



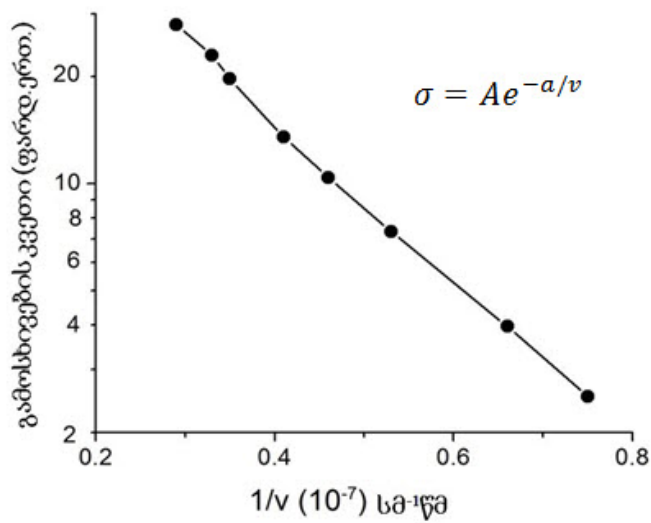
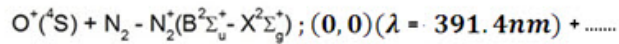
ნახ.4

მიმდინარეობდეს ალგზნებული მდგომარეობების „ჩაქრობის პროცესი“. მე-5 ნახაზზე მოყვანილია აზოტის პირველი უარყოფითი სისტემის $(0,0)(\lambda=391.45\text{მ})$ ზოლის ალგზნების კვეთის დამოკიდებულება წყაროში წნევის ცვლილებაზე. შეისწავლებოდა O^+ იონების აზოტის მოლეკულებთან დაჯახებისას გადამუხტვის პროცესი ალგზნებით. ნახაზზე მოცემულია შედეგები იონების ენერგიისათვის $E = 1$ კეე. ცნობილია, რომ ამ ენერგიისათვის მოცემული ზოლის ალგზნების კვეთი მეტასტაბილური $O^+(^2P)$ -იონებისათვის 300ჯერ აღემატება კვეთს იონებისათვის $O^+(^4S)$ ძირითად მდგომარეობაში [1].



ნახ.5

ნახაზიდან ჩანს, რომ იონურ - მაღალსიხშირულ წყაროში წნევის გაზრდით (0,0) ($\lambda = 391.45\text{მ}$) ზოლის გამოსხივების ინტენსივობა მკვეთრად ეცემა და აღწევს ნაჯერობის არეს. ამ არეში პროცენტული თანაფარდობა ძირითად და მეტასტაბილურ მდგომარეობაში მყოფ იონებს შორის აღარ იცვლება. ინტენსივობის მკვეთრად შემცირება მიუთითებს იმაზე, რომ მცირდება მეტასტაბილების ფარდობითი წილი იონურ ნაკადში და ძირითადად დაჯახებაში მონაწილეობენ იონები ძირითად $O^+(^4S)$ მდგომარეობაში. ამ ფაქტის გათვალისწინებით, შევძელით მიგველო (0,0)($\lambda=391.45\text{მ}$) ზოლის აღზნების კვეთის იონების სიჩქარეზე დამოკიდებულება. მე-7 ნახაზზე მოცემულია კვეთის დამოკიდებულება $1/v$, სადაც v -სიჩქარეა.



ნახ.6

ნახევრადლოგარითმულ სკალაზე კვეთის სიდიდის წრფივი დამოკიდებულებიდან (წრფივად კლება $1/v$ - ზრდასთან ერთად) გამომდინარეობს, რომ კვეთის სიჩქარეზე დამოკიდებულება მოიცემა შემდეგი სახით:

$$\sigma = Ae^{-a/v}$$

A და a მუდმივებია. ასეთი დამოკიდებულება დამახასიათებელია არადრეკადი პროცესებისათვის დაჯახების ადიაბატურ არეში. ამ დამოკიდებულებიდან შეიძლება გაკეთდეს დასკვნა, რომ ალგუნების პროცესი რეალიზდება ერთ არადრეკად - გადამუხტვის არხში და მასში წვლილი შეაქვს მხოლოდ ერთი ტიპის $O^{+}(^4S)$ იონებს. აქედან გამომდინარე დავასკვნით, რომ იონურ წყაროში სამუშაო პირობების ცვლილებით შეგვიძლია მნიშვნელოვნად შევცვალოთ იონური ნაკადის შემადგენლობა შიგა ელექტრონული მდგომარეობის (მეტასტაბილური და ძირითადი) მიხედვით.

ლიტერატურა:

1. Ottinger Ch., Simonis, J. Chem. Phys. 1978. Vol. 28. P. 97–112.
2. A.A. Viggiano, Robert A. Morris, and John F. Paulson, J. Chem. Phys. (1990), 93, 1483.
3. Y.Xu et al. J.Phys.B: At.Mol. and Opt.Phys. 1990, 23 1235.
4. G.D.Flesch, C.Y. Ng., J.Geoph.Res. 1991 , v96 407
5. E. Wolfrum, J. Schweinzer, and H. Winter Phys. Rev. A, (1992) 45, R4218–R4221
6. X. Li et al, J.Chem.Phys. 1997, 106, 926.
7. P. Lukas, et al. Phys.Rev.A 2002, v66, 6, 062715
8. X. Li and C. Y. Ng, Chem. Phys. (2003),118, 5260.
9. A.W. Stephan, R.R.Meier, K.F. Dymond, and S.A.Budzien (2003), J.Geophys. Res., 108,1034.
10. J. A. Rutherford and D. A. Vroom J. Chem. Phys. (2003),55, 5622.
11. B.G.Lindsey and R.F.Stebbins., Phys.Rev.A 2003, 67 022715
12. P. Lukas, et al. Phys.Rev.A 2004, v69 , 062715.
13. H.Martinez at.al. J.Phys.B: At.Mol. and Opt.Phys. 2006, 39,11, 2535.
14. Campbell, D. C. Cartwright, M. J. Brunger, and P. J. O. Teubner , JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 2006, VOL. 111, A09317
15. L Campbell and M J Brunger, Journal of Physics: Conference Series 71 (2007) 012011
16. V. Sunil Krishna and V. Singh.,Ann. Geophys., , 2009, 27, 4089–4096,
17. H.C. Straub, P. Renault, B.G. Lindsay, K.A. Smith, R.F. Stebbings, Phys. Rev. A (1996) 54, 2146.
18. W. Hwang, Y.-K. Kim, M.E. Rudd, J. Chem. Phys. (1996), 104, 2956.
19. J.J. Corr, M.A. Khakoo, A.G. McConkey, J.W. McConkey, International Journal of Mass Spectrometry, (2015) Volume 376, 15 January, p19.

Article received: 2016-11-27