دینامیک چرخه میون در محیط مخلوط دوترون و هلیوم-۳

مهدوی، محمد [1] [1] ؛ محبوبی،نصیبه [1]

[۱] بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه مازندران، بابلسر، کد پستی ۴۱۶-۴۷۴۱۵

چکیده:

با توجه به محدودیت در تشکیل مولکول میونی با $Z\geq3$، اخیراً نشان داده شده است که حالتهای مولکول میونی مقید برای مخلوط دوتریوم و هلیوم-۳ وجود خواهد داشت[1] .به همین منظور اثر تشکیل مولکول کمپلکس ($[d\mu\ ^3He]_J^+e^-$)در حالتهای اسپینی J=0, 1 و کانالهای واکنش مختلف ممکن بر آهنگ چرخه میون و بازده نوترونی مخلوط، محاسبه شده است. مشاهده می شود که در غلظت نسبی بهینه دوترون $C_d=0.6$ در اثر وجود هلیوم- ۳ , واکنشهای کانالهای مختلف برای مولکول کمپلکس باعث افزایش بازده نوترونی و در نهایت بهره سیستم خواهد شد.

کلمه کلیدی: دینامیک چرخه میون، هلیوم-۳، بازده نوترونی, مولکول کمپلکس میونی.

تئوری:

از آنجائیکه دینامیک اتمهای میونی با $Z\geq3$ باعث محدودیت در تشکیل مولکول میونی می‌شود، اکثر تحقیقات همجوشی کاتالیزور میون (μCF) برروی ایزوتوپهای هیدروژن (پروتون، دوترون و تریتیوم) متمرکز شده است. با توجه به تحقیقات جدید ارائه شده نشان داده شده است که حالتهای مولکول میونی مقید برای مخلوط دوتریوم و هلیوم- 3 وجود خواهد داشت [1] . بنابراین امکان مطالعه واکنش زیر امکانپذیر خواهد بود

$$(d\mu\ ^3He)\xrightarrow{\lambda_f}\mu+\alpha(3.6\,Mev)+p(14.67\,Mev)$$

محاسبات تئوری و آزمایشگاهی مختلفی جهت محاسبه آهنگ واکنش همجوشی مولکول میونی (μd^3He)انجام شده است[5-2]. براساس آزمایشهای انجام شده، ضریب چرخه میون با اندازه‌گیری طیف نوترونی حاصل از واکنش مخلوط D_2+^3He در شرایط آزمایشگاهی $(T=30K,\phi=1LHD)$ بدست آمده است [1].

در سالهای اخیر براساس مطالعات انجام شده برای محیط خالص D_2، ضریب چرخه میونی محاسبه شده حدود چند دور در واحد عمر میون $(2.2\mu\sec)$ گزارش شده است [7-6]. ولی در آزمایش اخیر نشان داده شده است که ضریب چرخه برای مخلوط D_2+^3He به حدود ۱۰ برابر محیط خالص D_2 افزایش

[1].E-mail: m.mahdavi@umz.ac.ir

خواهد یافت، ولی نتایج محاسبات تئوری ارائه شده با نتایج تجربی همخوانی خوبی ندارد. به نظر می‌رسد که در محاسبات تئوری، دینامیک جامع واکنش برای مخلوط $D_2+{}^3He$ منظور نشده است. به همین منظور در این طرح، تئوری دینامیک جامع برای مخلوط $D_2+{}^3He$ در نظر گرفته شده است و اثر تشکیل مولکول کمپلکس ($[d\mu^3He]^+_J e^-$) در حالتهای اسپینی $J=0,1$ و کانالهای واپاشی مختلف ممکن برآهنگ چرخه میون با حل معادلات دینامیکی وابسته به زمان حاکم بر دانسیته ذرات محیط محاسبه خواهد شد و در نهایت شرایط بهینه چگالی و غلظت نسبی ${}^3He$ محاسبه خواهد شد.

دینامیک چرخه میون در مخلوط $D_2+{}^3He$ در شکل (۱) نشان داده شده است. میون تزریق شده پس از کند شدن موجب تشکیل اتم میونی μd می‌شود. اتم میونی μd در برخورد با اتمهای هلیوم محیط با آهنگ $\lambda_{\mu dh}$ $(h={}^3He)$ مولکول کمپلکس $\left[(d\mu^3He)^+_J e^-\right]^+$ در حالت ا اسپین $J=0,1$ را تشکیل خواهد داد.

$$\mu d+{}^3He \xrightarrow{\lambda_{\mu dh}} [(d\mu^3He)^+_J e^-]^+ + e^-$$

مولکول کمپلکس $[(d\mu^3He)^+_J e^-]^+$ تشکیل شده از طریق سه کانال زیر واپاشی می کند.

$$[(d\mu^3He)^+_J e^-]^+ \rightarrow \begin{cases} \xrightarrow{\lambda_\gamma} [(d\mu^3He)^+ e^-] + \gamma \\ \xrightarrow{\lambda_p} [(\mu^3He)^+ e^-] + d \\ \xrightarrow{\lambda_e} (\mu^3He)^+ + d + e^- \end{cases}$$

λ_e، λ_γ و λ_p به ترتیب بیانگر آهنگ واپاشی مولکول کمپلکس با تولید الکترون اوژه، تابش اشعه گاما و تجزیه مولکول می باشند. در نتیجه آهنگ واپاشی کل مولکول کمپلکس را می توان بصورت زیر بیان کرد.

به ترتیب با آهنگ تولید الکترون اوژه (λ_e) و آهنگ تجزیه (λ_p) به اتم μHe و دوترون واپاشی می‌کند و یا با آهنگ λ_γ با نشر اشعه گاما باز برانگیخته می‌شود. در نتیجه مولکول کمپلکس با آهنگ کل $\lambda^{1,0}_{dec} = \lambda^{1,0}_p + \lambda^{1,0}_e + \lambda^{1,0}_\gamma$ از حالت J=1,0 به اتم μHe و d واپاشی می‌کند.

$$\lambda_{\Sigma}^{1} = \lambda_0 + \lambda_p^{J=1} + \lambda_\gamma^{J=1} + \lambda_e^{J=1} + \lambda_f^{J=1}$$
$$\lambda_{\Sigma}^{0} = \lambda_0 + \lambda_p^{J=0} + \lambda_\gamma^{J=0} + \lambda_e^{J=0} + \lambda_f^{J=0}.$$

یا اینکه مولکول کمپلکس با آهنگ λ_{10} از حالت $J=1$ به حالت پایه $J=0$ بازبرانگیخته می‌شود. یکی از فرایندهای ممکن برای مولکول کمپلکس کانال واکنش همجوش می‌باشد که با آهنگ λ_f^0 و λ_f^1 اتفاق خواهد افتاد.

$$d\mu^3He \xrightarrow{\lambda_f} p + \alpha + \mu + 18.35\,Mev$$
$$\xrightarrow{\lambda_f} \mu^5Li + \gamma(16.4\ Mev)$$

مولکول کمپلکس $[(d\mu He)^{++}_{J=1}e]^+$ در برخورد با اتمها و مولکولهای مخلوط به دو روش زیر به حالت پایه $[(d\mu He)^{++}_{J=0}2e]$ گذار انجام خواهد داد [8].

۱) تولید شبه اتم خنثی هلیوم با آهنگ $\lambda = 2\times10^{13}\,S^{-1}$ (نرمالایز به دانیسته اتم هیدروژنی، LHD، و $N_0 = 4.25\times10^{22}\,cm^{-3}$)

$$[(d\mu He)^{++}_{J=1}\ e]^+ + He \rightarrow [(d\mu He)^{++}_{J=1}2e] + He^+$$

۲) تولید الکترون اوژه خارجی با آهنگ $\lambda_{Aug}^{ext} = 8.5\times10^{11}\,S^{-1}$

$$[(d\mu He)^{++}_{J=1}2e] \rightarrow D(D_2) \rightarrow [(d\mu He)^{++}_{J=0}2e] + D(D_2)^+ + e$$

به خاطر گذار بین حالت‌های $J=1\rightarrow0$ از طریق برخورد مولکول کمپلکس با اتمها و مولکولهای مخلوط، تجمع مولکولهای کمپلکس $d\mu^3He$ در حالت J= 0 تابعی از دانسیته مخلوط می‌باشد. معادله دیفرانسیل‌حاکم بر تعداد مولکولهای کمپلکس در حالت J = 1 و J =0 را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

$$\frac{d}{dt}N^1_{d\mu^3He}(t) = \phi C_{3He}\ \lambda_{d^3He}N_{d\mu}(t) - \lambda_{\Sigma}^1 N^1_{d\mu^3He}(t)$$
$$\frac{d}{dt}N^0_{d\mu^3He}(t) = \lambda_{10}N^1_{d\mu^3He}(t) - \lambda_{\Sigma}^0 N^0_{d\mu^3He}(t)$$

در رابطه فوق $N_{\mu d}$ بیانگر دانسیته اتم میونی μd ، ϕ بیانگر دانسیته مخلوط، C_{3He} چگالی نسبی اتم ^3He ، λ_{d^3He} آهنگ تشکیل مولکول کمپلکس، λ_{10} آهنگ انتقال از حالت $J=1$ به $J=0$، $N^0_{d\mu^3He}$ و $N^1_{d\mu^3He}$ بیانگر دانیسته کمپلکس در حالت اسپینی $J=0$ و $J=1$ می باشند.

با نوشتن معادلات جامع دینامیکی وابسته به زمان حاکم بر چرخه(شکل ۱) و محاسبه ضریب چسبندگی موثر w^{eff} برای سیستم حاکم، ضریب چرخه میون در مخلوط و اثر واکنش کانالهای جانبی بر ضریب چرخه محاسبه شده است همچنین بازده نوترون به ازاء هرمیون، $Y_n = \dfrac{\phi\lambda_c}{\lambda_0 + w^{eff}\phi\lambda_c}$ به منظور مطالعه اثر ^3He برآهنگ چرخه و ضریب چرخه در شرایط فیزیکی معین محاسبه شده است.

نتیجه‌گیری :

نتایج محاسبات انجام شده در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود برای محیط خالص D_2 تعداد نوترونهای محاسبه شده حاصل از فرایند شکافت به ازای هر 10^8 میون تزریقی در شرایط بهینه $(C_d = 0.5)$ با مقادیر تجربی ارائه شده حدود 7.58% افزایش نشان می دهد. ولی با منظور نمودن اثر محصولات واکنش $D+D$ در کانالهای مختلف و اعمال نمودن کانالهای مختلف واکنش برای محیط مخلوط D_2+^3He ، بازده نوترونی برای چگالی نسبی بهینه دوترون ، $C_d = 0.6$ ، با مقادیر تجربی بازده نوترونی در شرایط فیزیکی یکسان به اندازه 83% کاهش خطا حاصل خواهد شد .بنابراین میتوان ادعا نمود که کاهش خطا ناشی از اعمال اثر کانالهای واکنش مختلف برای مولکول کمپلکس $\left[(d\mu^3He)^+_J e^-\right]^+$ می باشد

.

جدول ۱ : تعداد نوترونهای محاسبه شده ، N_n^{th} ، برای سیستم بدون حضور ^3He و مقادیر تجربی نوترون، $N_n^{\exp}$ ، به ازاء هر 10^8 میون تزریقی در دمای $T = 30K$ و $C_d = 0.5$.

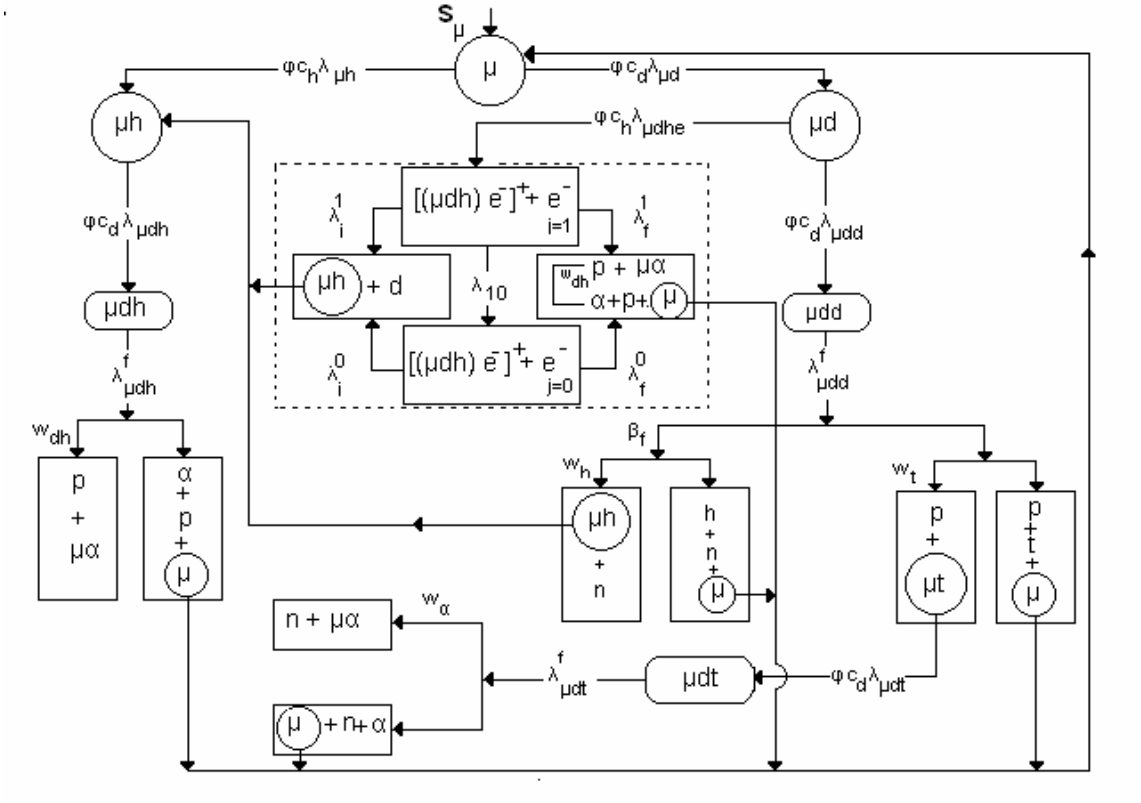
ϕ	$N_n^{th}(\times 10^6)$	$N_n^{exp}(\times 10^6)$ [9]	Error (%)
0.02	2.41	2.24	7.58

جدول ۲ : آهنگ چرخه λ_c، ضریب چسبندگی موثر و بازده نوترونی محاسبه شده، Y_n^{th}، و مقادیر تجربی ، $Y_n^{\exp}$ ، برای محیط مخلوط $D_2+{}^3He$ در دمای $T=30K$ و $\phi=0.05$.

C_d	w^{eff}	$\lambda c(\times 10^6)$	Y_n^{th}	$Y_n^{\exp}$ [1]	Error (%)
0.6	0.0081	65.24	7.8	7.7	1.29

مراجع:

[1] V.M. Bystritsky et al., Eur. Phys. J. D, 38, 3(2006).
[2] B. Gartner, P. Ackerbauer and et al., Phys. Rev.A 62, 012501(2000).
[3] E.M. Maev et al., Hyp. Inter., 118, 171(1999).
[4] W. Czaplinski et al., Phys., Lett. A, 233, 405(1997) .
[5] V.M. Bystritsky et al., Sov. Phys. JETP, 71, 5(1990).
[6] A. Scrinzi et al., Phys. Rev. 47, 6,(1993) 4691.
[7] M.R. Eskandari et al., NSJ, V. 37, 251 (2000).
[8] W. Czaplinski et al., Phys. D, 37, 4169 (1996).
[9] J. Zemeskal et al., Phys. Rev.A, 42, (1990).



شکل ۱: دینامیک جامع چرخه میون در محیط مخلوط $D_2 + {}^3He$