

محاسبه سطح مقطع و نرخ واکنش‌های $d^{6,7}Li$ با استفاده از ضریب اختزینیکی S محمد رضا اسکندری^۱، سید علیرضا علوی^{۲*}

۱- بخش فیزیک - دانشگاه شیراز

۲- گروه فیزیک - دانشگاه سیستان و بلوچستان

چکیده

واکنش‌های همجوشی هسته‌ای $d^{6,7}Li$ به دلیل محصولات متعدد و کاربردهای فراوان از اهمیت زیادی برخوردار هستند بطوریکه واکنش d^6Li در انرژی‌های پایین (کمتر از $100 keV$) در پنج کانال انجام می‌شود و محصولات با ارزشی مانند هلیوم ۳ و تریتم، تولید می‌کند. احتمال انجام واکنش از طریق هر کدام از این کانال‌ها بطور کلی تابعی از انرژی ذرات واکنش دهنده است. در این مقاله سطح مقطع انجام این واکنش از طریق هر کدام از کانال‌ها با استفاده از معادله گاموف و ضریب اختزینیکی S محاسبه شده است که درصد احتمال مربوط به هر کدام از کانال‌ها به ترتیب 34.3، 17.9، 21.1، 15.8 و 10.9 بدست آمده است. به منظور تعیین پارامتر میانگین سیگما - وی و نرخ واکنش، از روش میانگین‌گیری روی توزیع ماکسولی انرژی ذرات استفاده شده و این پارامتر با استفاده از میانگین ضریب اختزینیکی S بازای دماهای مختلف محاسبه شده است.

کلید واژه‌ها: سطح مقطع، نرخ واکنش، میانگین سیگما-وی، همجوشی هسته‌ای، واکنش‌های $d^{6,7}Li$

مقدمه

واکنش‌های همجوشی جزو با اهمیت‌ترین واکنش‌های فیزیک هسته‌ای به شمار می‌آیند به طوری که اساس کار راکتورهای همجوشی، دریافت انرژی از محصولات این واکنش‌ها است. واکنش همجوشی از طریق انجام واکنش بین هسته‌های سبک و تولید محصولات سنگین‌تر حاصل می‌شود و مکانیسم انجام آن، بسته به انرژی ذره تابیده شده، ممکن است یا از طریق تشکیل هسته مرکب و یا از طریق واکنش مستقیم باشد [1-3].

از میان واکنش‌های همجوشی، واکنش‌های همجوشی $d^{6,7}Li$ به دلیل کانال‌های متعددی که برای تولید محصول دارند و محصولات خاصی که در بازه‌های انرژی کم (keV) و زیاد (MeV) تولید می‌کنند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند و کاربردهای متعددی دارند که می‌توان از کاربرد آن‌ها بعنوان سوخت همجوشی و مولد هلیوم ۳ و تریتم در انرژی‌های پایین و یا کاربرد آن‌ها بعنوان مولد نوترون‌های سریع و اشعه γ در انرژی‌های بالا نام برد.

در این مقاله با تحلیل روش محاسبه سطح مقطع و نرخ واکنش‌های همجوشی هسته‌ای در محدوده انرژی‌های پایین ($E < 100 \text{ keV}$)، سطح مقطع و نرخ انجام واکنش $d^{6,7}\text{Li}$ از طریق هر یک از کانال‌های آن را با استفاده از پارامتر وابسته به انرژی، ضریب اختریفی S تعیین می‌کنیم با استفاده از مقادیر بدست آمده درصد احتمال انجام واکنش از طریق هر کدام از کانال‌های واکنش را ارائه می‌کنیم.

روش کار

در انرژی‌های پایین ($E < 100 \text{ keV}$) واکنش‌های همجوشی از حالت‌های تشدید فاصله دارند و از طریق مکانیسم تشکیل هسته مرکب انجام می‌گیرد. بنابراین سطح مقطع واکنش همجوشی را می‌توان بصورت حاصلضرب فرمول Breit-Wigner (خارج از ناحیه تشدید) در احتمال نفوذ به سد به فرم زیر بدست آورد:

$$\sigma = \frac{S(E)}{E} P(E) \quad (1)$$

که در آن $S(E)$ ضریب اختر فیزیکی S نامیده شده است و میزان تغییرات آن با انرژی بسیار کم است. $P(E)$ احتمال نفوذ پذیری سد پتانسیل است که بصورت نسبت شار عبوری از سد پتانسیل به شار تابیده شده تعریف و با فرمول شناخته شده گامف^{۳۱} ارائه شده است [4-6].

$$P_G \approx e^{-CE^{-1/2}} \quad (2)$$

$$C^2 \equiv E_G = \left[986.1 (Z_a Z_X)^2 \frac{\mu}{m_p} \right] \text{ keV} \quad (3)$$

در رابطه فوق μ جرم کاهیده ذرات واکنش دهنده است ($\mu = m_a m_X / m_a + m_X$) و توان دوم ثابت C با انرژی گاموف برابر است. در واکنش‌های همجوشی نرخ واکنش و یا به عبارت دیگر آهنگ تولید محصولات بسیار اهمیت دارد و برای یک واکنش همجوشی هسته‌ای که بین دو نوع ذره '1' و '2' (با چگالی ذره‌ای N_1 و N_2) رخ می‌دهد بصورت زیر ارائه می‌شود:

$$R = \iint N_1 N_2 \sigma(v) v n_1(v_1) n_2(v_2) d\bar{v}_1 d\bar{v}_2 \quad (4)$$

³⁰ Astrophysical S-Factor

³¹ Gamow

که در آن \bar{v}_1 و \bar{v}_2 به ترتیب بردارهای سرعت ذرات '1' و '2' و v سرعت نسبی ($v = |\bar{v}_1 - \bar{v}_2|$) این دو ذره است. با تعریف پارامتر $\langle \sigma v \rangle$ بصورت زیر

$$\langle \sigma v \rangle = \iint \sigma(v) v n_1(v_1) n_2(v_2) d\bar{v}_1 d\bar{v}_2 \quad (5)$$

معادله (۴) به فرم ساده‌تری درمی‌آید و تعیین مقدار نرخ واکنش تنها نیازمند تعیین کمیت $\langle \sigma v \rangle$ است.

$$R = N_1 N_2 \langle \sigma v \rangle \quad (6)$$

در انرژی‌های پایین طیف توزیع سرعت ذرات واکنش دهنده، از فرم ماکسولی تبعیت می‌کند. بنابراین مقدار کمیت $\langle \sigma v \rangle$ را با فرض معلوم بودن سطح مقطع واکنش در سرعت‌های مختلف می‌توان از طریق میانگین‌گیری σv روی طیف ماکسولی بدست آورد.

$$\langle \sigma v \rangle = \frac{6.4 \times 10^{-18}}{Z_1 Z_2} (m_p / \mu) \bar{S} \xi^2 e^{-3\xi} \text{ cm}^3 / \text{s} \quad (7)$$

$$\xi = \left(\frac{E_G}{4kT} \right)^{1/3} = 6.27 (Z_1 Z_2)^{2/3} (\mu / m_p)^{1/3} (kT)^{-1/3} \quad (8)$$

این معادله فرم نهایی کمیت $\langle \sigma v \rangle$ را در محدوده انرژی‌های پایین که سطح مقطع واکنش از ناحیه تشدید خود فاصله دارد، ارائه می‌دهد.

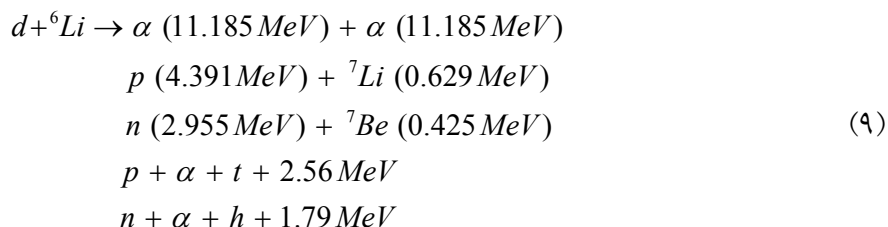
نتایج

از آنجایی که سطح مقطع این واکنش‌ها در محدوده انرژی‌های از مرتبه keV ، از ناحیه تشدید خود فاصله دارند معادله (۱) در این محدوده اعتبار دارد و با استفاده از داده‌های موجود در منبع [7] برای فاکتور S ، می‌توان سطح مقطع این واکنش‌ها را بدست آورد. برای این که بتوانیم از معادله (۷) استفاده کنیم و مقادیر کمیت $\langle \sigma v \rangle$ را در دماهای مختلف برای واکنش‌های مختلف محاسبه کنیم باید مقدار \bar{S} را داشته باشیم. \bar{S} را می‌توان از طریق میانگین‌گیری روی مقادیر $S(E)$ موجود در منبع [7] بدست آورد. جدول (۱) مقدار \bar{S} را برای واکنش dt و تعدادی از واکنش‌های $d^{6,7}Li$ ارائه می‌دهد.

جدول (۱) مقدار فاکتور \bar{S} برای تعدادی از واکنش‌های $d^{6,7}Li$ و واکنش dt

	${}^6Li(d, \alpha){}^4He$	${}^6Li(d, n){}^7Be$	${}^6Li(d, p){}^7Li$	${}^7Li(d, n\alpha){}^4He$	$t(d, n)\alpha$
\bar{S} (KeV barn)	40.28×10^3	24.81×10^3	21.00×10^3	3.76×10^1	1.74×10^4

در انرژی‌های در محدوده keV واکنش‌های $d^{6,7}Li$ از طریق کانال‌های زیر صورت می‌گیرند:



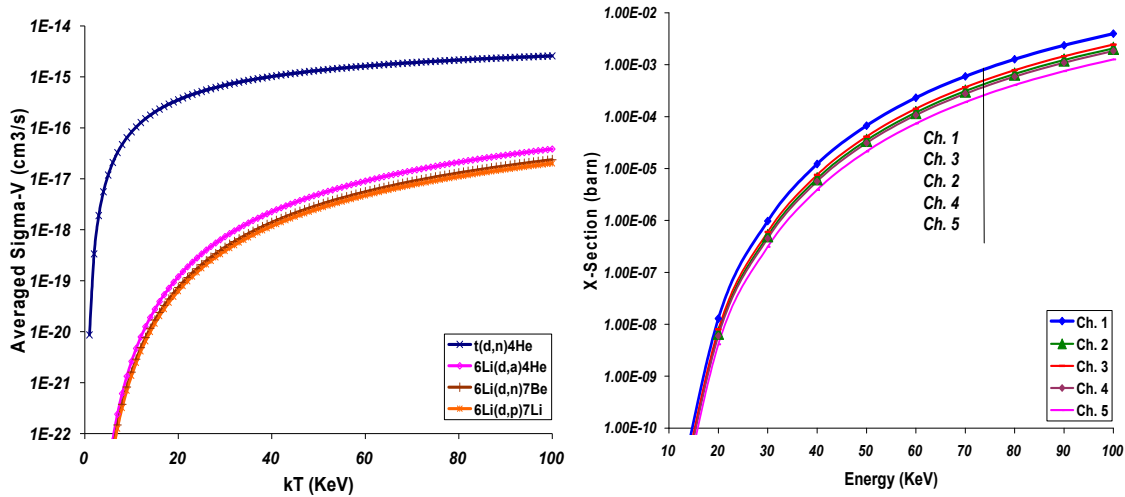
تریتیوم سنگین‌ترین ایزوتوپ هیدروژن و یک هسته‌ی رادیواکتیو است و بطور طبیعی وجود ندارد و باید بطور مصنوعی ساخته شود. هلیوم^۳ ایزوتوپ پایدار هلیوم است ولی از آنجایی که بسیار کمیاب است این هسته نیز به مانند تریتیوم، برای مصارفی که دارد باید بصورت مصنوعی (از طریق واکنش‌های هسته‌ای) تولید شود. برای تامین نیاز رآکتورهای همجوشی که سوخت آن‌ها دوتریم و تریتیوم و یا دوتریم و هلیوم^۳ است می‌توان از واکنش‌هایی استفاده کرد که مولد تریتیوم و هلیوم^۳ باشند. بنابراین واکنش d^6Li ، بعنوان واکنشی که هم مولد تریتیوم است و هم مولد هلیوم^۳ از اهمیت خاصی برخوردار است.

شکل (۱) سطح مقطع انجام واکنش d^6Li را از طریق هر کدام از کانال‌های پنج‌گانه‌ی آن در محدوده انرژی‌های کمتر از $100 keV$ نشان می‌دهد. برای بدست آوردن سطح مقطع هر کدام از کانال‌ها به‌جای مقادیر $S(E)$ از مقدار \bar{S} در معادله گاموف استفاده شده است. مقدار \bar{S} مربوط به هر کدام از کانال‌های (۱) تا (۳) در جدول (۱) ارائه شده است و مقدار آن در واحد $keV barn$ ، برای کانال‌های (۴) و (۵) به ترتیب برابر با 18.68×10^3 و 12.85×10^3 است. با استفاده از مقدار ثابت میانگین $S(E)$ (\bar{S}) مربوط به هر کدام از کانال‌ها می‌توان بطور تقریبی درصد احتمال انجام واکنش d^6Li را از طریق هر یک از این کانال‌ها در محدوده انرژی‌های کمتر از $100 keV$ بطور ثابت تعیین کرد. جدول (۲) این مقادیر را برای هر یک از کانال‌های (۱) تا (۵) نشان می‌دهد.

جدول (۲) درصد احتمال انجام واکنش از طریق هر کدام از کانال‌های (۱) تا (۵)

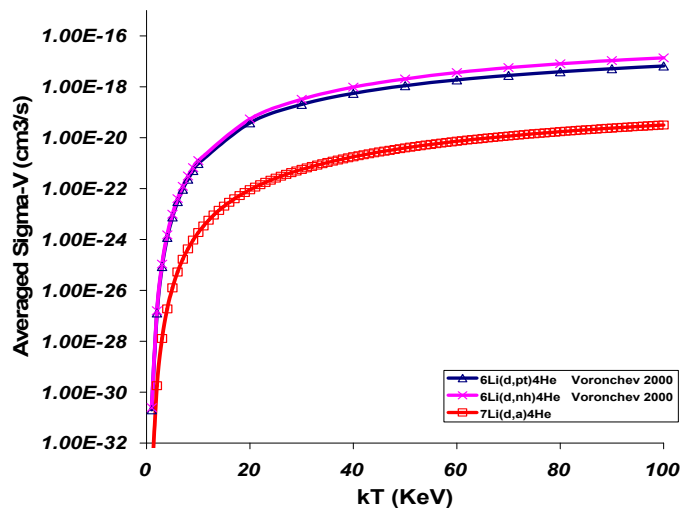
	Ch. 1	Ch. 2	Ch. 3	Ch. 4	Ch. 5
Percentage (%)	34.3	17.9	21.1	15.8	10.9

شکل (۲) نحوه تغییرات کمیت $\langle \sigma v \rangle$ با دما را برای واکنش شناخته شده dt و سه کانال عمده واکنش d^6Li را نشان می‌دهد. همانطور که می‌بینیم مقادیر $\langle \sigma v \rangle$ برای این سه کانال از واکنش d^6Li نزدیک به همدیگر است ولی نسبت به مقادیر مربوط به واکنش dt خیلی کمتر است.



شکل (۱) سطح مقطع کانال‌های مختلف d^6Li میانگین سیگما وی واکنش همجوشی

در شکل (۳) نحوه تغییرات کمیت $\langle \sigma v \rangle$ بازای دماهای مختلف، برای دو کانال دیگر از کانال‌های واکنش d^6Li (کانال مولد تریتیوم $^6Li(d,pt)^4He$ و کانال مولد نوترون و هلیوم $^6Li(d,nh)^4He$ که به ترتیب کانال‌های چهارم و پنجم این واکنش نامیده می‌شوند) و یکی از کانال‌های واکنش d^7Li نشان داده شده است. لازم به ذکر است نمودار مربوط به این دو کانال ذکر شده از داده‌های موجود در منبع [5] بدست آمده است و چون نسبت به سه کانال دیگر واکنش d^6Li مقادیر $\langle \sigma v \rangle$ خیلی کمتری دارد در نموداری مجزا نشان داده شده است.



شکل (۳) میانگین سیگما - وی واکنش همجوشی d^7Li



بحث و نتیجه‌گیری

سوخت‌های همجوشی به دو دسته سوخت‌های اصلی و سوخت‌های پیشرفته تقسیم می‌شوند [6] که برتری سوخت‌های نوع اول به نوع دوم بالا بودن سطح مقطع انجام واکنش و نرخ واکنش در انرژی‌های پایین است. در حالی که ویژگی بسیار مهم سوخت‌های نوع دوم تولید محصولات بیشتر و متنوع‌تر از طریق کانال‌های مختلف و همچنین تولید محصولات از طریق انجام واکنش‌های ثانویه (واکنش‌های ثانویه‌ای که سطح مقطع و نرخ واکنش آن‌ها بالاتر از سطح مقطع و نرخ واکنش سوخت‌های نوع اول است) می‌باشد. واکنش‌های جزو سوخت‌های پیشرفته همجوشی به حساب می‌آیند. و مهمترین ویژگی آن‌ها تولید محصولات با ارزشی مانند نوترون‌های سریع، تریتیوم و هلیوم ۳ می‌باشد. تریتیوم یکی از محصولات واکنش d^6Li در انرژی‌های پایین (کمتر از $100 keV$) است بنابراین با انجام این واکنش، انجام واکنش ثانویه dt و تولید نوترون‌هایی با انرژی $14.1 MeV$ اجتناب‌ناپذیر است.

واکنش d^6Li در انرژی‌های پایین (کمتر از $100 keV$) در پنج کانال انجام می‌شود که احتمال انجام واکنش از طریق هر کدام از این کانال‌ها بطور کلی تابعی از انرژی ذرات واکنش دهنده است ولی با تقریب (با استفاده از معادله سطح مقطع گاموف و همچنین ثابت گرفتن مقدار فاکتور S در این محدوده‌ی انرژی) می‌توان گفت که واکنش به ترتیب با احتمال 34.3، 17.9، 21.1، 15.8 و 10.9 درصد از طریق هر کدام از این کانال‌ها انجام می‌شود.

مراجع

- [1]- Segre, E. *Nuclei and Particles: An Introduction to Nuclear and Subnuclear Physics*. Massachusetts: W. A. Benjamin, INC. (1965).
- [2]- Burcham, W. E. *Elements of Nuclear Physics*. New York: Longman. (1979).
- [3] - اسکندری، محمد رضا. اصول همجوشی هسته‌ای. شیراز: انتشارات دانشگاه شیراز. (۱۳۷۴).
- [4]- Dunalp, R. A. *An Introduction to the Physics of Nuclei and Particles*. Australia: Thomson Brooks/Cole. (2004).
- [5]- Voronchev, V. T, Kukulín, V. I. "Rate parameters of $6Li(d, p)\alpha$ and $6Li(d, n)\alpha$ nuclear reactions at thermonuclear temperatures." *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* Vol. 26, pp. L103. (2000).
- [6]- Atzeni, S, Vehn, J. M. *The Physics of Inertial Fusion*. Oxford University Press. (2004).
- [7]- Available at URL: <Nuclear Astrophysics Data.htm>.