



نیمه عمر واپاشی آلفای هسته‌های سنگین فرد - فرد با استفاده از مدل مجاورت وابسته به دما

دائی عطاءاله، آیسان^(۱)؛ ناصر قدسی، امید^(۱)

^(۱) دانشگاه مازندران، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک هسته‌ای

چکیده:

با بکارگیری مدل مجاورت، نیمه عمر واپاشی آلفای هسته‌های سنگین فرد- فرد در چارچوب تقریب WKB محاسبه شده است. با استفاده از خواص حرارتی مایعات و هسته‌های داغ، وابستگی ضریب انرژی سطحی به دما را در پتانسیل مجاورت مورد بررسی قرار داده‌ایم. مطالعه ما نشان می‌دهد بکارگیری ضریب انرژی سطحی وابسته به دما، منجر به بهبود قابل توجهی در نتایج محاسبه نیمه عمر واپاشی آلفا می‌شود. با در نظر گرفتن وابستگی دمایی، ضریب انرژی سطحی کاهش و نیمه عمر واپاشی آلفا افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: واپاشی آلفا، نیمه عمر، هسته‌های سنگین، پتانسیل مجاورت، ضریب انرژی سطحی

α -decay half-lives of heavy odd-odd nuclei using temperature-dependent proximity model

Daei-Ataollah, Aysan¹; Naser Ghodsi, Omid¹

¹ Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Mazandaran

Abstract:

The α -decay half-lives of heavy odd-odd nuclei have been calculated using proximity model in the framework of WKB approximation. Considering the thermal properties of liquids and hot nuclei, we have investigated the temperature dependence of the surface energy coefficient in the proximity potential. Our study reveals that applying the temperature-dependent surface energy coefficient leads to a significant improvement in the calculated half-lives of α decay. Incorporating temperature dependence, the surface energy coefficient decreases and the α -decay half-life increases.

Key words: α decay, half-life, heavy nuclei, proximity potential, surface energy coefficient



مقدمه:

از دیدگاه نظری، واپاشی آلفا به صورت پدیده تونل‌زنی از میان سد پتانسیل توصیف شده است [۱ و ۲]. چنانچه بتوانیم شکل و اندازه سد پتانسیل را با دقت بیشتری تعیین نماییم، می‌توان نیمه عمر واپاشی آلفا را با دقت بالاتری تعیین نمود. تاکنون دیدگاه‌ها و مدل‌های مختلفی برای توصیف واپاشی آلفا به کار رفته است که از آن جمله می‌توان به مدل مجاورت [۳] اشاره نمود. مدل مجاورت بر مبنای خصوصیات ذاتی هسته‌ها همچون انرژی سطحی، ضخامت سطحی و شعاع هسته، نخستین بار در سال ۱۹۷۷ م. توسط بلاکی و همکارانش [۳] برای مطالعات همجوشی معرفی شد. از جمله ویژگی‌های این مدل، وجود پارامترهای تنظیم‌پذیر در فرمالیسم آن است که به ارائه نسخه‌های مختلفی از این مدل منجر شده است. مطالعه سیستماتیک انجام شده بر روی ۳۴۴ هسته سنگین نشان می‌دهد که گرچه اغلب نسخه‌های پتانسیل مجاورت قادر هستند نیمه عمر واپاشی هسته‌های زوج-زوج را به خوبی پیش‌بینی نمایند، اما میزان خطای مشاهده شده در مورد نیمه عمر هسته‌های فرد-فرد قابل ملاحظه است [۴].

در این مقاله، مدل مجاورت برای پیش‌بینی نیمه عمر هسته‌های فرد-فرد مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به خواص حرارتی مایعات و هسته‌های داغ، رابطه‌ای برای وابستگی دمایی ضریب انرژی سطحی ارائه شده و مدل مجاورت را اصلاح نموده‌ایم. سپس اثرات دمای هسته مرکب بر روی نیمه عمر واپاشی آلفا بررسی شده است.

روش کار:

نیمه عمر هسته مادر در مقابل واپاشی به یک ذره آلفا و یک هسته دختر از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_{1/2} = \frac{h \ln 2}{2E_v P_\alpha} \quad (1)$$

که در آن E_v انرژی ارتعاشی نقطه صفر تجربی است [۵]. P_α احتمال نفوذ ذره آلفا از سد پتانسیل است که با استفاده از تقریب نیمه کلاسیکی WKB یک بعدی محاسبه می‌شود.

$$P_\alpha = \exp\left(\frac{-2}{\hbar} \int_{R_a}^{R_b} \sqrt{2\mu(V_T(r) - Q_\alpha)} dr\right) \quad (2)$$

Q_α انرژی آزاد شده و R_a و R_b نقاط بازگشت کلاسیک هستند، به طوری که:

$$V_T(R_a) = Q_\alpha = V_T(R_b) \quad (3)$$

$V_T(r)$ پتانسیل برهمکنشی کل، مجموع سه پتانسیل هسته‌ای $V_N(r)$ ، کولنی $V_C(r)$ و گریز از مرکز $V_l(r)$ می‌باشد. بخش هسته‌ای پتانسیل برهمکنشی، توسط فرمالیسم مجاورت [۳] محاسبه شده است.

$$V_N(r) = 4\pi\gamma b\bar{R}\Phi(\xi) \quad (4)$$



که در آن $\Phi(\xi)$ تابع جهانی است.

$$\Phi(\xi) = \begin{cases} \frac{-1}{2}(\xi - 2.54)^2 - 0.0852(\xi - 2.54)^3 & \text{for } \xi \leq 1.2511, \\ -3.437 \exp\left(-\frac{\xi}{0.75}\right) & \text{for } \xi \geq 1.2511, \end{cases} \quad (5)$$

\bar{R} شعاع انحنای متوسط از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\bar{R} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}, \quad (6)$$

به طوری که:

$$C_i = R_i \left[1 - \left(\frac{b}{R_i} \right)^2 + \dots \right], \quad (7)$$

b ضخامت سطحی حدود ۱ برآورد شده است و شعاع تیزی مؤثر، R ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_i = 1.28A_i^{1/3} - 0.76 + 0.8A_i^{-1/3} \quad \text{fm}, \quad (i=1,2) \quad (8)$$

اندیس‌های $i=1,2$ به ترتیب به ذره آلفا و هسته دختر اشاره می‌کند.

ضریب انرژی سطحی، γ ، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma = \gamma_0 [1 - k_s A_s^2] \quad \text{MeVfm}^{-2} \quad (9)$$

پارامتر عدم تقارن، فزونی نوترون/پروتون را نشان می‌دهد. k_s و γ_0 به ترتیب ثابت عدم تقارن سطحی و ثابت انرژی سطحی، پارامترهای قابل تنظیمی هستند که در نسخه‌های مختلف پتانسیل مجاورت متفاوت هستند. ثابت‌های k_s و γ_0 در نسخه اصلی مدل مجاورت به ترتیب دارای مقادیر $1/7826$ و $1/7826$ MeV/fm² می‌باشند. در این مقاله از مقادیر تصحیح شده $3/10$ و $1/2402$ MeV/fm² [۶] به ترتیب استفاده شده است. مطالعه سیستماتیک انجام شده بر روی ۳۴۴ هسته سنگین نشان داد که میان ۲۹ نسخه مورد مطالعه پتانسیل مجاورت، نسخه اخیر خطای کمی در مقایسه با مقادیر تجربی نشان می‌دهد [۴].

به منظور اصلاح پتانسیل مجاورت، اثرات دمای هسته مرکب را بر روی سه پارامتر می‌توان اعمال نمود: شعاع مؤثر، ضخامت سطحی و ضریب انرژی سطحی. وابستگی دمایی دو پارامتر اول به صورت زیر تعریف شده است [۸ و ۷]:

$$R_i(T) = R_i(T=0) [1 + 0.0007T^2] \quad \text{fm}. \quad (10)$$

$$b(T) = b(T=0) [1 + 0.009T^2] \quad \text{fm}. \quad (11)$$

T دمای هسته مرکب است. در مطالعه حاضر ما وابستگی دمایی ضریب انرژی سطحی را مورد بررسی قرار داده‌ایم. معادله ساده و پرکاربرد گوگنهایم-کاتایاما-واندروالس برای کشش سطحی مایعات به صورت زیر داده شده است [۹]:



$$\gamma = \gamma_0 \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^n \quad \text{mJ/m}^2, \quad (12)$$

که γ_0 یک ثابت وابسته به سیستم، T_c دمای بحرانی و n یک مؤلفه تجربی است که از مقایسه با نتایج تجربی تعیین می‌شود. مشابه با وابستگی دمایی مایعات، چنان وابستگی‌ای را می‌توان برای هسته‌ها نیز در نظر گرفت، چنانچه وابستگی دمایی کشش سطحی هسته‌های داغ با استفاده از مدل قطره مایع تعمیم یافته به صورت زیر به دست آمده است [۱۰]:

$$\gamma(T) = 1.14 \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^2 \quad \text{MeV/fm}^2 \quad (13)$$

در تشابه با این دو، ما وابستگی دمایی ضریب انرژی سطحی مدل مجاورت را به صورت زیر در نظر گرفتیم:

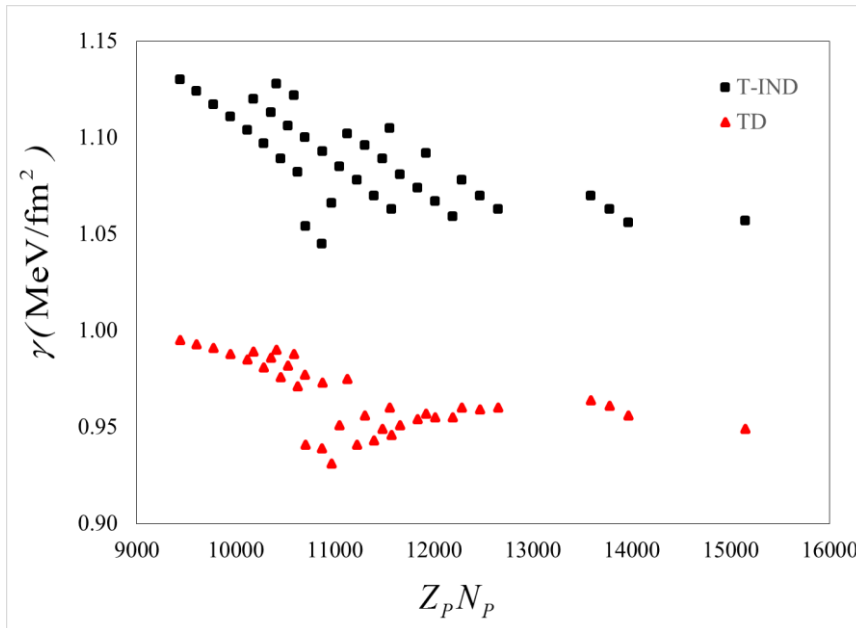
$$\gamma(T) = \gamma(T=0)(1 - pT)^q \quad \text{MeV/fm}^2, \quad (14)$$

پارامترهای p و q از طریق مینیمم کردن خطای حاصل از محاسبه نظری لگاریتم نیمه عمر واپاشی آلفا در مقایسه با مقادیر تجربی، تعیین می‌شوند.

نتایج:

نیمه عمر واپاشی آلفای ۳۸ هسته مادر سنگین فرد- فرد در محدوده $83 \leq Z \leq 99$ و $196 \leq A \leq 252$ مورد مطالعه قرار گرفته است. هسته‌های انتخاب شده در این مطالعه، دارای نیمه عمر تجربی معلوم می‌باشند. نیمه عمر واپاشی آلفا با استفاده از دو رویکرد محاسبه شده است: ۱. مدل مجاورت مستقل از دما (T-IND Prox.) با $\gamma(T=0)$ (رابطه ۹) و ۲. مدل مجاورت وابسته به دما (TD Prox.) با $\gamma(T)$ (رابطه ۱۴).

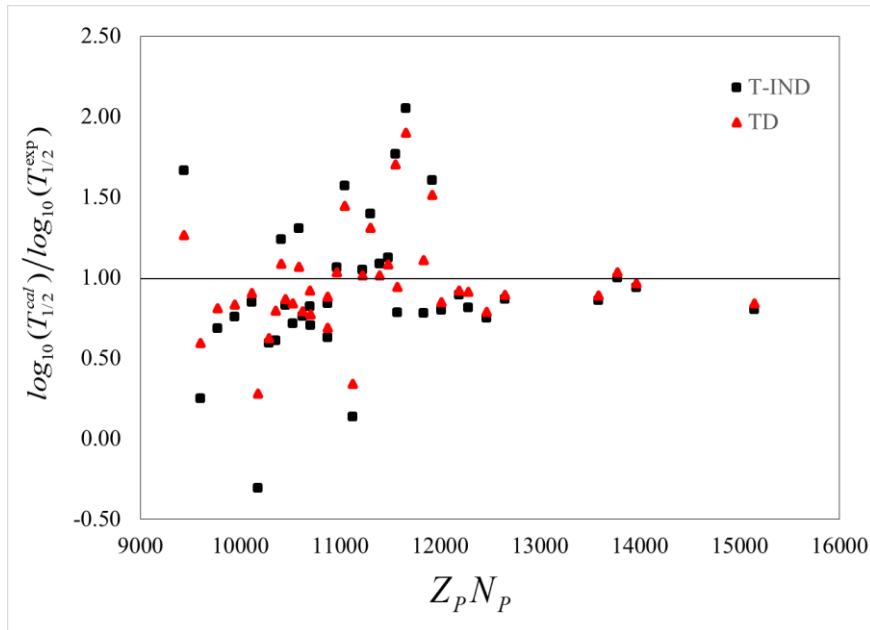
شکل ۱ مقادیر محاسبه شده ضریب انرژی سطحی مستقل از دما (T-IND) و ضریب انرژی سطحی وابسته به دما (TD) را برحسب $Z_p N_p$ نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل پیداست، در نظر گرفتن اثرات دمایی منجر به کاهش ضریب انرژی سطحی می‌شود.



شکل (۱) ضریب انرژی سطحی هسته‌های سنگین فرد-فرد برحسب $Z_p N_p$ در دو حالت مستقل از دما (T-IND) و وابسته به دما (TD).

شکل ۲ نسبت لگاریتم نیمه عمر نظری واپاشی آلفا به نیمه عمر تجربی هسته‌های سنگین فرد-فرد برحسب $Z_p N_p$ را در دو حالت مستقل از دما و وابسته به دما نشان می‌دهد، به طوری که مقادیر تجربی نیمه عمرهای واپاشی آلفا از مرجع [۱۱] استخراج شده‌اند. $T_{1/2}^{cal}$ و $T_{1/2}^{exp}$ به ترتیب مقادیر تجربی و نظری نیمه عمر واپاشی آلفا را نشان می‌دهند. هرچه نسبت $\log_{10}(T_{1/2}^{cal})/\log_{10}(T_{1/2}^{exp})$ به عدد یک نزدیکتر باشد نشان دهنده دقت محاسبات است. با اعمال اثرات دمایی در مدل مجاورت، نیمه عمر واپاشی هسته‌های مادر افزایش یافته و خطای محاسبات به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

نتایج به دست آمده به ازای $\gamma(T=0)$ با خطای جذر میانگین مربعات $1/19$ در توافق قابل قبولی با نتایج تجربی قرار ندارند. جایگزینی $\gamma(T)$ با $\gamma(T=0)$ ، منجر به بهبود نتایج شده و خطای جذر میانگین مربعات به $0/99$ کاهش یافت.



شکل (۲) نسبت لگاریتم نیمه عمر نظری واپاشی آلفا به نیمه عمر تجربی هسته‌های سنگین فرد-فرد برحسب $Z_p N_p$ در دو حالت مستقل از دما (T-IND) و وابسته به دما (TD).

مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از مدل وحدت یافته برای واپاشی آلفا و گیراندازی آلفا (UMADAC) [۱۱] و نیز رابطه نیمه تجربی نیمه عمر [۱۲] نشان می‌دهد که نتایج حاصل از مدل مجاورت وابسته به دما، قابل مقایسه با این دو مدل است. میزان خطای جذر میانگین مربعات برای این دو به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۷۶ می‌باشد.

بحث و نتیجه‌گیری:

در این مطالعه، به بررسی اثرات دمایی هسته مرکب بر روی نیمه عمر واپاشی آلفای هسته‌های سنگین فرد-فرد پرداختیم، به طوری که برای محاسبه بخش هسته‌ای پتانسیل از مدل مجاورت استفاده شده است. با در نظر گرفتن اثرات دمایی هسته مرکب در ضریب انرژی سطحی، فرمالیسم پتانسیل مجاورت را اصلاح نمودیم. رابطه ضریب انرژی سطحی وابسته به دما با علم به خواص دمایی کشش سطحی مایعات و هسته‌های داغ و نیز کمینه کردن خطا در مقایسه با نیمه عمرهای تجربی به دست آمد. در نظر گرفتن اثرات دمایی، منجر به کاهش ضریب انرژی سطحی و افزایش نیمه عمرهای نظری شد، به طوری که نتایج به دست آمده در توافق خوبی با نتایج تجربی و همینطور نیمه عمرهای حاصل از مدل‌های شناخته شده قرار دارند.



مراجع:

- [۱] G. Gamow, *Quantum theory of atomic nuclei*, Zeitschrift für Physik, 51(3-4), 204, 1928.
- [۲] R. W. Gurney and E. U. Condon, *Wave mechanics and radioactive disintegration*, Nature, 122, 439, 1928.
- [۳] J. Blocki, J. Randrup, W. J. Świątecki and C. F. Tsang, *Proximity forces*, Annals of Physics (NY), 105(2), 427, 1977.
- [۴] O. N. Ghodsi and A. Daei-Ataollah, *Systematic study of α decay using various versions of the proximity formalism*, Physical Review C, 93, 024612, 2016.
- [۵] D. N. Poenaru, W. Greiner, M. Ivascu, D. Mazilu and I. H. Plonski, *Odd-even staggering of heavy cluster spontaneous emission rates*, [Zeitschrift für Physik A](#), 325, 435, 1986.
- [۶] H. J. Krappe, J. R. Nix and A. J. Sierk, *Unified nuclear potential for heavy-ion elastic scattering, fusion, fission, and ground-state masses and deformations*, Physical Review C, 20, 992, 1979.
- [۷] G. Royer and J. Mignen, *Binary and ternary fission of hot and rotating nuclei*, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 18, 1781, 1992.
- [۸] G. Sauer, H. Chandra, and U. Mosel, *Thermal properties of nuclei*, Nuclear Physics A, 264, 221, 1976.
- [۹] A. P. Fröba, S. Will, and A. Leipertz, *Saturated Liquid Viscosity and Surface Tension of Alternative Refrigerants*, International Journal of Thermophysics, 21, 1225, 2000.
- [۱۰] H. R. Jaqaman, *Instability of hot nuclei*, Physical Review C, 40, 1677, 1989.
- [۱۱] V. Yu. Denisov and A. A. Khudenko, *α -Decay half-lives, α -capture, and α -nucleus potential*, Atomic Data and Nuclear Data Tables, 95, 815, 2009.
- [۱۲] G. Royer, *Analytic expressions for alpha-decay half-lives and potential barriers*, Nuclear Physics A, 848, 279, 2010.