

نقش دمای هسته مادر در مشخصه‌های واپاشی آلفا: معرفی فرم دمایی جدید برای شعاع مؤثر

هسته‌ها

کاملان؛ فهیمه^۱، قرائی، رضا^۲؛ قلعه، نیما^۳

^۱گروه فیزیک دانشگاه پیام‌نور مرکز مشهد

^۲گروه فیزیک دانشگاه حکیم سبزواری

^۳گروه فیزیک دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

با بهره‌گیری از مدل پتانسیل مجاورت Zhang 2013 به مطالعه سیستماتیک نقش اثرات دمایی هسته مادر بر روی فرایند واپاشی آلفای ۲۲۶ عنصر مختلف با محدوده‌ی عدداتمی $Z_p=84-91$ پرداخته‌ایم. در این پژوهش، فرم دمایی جدیدی برای شعاع مؤثر R_i هسته‌های برهم‌کنشی ارائه شده است که از طریق اعمال آن در مدل Zhang 2013 می‌توان به پیش‌بینی‌های قابل قبولی برای نتایج تجربی نیمه عمر در محدوده واپاشی‌های آلفای انتخابی دست یافت. علاوه براین، اعتبار فرم دمایی پیشنهادی را در بازتولید خواص لایه‌ای هسته‌ها مورد ارزیابی قرار داده‌ایم.

واژه‌های کلیدی: واپاشی‌های آلفا، دیدگاه پتانسیل مجاورت، اثرات دمای هسته مادر

Influence of parent nucleus temperature on alpha decay characteristics: a new temperature-dependent formalism for the effective nuclear radius

Kamelan, Fahime¹; Gharaei, Reza²; Ghal-Eh, Nima³

¹ Department of Physics, Payam-e Noor University of Mashhad

² Department of Physics, Hakim Sabzevari University

³ Department of Physics, Ferdowsi University of Mashhad

Abstract

Within the framework of the proximity potential Zhang 2013, the role of parent nucleus temperature on the alpha decay characteristics has been systematically investigated for 226 alpha decays with $Z_p=84-91$. In this study, a new temperature-dependent formalism for the effective nuclear radius R_i has been proposed to incorporate in Zhang 2013 potential model. Additionally, we have tested the validity of the presently proposed formalism in reproducing the shell closure effects of the nuclei involved in the alpha decay process.

Keywords: Alpha decay; Proximity potential approach; Parent nucleus temperature;

PACS No. 24

از این کمیت، همواره از موضوعات چالش‌برانگیز و جذاب برای

محققان فیزیک هسته‌ای در طول دهه‌های اخیر بوده است. نظریه واپاشی آلفا مبتنی بر یک رخداد فیزیکی مهم به نام پدیده تونل زنی کوانتومی است که برای فرمولبندی آن، می‌توان از رویکردهای نظری نظیر تقریب WKB بهره گرفت. براساس این تقریب، اطلاع از شکل صحیح پتانسیل برهم‌کنشی میان ذره آلفا و هسته دختر نقش تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به مقادیر دقیق احتمال نفوذ در سد و در نتیجه نیمه عمر واپاشی آلفا خواهد داشت. با توجه به اهمیت پتانسیل برهم‌کنشی در طی فرایند تونل‌زنی ذره آلفا، در چند دهه اخیر مدل‌های نظری مختلفی برای محاسبه این پتانسیل پیشنهاد شده‌اند که از جمله

مقدمه

بیش از یک قرن است که محققان اساس واپاشی‌های آلفا را مبتنی بر پدیده تونل‌زنی کوانتومی در سد پتانسیل می‌دانند که به واسطه تقابل نیروهای هسته‌ای قوی و کولنی در سیستم "آلفا-هسته دختر" شکل می‌گیرد [۱]. از آن پس مطالعات نظری و تجربی مختلفی در زمینه شناخت هرچه بیشتر فرایند واپاشی آلفا صورت گرفته است که نتیجه آن‌ها، معرفی رویکردهای نظری متعددی برای تفسیر این فرایند می‌باشد. نظریه‌های نوین توانستند نیمه‌عمرهای واپاشی آلفا را در گستره وسیعی از هسته‌های پرتوزای سنگین و نیمه-سنگین با دقت مطلوبی باز تولید نمایند. با این حال، دستیابی به پیش‌بینی‌های هر چه دقیق‌تر

پتانسیل برهم‌کنشی میان ذره آلفا و هسته دختر در طول فرایند واپاشی شامل سه بخش پتانسیل کولنی $V_C(R)$ ، هسته‌ای $V_N(R)$ و گریز از مرکز $V_I(R)$ است:

$$V_T(R) = V_N(R) + V_C(R) + \frac{\hbar^2 l(l+1)}{2\mu R^2}, \quad (1)$$

که در جمله آخر $\mu = \frac{m_\alpha m_d}{m_\alpha + m_d}$ جرم کاهش‌یافته سیستم ذره آلفا-هسته دختر می‌باشد، m_α و m_d نیز به ترتیب جرم‌های ذره آلفا و هسته دختر در واحد جرم اتمی می‌باشند. همچنین در این رابطه l نشان دهنده اندازه حرکت زاویه‌ای حمل شده توسط ذره آلفا است. با فرض داشتن توزیع بار یکنواخت برای هر یک از هسته‌های برهم‌کنشی، پتانسیل کولنی را می‌توان به شکل زیر محاسبه کرد،

$$V_C(R) = Z_1 Z_2 e^2 \begin{cases} \frac{1}{R} & (R > R_c), \\ \frac{1}{2R_c} \left[3 - \left(\frac{R}{R_c}\right)^2 \right] & (R < R_c), \end{cases} \quad (2)$$

که در آن $R_c = R_1 + R_2$ و مقادیر شعاع ذره آلفا و هسته دختر بصورت $R_i = 1.28A_i^{1/3} - 0.76 + 0.8A_i^{-1/3}$ تعریف می‌گردند. همانگونه که ذکر شد در تحقیق حاضر برای محاسبه قدرت پتانسیل هسته‌ای در طول برهم‌کنش ذره آلفا و هسته دختر از مدل مجاورت و نسخه Zhang2013 استفاده می‌نماییم. در این مدل پتانسیل هسته‌ای به صورت زیر تعریف می‌گردد،

$$V_N(R) = 4\pi\gamma b\bar{R}\Phi(s) \quad (3)$$

که در آن پارامترهای $\gamma b\bar{R}$ به شکل و هندسه سیستم برهم‌کنشی وابسته هستند و $\Phi(s)$ یک تابع جهانی است که در مرجع [۶] فرم جدیدی از آن به صورت،

$$\Phi(s) = \frac{-7.65}{1 + e^{\frac{s+1.02}{0.89}}} \quad (4)$$

معرفی شده است. از طرفی در این فرمولبندی، γ ضریب انرژی سطحی است که به واسطه رابطه (۴) مرجع [۶] قابل تعریف می‌باشد و برای پارامتر ضخامت سطح b نیز در محاسبات پتانسیل هسته‌ای نیز می‌توان مقدار $b \approx 1 \text{ fm}$ را در نظر گرفت [۶]. خاطر نشان می‌شود که \bar{R} در رابطه (۳) به شکل زیر قابل تعریف است،

$$\bar{R} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

که در این بخش، برای محاسبه شعاع‌های ذره آلفا و هسته دختر از رابطه معرفی شده R_i بهره گرفته‌ایم.

معرفی فرم وابسته به دمای شعاع مؤثر $R_i(T)$

آنها می‌توان به "دیدگاه پتانسیل مجاورت" [۲] اشاره کرد. این مدل که مبتنی بر ویژگی‌های هیدرواستاتیکی هسته‌ها و همچنین نظریه نیروهای مجاورت می‌باشد، رویکردی ساده و در عین حال کاربردی را برای تعیین قدرت پتانسیل هسته‌ای میان دو هسته ارائه می‌دهد. وجود فاکتورهای قابل تنظیم مانند پارامتر شعاعی R ، پارامتر ضخامت سطح b ، تابع جهانی $\Phi(s)$ در فرمولبندی این مدل، سبب معرفی نسخه‌های متعددی از آن شده است [۳]. از دیگر قابلیت‌های فرمولبندی مجاورت، امکان بررسی نقش اثرات فیزیکی مختلف بر روی دینامیک فرایندهایی نظیر گسیل ذره آلفا از هسته مادر می‌باشد. از جمله مهمترین اثرات بررسی شده می‌توان به نقش دمای هسته مادر در پتانسیل برهم‌کنشی و در نتیجه نیمه عمر واپاشی اشاره کرد که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۴، ۵]. محققان تاکنون فرم‌های اصلاح شده‌ای از پارامترهای شعاع R و ضریب کشش سطحی γ را بر پایه اثرات دمایی هسته مادر معرفی کرده‌اند، به عنوان نمونه $R(T) = R(T=0)(1 + 0.0007T^2)$. هرچند چنین فرم‌های دمایی بیشتر بر پایه خواص ساختاری هسته‌های منزوی و در خارج از فضای برهم‌کنشی بدست آمده‌اند. تحت این شرایط، ضروری به نظر می‌رسد که بواسطه انجام یک مطالعه سیستماتیک بر روی تعداد قابل توجهی از عناصر سنگین و فوق-سنگین گسیلنده ذره آلفا، و در نظر گرفتن اثرات برهم‌کنشی سیستم "هسته دختر-ذره آلفا"، به تحقیق در مورد نقش اثرات دمایی هسته مادر و تعیین یک فرم اصلاح شده وابسته به دما برای شعاع $R(T)$ بپردازیم. برای دستیابی به این هدف، پتانسیل برهم-کنشی براساس یکی از آخرین نسخه‌های فرمالیزم مجاورت یعنی مدل "Zhang2013" محاسبه شده است که در سال ۲۰۱۳ توسط Zhang و همکارانش برای مطالعه واپاشی‌های آلفا معرفی شده است [۶]. خاطر نشان می‌شود که نتایج تحقیقات این گروه نشان می‌دهد که مدل مذکور قادر به ارائه پیش‌بینی‌های قابل قبولی برای نیمه عمر واپاشی-های آلفا می‌باشد. در مطالعه حاضر، در تلاش هستیم تا اثر فرم دمایی جدید شعاع را بر روی نیمه‌عمرهای حاصل از مدل Zhang2013 برای تعداد ۲۲۶ واپاشی آلفا در محدوده $61 \leq Z_p \leq 99$ مورد سنجش قرار داده و نیز از طریق آن به مطالعه خواص لایه‌ای هسته‌ها بپردازیم.

روش محاسبات

تحت این شرایط، با تکیه بر همخوانی داده‌های تئوری و تجربی نیمه عمر واپاشی‌های آلفا، فرم اصلاح شده ذیل را برای رفتار دمایی شعاع هسته‌ها پیشنهاد می‌دهیم،

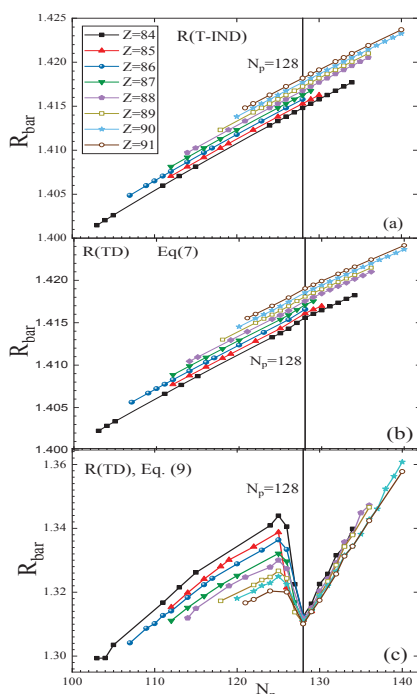
$$R_i(T) = R_i(T=0)(1.02407 - 0.1082T) \quad (10)$$

حال برای بررسی میزان اعتبار این رابطه، در شکل (۲۲)، رفتار مقادیر \bar{R} را با و بدون احتساب اثرات دمایی به صورت تابعی از عدد نوترونی N_p هسته‌های مادر برای ایزوتوپ‌های با اعداد اتمی در محدوده $Z_p = 84 - 91$ رسم نموده‌ایم. خاطر نشان می‌شود که در بخش اثرات

دمایی، برای محاسبه $\bar{R}(T)$ ، از رابطه زیر بهره گرفته‌ایم،

$$\bar{R}(T) = \frac{R_1(T)R_2(T)}{R_1(T)+R_2(T)} = \bar{R}(T=0)f(T) \quad (11)$$

برای درک بیشتر، تابع $f(T)$ را با استفاده از هر دو فرم دمایی غیر خطی (درجه دوم) و خطی، روابط (۷) و (۱۰)، محاسبه کرده و نتایج آن را در شکل ۲ نمایش داده‌ایم. با مقایسه همزمان این سه بخش، به راحتی می‌توان دریافت که اعمال اثرات دمایی تنها براساس رابطه پیشنهادی (۱۰) منجر به پیش‌بینی صحیح خاصیت لایه‌ای هسته‌ها در عدد جادویی $N_d=126$ می‌شود. در واقع حالت‌های مستقل از دما (بخش الف) و وابسته به دمای حاصل از فرم پیشنهادی (۷) (بخش ب) وجود این ویژگی مهم را در $N_d=126$ پیش‌بینی نمی‌کنند.



شکل ۲: نمودار مقایسه تغییرات \bar{R} بر حسب N_p برای ایزوتوپ‌های $Z=84$ تا $Z=91$ براساس فرم‌های مستقل و وابسته به دمای شعاع.

در این تحقیق، برای اعمال اثرات دمایی هسته مادر از طریق شعاع هسته‌های برهم‌کنشی، فرم اصلاح شده‌ای از پارامتر R_i را به صورت زیر معرفی می‌نماییم،

$$R_i(T) = R_i(T=0)f(T). \quad (6)$$

همانطور که مشاهده می‌شود وابستگی دمایی به صورت یک تابع دلخواه $f(T)$ در فرم مستقل از دمای شعاع ضرب شده است. به لحاظ نظری، اعمال اثرات دمایی از این طریق را به راحتی می‌توان با الهام گرفتن از فرم‌های وابسته به دمای پیشین نظیر،

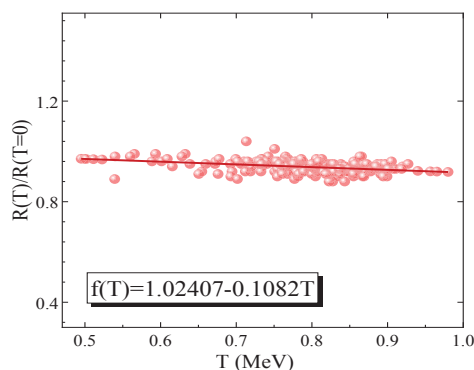
$$R_i(T) = R_i(T=0)(1 + 0.0007T^2) \quad (7)$$

درک کرد. در ادامه باید متذکر شد که برای تعیین مقادیر تابع f به ازای دمای T هر یک از ۲۲۶ هسته مادر انتخابی، از کمیته‌سازی اختلاف میان مقادیر تئوری و تجربی نیمه عمر در چارچوب مدل Zhang2013 بهره گرفته‌ایم. علاوه بر این، مقادیر دما را نیز می‌توان با استفاده از رابطه زیر بدست آورد،

$$E_p^* = E_{kin} + Q = \frac{1}{9}A_p T^2 - T, \quad (8)$$

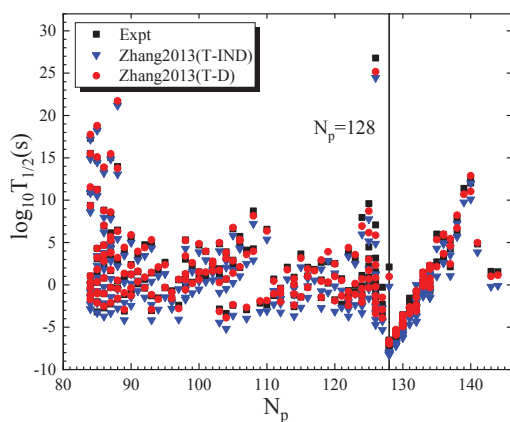
که در آن، E_p^* به انرژی برانگیختگی هسته مادر با عدد جرمی A_p اشاره دارد. همچنین انرژی ذره آلفا گسیل شده می‌باشد که به راحتی و از طریق قوانین پایستگی قابل محاسبه خواهد بود. در شکل (۱)، رفتار مقادیر حاصل برای نسبت $R_i(T)/R_i(T=0)$ به صورت تابعی از دمای T برای مجموعه واپاشی‌های انتخابی رسم شده‌اند. همانگونه که مشاهده می‌شود مقادیر حاصل با افزایش دما از یک رفتار خطی نزولی پیروی می‌کنند که به صورت زیر قابل پارامترسازی خواهد بود،

$$\frac{R(T)}{R(T=0)} = f(T) = 1.02407 - 0.1082T \quad (9)$$



شکل ۱: تغییرات مقادیر حاصل از $R(T)/R(T=0)$ به صورت تابعی از دمای T هسته مادر در واپاشی‌های آلفای انتخابی به منظور یافتن $f(T)$.

شود، اعمال اثرات دمایی بطور محسوسی باعث بهبود توافق میان داده-های تئوری و تجربی نیمه عمر می شود، بطوریکه میزان انحراف استاندارد از داده های تجربی پس از اعمال این اثرات فیزیکی از حد $\sigma = 1/258$ در مدل Zhang 2013(T-IND) به $\sigma = 0.441$ در مدل Zhang 2013(TD) کاهش می یابد.



شکل ۴: مقایسه نیمه عمر حاصل از مدل Zhang 2013 با و بدون اعمال اثرات وابستگی دمایی با مقادیر تجربی متناظر.

نتیجه گیری

با هدف تحلیل اثرات دمایی هسته مادر، فرایند واپاشی آلفای ۲۲۶ هسته مختلف در محدوده $61 \leq Z_p \leq 99$ را در چارچوب مدل Zhang 2013 و برپایه تقریب WKB مورد ارزیابی قرار دادیم. نتایج بدست آمده، فرم اصلاح شده ای را برای پارامتر $R_i(T)$ معرفی می کند که مطابق رابطه (۱۰) نحوه وابستگی آن به دمای T هسته مادر بصورت خطی است. از نقطه نظر فیزیکی، وجود آثار لایه ای در عدد جادویی $N_d=126$ به نوعی مؤید اعتبار این فرم دمایی می باشد. علاوه بر این، نشان دادیم که اعمال فرم دمایی پیشنهادی در فرمول بندی مدل Zhang 2013، موجب افزایش دقت این مدل در پیش بینی داده های تجربی نیمه عمر برای محدوده جرمی مورد مطالعه می گردد.

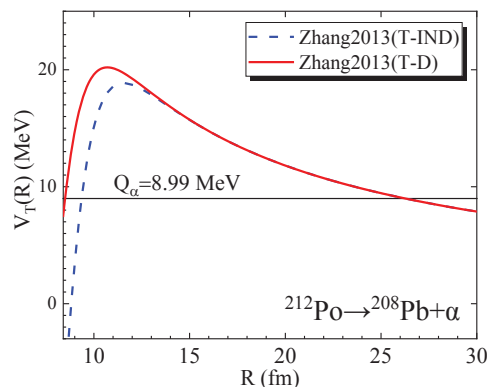
مرجع ها

- [1] G. Z. Gamow, Phys. 51, 204 (1928).
- [2] J. Blocki *et al.*, Ann. Phys. (N.Y.) 105, 427 (1977).
- [3] I. Dutt, R. K. Puri, Phys. Rev. C 81, 064609 (2010).
- [4] R. Gharaei, V. Zanganeh, Nucl. Phys. A 952, 28 (2016).
- [5] A. Daei-Ataollah *et al.*, Phys. Rev. C 97, 054621 (2018).
- [6] G. L. Zhang *et al.*, Eur. Phys. J. A 49, 10 (2013).

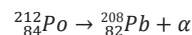
تأثیر اعمال اثرات دمایی بر روی پتانسیل برهم کنشی

همانگونه که در بخش قبل نیز بدان اشاره شد، پتانسیل برهم کنشی میان هسته دختر و ذره آلفا، نقش تعیین کننده ای در محاسبات نیمه عمر بر پایه تقریب WKB دارد. بنابراین، در این مرحله قصد داریم به بررسی اثرات دمای هسته مادر از طریق فرم پیشنهادی رابطه (۱۰) بر روی نتایج پتانسیل حاصل از مدل Zhang 2013 بپردازیم. برای این منظور، در شکل (۳) رفتار شعاعی پتانسیل برهم کنشی کل را با و بدون احتساب اثرات دمایی، برای واپاشی یک هسته دلخواه مانند ^{212}Po رسم نموده ایم. با مقایسه نتایج حاصل از فرم مستقل از دما (T-IND) و وابسته به دمای (TD) مدل Zhang 2013، درمی یابیم که اعمال اثرات دمایی از طریق فرم پیشنهادی (۱۰) باعث کاهش ارتفاع و ضخامت سد کولنی و در نتیجه افزایش احتمال نفوذ ذره آلفا در سد می گردد. تحت این شرایط انتظار خواهیم داشت مقادیر نیمه عمر $T_{1/2}$ حاصل از این مدل پتانسیل نیز متأثر از اعمال اثرات دمایی شوند. برای درک این موضوع، مقادیر تئوری $T_{1/2}$ را از طریق رابطه (۱۲) و در قالب دو مدل پتانسیل Zhang 2013 (T-IND) و Zhang 2013(TD) برای تمامی واپاشی های آلفای انتخابی محاسبه نموده ایم.

$$T_{1/2} = \frac{h \ln 2}{2E_\alpha P_0 P} \quad (12)$$



شکل ۳: مقایسه پتانسیل کل هسته با و بدون اعمال اثر دمایی برای آلفایابی



لازم به ذکر است که جزئیات مربوط به معرفی و نحوه محاسبه پارامترهای موجود در این رابطه بطور کامل در مرجع [۶] شرح داده شده اند. در شکل (۴)، مقادیر لگاریتم نیمه عمرهای محاسبه شده با داده های متناظر تجربی شان مقایسه شده اند. همانگونه که مشاهده می -