

میزان تأثیر تراکم ناپذیری ماده هسته‌ای در واپاشی به ترازهای پایه و برانگیخته در

ایزوتوپ‌های رادیوم

INC29-1334

سید امین سیدی^{۱*}، عادلہ رزم‌آرا^۱

۱. دانشگاه پیام نور، دانشکده علوم، گروه فیزیک، تهران، ایران، صندوق پستی ۱۲۳۴۵۶۶۷۷۷

چکیده:

در این تحقیق گذارهای از حالت پایه هسته مادر به حالات برانگیخته هسته دختر برای ایزوتوپ‌های $^{209, 213, 215, 219}\text{Ra}$ با توجه به اثرات جمعی ماده هسته‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این محاسبات، برای محاسبه اندرکنش هسته آلفا-دختر هسته از مدل واپیچش دوگانه با اندرکنش‌های نوکلئون-نوکلئون با برد محدود با لحاظ خواص تراکم ناپذیری ماده هسته‌ای و مدل تشکیل خوشه استفاده شده است. نتایج به دست آمده از این محاسبات در مورد نیمه‌عمرهای جزئی نشان دهنده توافق خوب با داده‌های تجربی متناظر است. همچنین نشان داده شد که با افزایش اثرات تراکم ناپذیری، نیمه‌عمرهای جزئی و نسبت شاخه‌ای در گذار از حالت پایه به حالت پایه در مقایسه با داده‌های تجربی کاهش می‌یابند. **کلیدواژه‌ها:** نیمه‌عمرهای جزئی، نسبت شاخه‌ای، ایزوتوپ‌های رادیوم

The influence of structural factors in calculating decay parameters to the ground and excited states in radon isotopes

Seyyed Amin Seyyedi, Adeleh Razmara

1. Sciences Faculty, Physics group, Payame-Noor University, P. O. Box 19395-4697, Tehran, Iran

Abstract:

In this research, the transitions from the ground state of the parent nucleus to the excited states of the daughter nucleus for $^{209, 213, 215, 219}\text{Ra}$ isotopes have been investigated with regard to the collective effects of nuclear matter. In these calculations, to calculate the alpha-daughter nucleus interaction, the double-folding model with finite range nucleon-nucleon interactions has been used considering the incompressibility effect of the nuclear mater and the cluster formation model. The results obtained from these calculations about partial half-lives show a good agreement with the experimental data. It has also shown that by increasing the effects of incompressibility, partial half-lives and branch ratio reduce in comparison with experimental data.

Keywords: Partial half-lives, branching ratio, Radiom isotopes

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل اهمیت شناخت نیروی هسته‌ای و ایزوتوپ‌های جدید در نواحی هسته‌های فوق سنگین، مد واپاشی آلفا توجه بسیاری از تحقیقات نظری و تجربی را به خود اختصاص داده است [۱-۳]. در بررسی فرآیند واپاشی آلفا، گذار از حالت پایه به حالت پایه یکی از مسیرهای مختلفی است که محتمل است و امکان واپاشی به ترازهای برانگیخته هسته دختر نیز وجود دارد. با توجه به اندازه حرکت زاویه‌ای حمل شده توسط ذره آلفای تابش شده می‌توان دو گروه گذار از هسته مادر به هسته دختر را مشاهده کرد. یک گروه گذار با اندازه حرکت زاویه‌ای $l = 0$ است و گروه دیگر با $l \neq 0$. در موارد هسته‌های زوج-زوج این گذارها غالباً به صورت $0^+ \rightarrow 0^+$ صورت می‌گیرد. اما در مورد هسته‌های با A فرد و با هسته‌های فرد-فرد، اسپین - پاریته هسته‌های مادر و دختر الزاماً برابر نیستند و این موضوع، گذار از حالت پایه به حالت پایه را تحت الشعاع قرار می‌دهد و موجب می‌شود کسری از مسیر واپاشی به سمت هسته‌های دختر برانگیخته سوق پیدا کند. تجمع حالات برانگیخته در هسته باقیمانده معمولاً از تراکم پایین‌تری نسبت به حالات پایه برخوردار است. اما این تراکم جمعیتی حالات برانگیخته هسته‌های باقیمانده، ابزار بسیار کارآمدی در بررسی خواص تابنده‌های آلفا است چون ارتباط تنگاتنگی با ساختار درونی هسته‌ها دارد. مطالعه این موضوع تحت عنوان بررسی ساختار ریز واپاشی آلفا معروف است. در این بین عوامل متعددی در بررسی فرایندهای واپاشی آلفای مسدود شده از دیدگاه نظری تأثیرگذار است. مدل‌های مختلفی مثل مدل‌های قطره مایع، مدل شکافت متقارن، مدل‌های هارتری - فاک - بوگولیوبوف تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است و عوامل مختلف تأثیرگذار مثل چگالی، اسپین و ایزواسپین، انرژی واپاشی مورد آزمون قرار گرفته است. اخیراً نی و رن^۱ ساختار ریز هسته‌های زوج و فرد را با استفاده از مدل خوشه‌ای وابسته به چگالی تعمیم یافته محاسبه کرده‌اند [4]. همچنین در کار جدیدتری یک بررسی فراگیری را در مورد گذارهای آلفا به چهار کانال متفاوت در هسته‌های زوج-زوج هدف قرار داده‌اند [5]. با توسعه مدل نیمه تجربی به هسته‌های با تغییر شکل ذاتی، خودنکو و دنیزف^۲ مدلی تحت عنوان مدل متحد را برای واپاشی آلفا و گیراندازی آلفا پیشنهاد داده‌اند و توانستند نتایج جالبی را در طیف وسیعی از واپاشی‌های آلفا و ساختار ریز به دست آورند [6]. در قالب مدل پتانسیل‌های مجاورت و کولنی در مورد هسته‌های با تغییر شکل ذاتی سانتوش^۳ و همکارانش مطالعه بسیار دقیقی بر روی ساختار ریز هسته‌های زوج-زوج و زوج-فرد انجام داده‌اند [۷-۹].

اگرچه مدل‌های نظری مختلفی تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است تا ساختار ریز آلفا را توصیف کند اما همچنان سوالات پاسخ داده نشده‌ای در این زمینه وجود دارد. تراکم ناپذیری ماده هسته‌ای یکی از خواصی است که در مدل‌های نظری نقشی تعیین‌کننده در محاسبه پتانسیل‌های هسته‌ای بازی می‌کند. بررسی وابستگی واپاشی آلفا در هسته‌های فوق سنگین به عامل تراکم ناپذیری ماده هسته‌ای و ساختار ریز آلفا موضوعی است که نیازمند بررسی‌های مضاعفی است. نتایج تحقیقات مختلف اهمیت اثرات تراکم ناپذیری و اصل طرد پائولی را در واکنش‌های همجوشی نشان می‌دهند. مطالعاتی که در سال‌های اخیر انجام شده است نشان می‌دهد کانال‌های ورودی واکنش نظیر پتانسیل برهمکنشی تأثیر قابل توجهی بر روی تغییرات این پارامتر دارند. لذا بررسی اثرات تراکم ناپذیری ماده هسته‌ای به‌عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار بر روی پتانسیل هسته‌ای در نواحی هسته‌های فوق سنگین و تأثیرش بر ساختار ریز واپاشی آلفا و پارامتر نسبت شاخه‌ای با استفاده از اندرکنش‌های نوکلئون - نوکلئون مؤثر وابسته به چگالی و با برد محدود در مدهای مختلف واپاشی به نظر شایان توجه می‌رسد که بررسی این مهم را مدنظر قرار می‌دهیم.

۲. مدل نظری

در یک فرآیند واپاشی آلفا یک خوشه آلفا از چهار نوکلئون در سطح هسته مدنظر تشکیل می‌شود. این فرآیند با احتمال پیش تشکیل مشخصه یابی می‌شود. متعاقباً فرآیند تونل زنی خوشه آلفای تشکیل شده از سد پتانسیل مقابل آن را رخ خواهد داد. تاکنون مدل‌های مختلفی برای محاسبه این سد پتانسیل اندرکنشی مثل مدل‌های مجاورت،

¹ Ni and Ren

² Khodenko and Denisof

³ Santhosh

مدل‌های بر پایه نیروهای اسکایرم و مدل‌های مبتنی بر میدان میانگین و غیره مورد استفاده قرار گرفته است. در بین مدل‌های مختلف پتانسیل اندرکنشی میان هسته‌های فوق سنگین مدل واپیچش دوگانه به‌طور گسترده در محاسبه پتانسیل اندرکنشی مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل بخش مستقیم نیروی هسته‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{ND}(R, E_P) = g(E_P) \int d\vec{r}_P \int d\vec{r}_T \rho_{PA}(\vec{r}_P) V_D(\vec{s}) \rho_{TA}(\vec{r}_T) \quad (1)$$

در این رابطه $\rho_P(\vec{r}_P)$ و $\rho_T(\vec{r}_T)$ چگالی‌های ماده هسته‌ای هستند و $g(E_P) = E_{lab}/A_P = 1 - kE_P$ ضریب انرژی است و بر اساس داده‌های مرجع [۱۰] مورد استفاده قرار گرفته است. چگالی‌های هسته‌ای واقعی را می‌توان از طریق مدل‌های هسته‌ای یا مستقیماً توسط داده‌های آزمایشگاهی پراکندگی الکترون به دست آورد. در این تحقیق، برای چگالی‌های ایزوتوپ‌های رادیوم بر اساس پروفایل دو پارامتری فرمی و برای هسته‌های α از تابع توزیع گوسی با ضرایب ارائه شده در مرجع [۱۱] مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از یک اندرکنش نوکلئون-نوکلئون مؤثر مناسب نکته مهمی است که تضمین‌کننده موفقیت مدل واپیچش دوگانه است. انتخاب معمول این اندرکنش بر اساس مدل M3Y است که برای بازتولید عناصر ماتریس G از دو نسخه معروف رید و پاریس استفاده می‌کند [۱۲]. در این تحقیق از نسخه پاریس برای محاسبه بخش مستقیم اندرکنش نوکلئون-نوکلئون استفاده شده است:

$$V_D(s) = 7999 \frac{e^{-4s}}{4s} - 2134 \frac{e^{-2.5s}}{2.5s} \quad (\text{MeV}) \quad (2)$$

در بررسی‌هایی که بر روی اندرکنش‌های از نوع M3Y فوق و مطالعه ماده هسته‌ای با استفاده از مکانیزم هارتری-فاک صورت گرفت نشان داده‌اند که اندرکنش‌های اولیه M3Y مستقل از چگالی در مورد توصیف اشباع ماده هسته‌ای سرد با موفقیت همراه نبود. معرفی نسخه‌های مختلف وابسته به چگالی این مشکل را مرتفع کرده است. اگرچه این نسخه‌های مختلف در بازتولید چگالی اشباع ماده هسته‌ای سرد موفق هستند اما نتایج متفاوتی در مورد انحنا نمودار انرژی بستگی یعنی مشتق دوم $B(\rho)$ در نزدیکی نقطه اشباع ماده هسته‌ای یا به عبارتی تراکم ناپذیری ماده هسته‌ای دارند. لذا ضریب $F(\rho_{FA})$ را برای اعمال اثرات اشباع ماده هسته‌ای در محاسبه نیروی هسته‌ای اعمال می‌کنیم:

$$F(\rho_{FA}) = C \{1 + \alpha \exp(-\beta \rho_{FA}) - \gamma \rho_{FA}\} \quad (3)$$

ضرایب C, α, β, γ برای بازتولید درست خواص جمعی ماده هسته‌ای و اثرات تراکم ناپذیری در محاسبات واپاشی پارامترهای نشان داده شده در جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفته است:

جدول شماره ۱: پارامترهای وابستگی به چگالی ماده هسته‌ای در نیروی نوکلئون-نوکلئون و مقادیر تراکم ناپذیری متناظر [۱۳]

Interaction	K(MeV)	C	α	$\beta (fm^3)$	$\gamma (fm^3)$
BDM3Y1	176	0.2963	3.7231	3.7384	0.0
CDM3Y4	228	0.3052	3.2998	2.3180	2.0
DDM3Y1	270	1.2521	0.0	0.0	1.7452

قسمت تبدالی نیروی هسته‌ای به صورت زیر مورد محاسبه قرار گرفته است:

$$V_{N.Ex.}(R, E_P) = g(E_P) \int d\vec{r}_P \int d\vec{r}_T \rho_{PA}(\vec{r}_P; \vec{r}_P + \vec{s}) V_{EX}(\vec{s}) \rho_{TA}(\vec{r}_T; \vec{r}_T - \vec{s}) \exp(i\vec{k} \cdot \vec{s} / A_{red}) \quad (4)$$

بررسی جزئیات کامل روابط فوق در مرجع [13] گزارش شده است.

۲-۱ محاسبات نیمه‌عمر و نسبت‌های شاخه‌ای

با استفاده از پتانسیل اندرکنشی کل به دست آمده در یک سیستم دختر هسته-آلفا، احتمال نفوذ از این سد پتانسیل بر اساس تقریب WKB به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$P = \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \int_{R_{in}}^{R_{out}} \sqrt{2\mu(V(r) - Q)} dr\right] \quad (5)$$

احتمال پیش تشکیل S_α یک پارامتر ضروری در محاسبه نیمه‌عمرهای جزئی است. چشم‌پوشی از این پارامتر منجر به اطلاعات نادرستی از مقادیر نیمه‌عمرها خواهد شد. در این تحقیق از مدل تشکیل خوشه استفاده شده است [۱۴]. احتمال پیش تشکیل S_α در این مدل بر اساس انرژی‌ها به صورت مقابل قابل نمایش است:

$$S_\alpha = \frac{E_f}{E_f + E_r} = \frac{E_\alpha}{E} \quad (6)$$

که در اینجا E_f انرژی تشکیل خوشه و E_r انرژی حرکت نسبی ذره آلفا و مغزی که انرژی جداسازی نیز نامیده می‌شود. در رابطه فوق E_f انرژی تشکیل خوشه است. هسته دختر که از یک ساطع کننده آلفا گسیل شده است به چندین حالت برانگیخته دسترسی دارد. این یک فرض قابل قبول است که احتمال باقی ماندن هسته دختر باقیمانده در حالت‌های برانگیخته از تابع توزیع بولتزمن پیروی می‌کند [۱۴].

$$\rho(E_i^*) = e^{-cE_i^*} \quad (7)$$

مقدار پارامتر C برابر 2.38 MeV^{-1} فیکس شده است. در نهایت پهنای واپاشی آلفا کل توسط رابطه زیر داده می‌شود:

$$\Gamma = \sum_i S_\alpha \rho(E_i^*) \Gamma(Q_i, l) \quad (8)$$

و نیمه‌عمرهای جزئی با استفاده از روابط فوق به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$T_{1/2}(S) = \frac{\hbar \ln 2}{\Gamma} \quad (9)$$

نسبت شاخه‌ای برای گذار آلفا به حالت برانگیخته i هسته دختر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$B = \frac{S_\alpha \rho(E_i^*) \Gamma(Q_i, l)}{\Gamma} \times 100\% \quad (10)$$

۳. نتایج و بحث

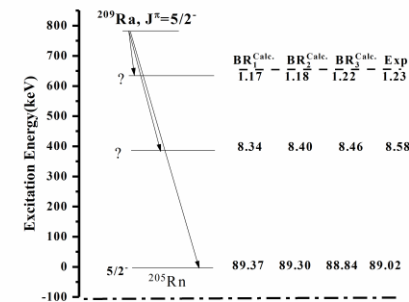
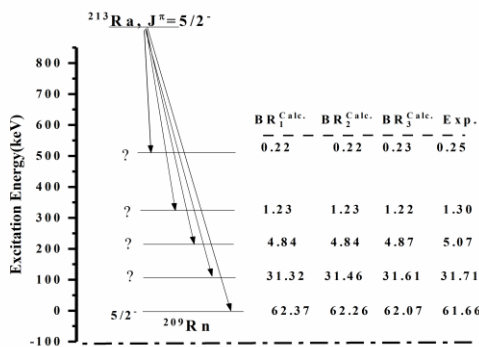
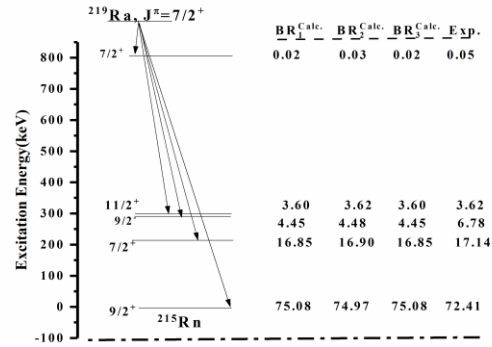
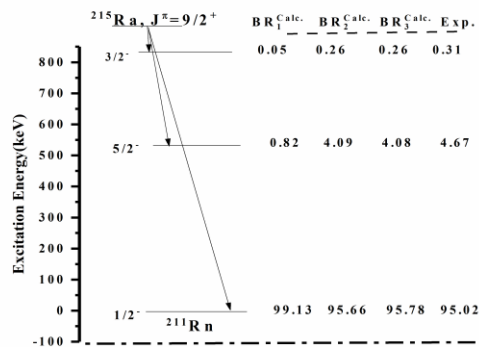
در این تحقیق ساختار ریز واپاشی آلفا را برای ایزوتوپ‌های $^{209,213,215,219}\text{Ra}$ مورد بررسی قرار دادیم. در این تحقیق گذارهای از حالت پایه هسته مادر به حالات برانگیخته هسته دختر مورد توجه قرار گرفته است. محاسبات نیمه‌عمرهای جزئی و نسبت شاخه‌ای در چارچوب تقریب WKB با اعمال شرط کوانتس بور-سامرفلد و نیز با توجه به اثرات تراکم ناپذیری ماده هسته‌ای اعمال شده است. اندرکنش هسته آلفا-دختر هسته از مدل معروف واپیچش دوگانه با اندرکنش‌های مؤثر با اعمال اثرات جمعی تراکم ناپذیری استفاده شده است. این نسخه‌های مختلف اندرکنش نوکلئون - نوکلئون متناظر با مقادیر 176 MeV الی 270 MeV برای مقدار عبارت تراکم ناپذیری می‌باشد. در این تحقیق، برای محاسبه احتمال پیش تشکیل از مدل CFM یا مدل تشکیل خوشه استفاده کرده‌ایم. این مدل فاکتور پیش تشکیل واقعی را بر پایه تفاوت انرژی‌های بستگی ارائه می‌دهد. مقادیر تجربی Q، انرژی حالات برانگیخته در هسته‌های دختر چگالی‌های هسته‌ای و اسپین پارینه هسته‌های مورد محاسبه از دیتابیس NNDC استخراج شده است [۱۶]. واپاشی آلفا هسته‌های زوج-زوج به صورت کلی از مسیر حالت پایه 0^+ به حالت پایه 0^+ اتفاق می‌افتد. گذارهای با اسپین بالاتر دارای تراکم جمعیتی کمتری هستند. اما در مورد هسته‌های فرد به دلیل وجود نوکلئون منفرد شرایط متفاوت خواهد شد. کانال‌های مختلفی برای واپاشی وجود دارند که می‌بایست بررسی شوند. عمده گذارها در هسته‌های A فرد گذارهای نامطلوب هستند چون نوکلئون فرد در حین فرایند واپاشی تغییر می‌کند که منجر به ایجاد یک سد می‌شود.

Transition	Q(MeV)	L	E(keV)	$T_{\frac{1}{2}}^{K=176MeV}(s)$	$T_{\frac{1}{2}}^{K=228MeV}(s)$	$T_{\frac{1}{2}}^{K=270MeV}(s)$	$T_{\frac{1}{2}}^{Exp.}(s)$
$^{219}\text{Ra} \rightarrow ^{215}\text{Rn}$							
$7/2^+ \rightarrow 9/2^+$	8.138	2	0	1.352E-03	1.329E-03	1.322E-03	3.280E-02
$7/2^+ \rightarrow 7/2^+$	7.924	0	0.214	6.129E-03	6.029E-03	6.014E-03	2.000E+00
$7/2^+ \rightarrow 9/2^-$	7.847	1	0.291	1.092E-02	1.062E-02	1.036E-02	1.110E+00
$7/2^+ \rightarrow 11/2^+$	7.822	2	0.316	1.333E-02	1.313E-02	1.033E-02	1.510E-02
$7/2^+ \rightarrow 7/2^+$	7.332	0	0.806	6.306E-01	6.106E-01	6.103E-01	4.170E-01
$^{215}\text{Ra} \rightarrow ^{211}\text{Rn}$							
$7/2^+ \rightarrow 9/2^+$	8.864	5	0	9.877E-05	9.021E-05	8.261E-05	9.021E-05
$7/2^+ \rightarrow 7/2^+$	8.324	3	0.540	6.295E-04	5.858E-04	5.397E-04	5.858E-04
$7/2^+ \rightarrow 9/2^-$	8.030	3	0.833	4.890E-03	4.651E-03	4.251E-03	4.651E-03
$^{213}\text{Ra} \rightarrow ^{209}\text{Rn}$							
$5/2^- \rightarrow 5/2^-$	6.861	2	0	3.603E+01	3.373E+01	3.070E+01	3.373E+01
$5/2^- \rightarrow ?$	6.751	0	0.110	5.517E+01	5.093E+01	4.655E+01	5.093E+01
$5/2^- \rightarrow ?$	6.646	2	0.215	2.781E+02	2.578E+02	2.365E+02	2.578E+02
$5/2^- \rightarrow ?$	6.533	2	0.325	8.332E+02	7.831E+02	7.115E+02	7.831E+02
$5/2^- \rightarrow ?$	6.350	0	0.511	2.998E+03	2.779E+03	2.519E+03	2.779E+03
$^{209}\text{Ra} \rightarrow ^{205}\text{Rn}$							
$5/2^- \rightarrow 5/2^-$	7.140	0	0	1.779E+00	1.652E+00	1.510E+00	1.652E+00
$5/2^- \rightarrow ?$	6.753	0	0.387	5.786E+01	5.373E+01	4.901E+01	5.373E+01
$5/2^- \rightarrow ?$	6.506	0	0.634	6.462E+02	6.062E+02	5.540E+02	6.062E+02

جدول شماره ۱: گذارهای مختلف به همراه انرژی ترازهای مختلف و نیمه‌عمرهای محاسبه شده. در این جدول داده‌های آزمایشگاهی از مرجع [۱۵] نشان داده شده است.

جدول شماره ۱ نشان دهنده محاسبات حاضر برای نیمه‌عمرهای جزئی برای هسته‌های $^{209,213,215,219}\text{Ra}$ را نشان می‌دهند. این محاسبات با داده‌های آزمایشگاهی اخیر مقایسه شده است. ستون ۱ گذارهای آلفا از حالت پایه به ترازهای مختلف برانگیخته هسته دختر را نشان می‌دهد. ترازهایی که به لحاظ تجربی در آن‌ها ساختار ریز واپاشی آلفا مشاهده شده است را مورد توجه قرار داده‌ایم. علامت ؟ مربوط به آن دسته از اطلاعاتی است که هنوز مشاهده نشده‌اند. در این جدول مقادیر متناظر Q و اندازه حرکت زاویه‌ای لیست شده‌اند. مقادیر محاسبه شده نیمه‌عمر با استفاده از برهمکنش‌های وابسته به چگالی با مقدار تراکم ناپذیری‌های مختلف لیست شده‌اند. از جدول ۱ مشخص است که نیمه‌عمرهای جزئی واپاشی آلفا محاسبه شده در اغلب گذارهای آلفا توافق خوبی با داده‌های تجربی خود نشان می‌دهند. همچنین از این جدول مشخص است که با افزایش مقدار تراکم ناپذیری از 176MeV الی 270MeV مقادیر نیمه‌عمر محاسبه شده کاهش می‌یابد.

نسبت‌های خوشه‌ای محاسبه شده در شکل ۱ به نمایش درآمده است. به‌طور مضاعف نسبت خوشه‌ای محاسبه شده در توافق قابل قبول با داده‌های تجربی قرار دارند. قابل ذکر است که نسبت‌های شاخه‌ای برای بعضی گذارهای آلفا به حالات برانگیخته از مقادیر گذار به حالت پایه بزرگ‌تر است. می‌تواند به این دلیل باشد که شباهت ساختاری بین حالت پایه هسته مادر و حالت برانگیخته هسته دختر مربوطه وجود دارد. در این مورد نیز با افزایش مقدار تراکم ناپذیری ماده هسته‌ای مقدار نسبت خوشه‌ای کاهش می‌یابد.



شکل شماره ۱: نسبت‌های خوشه‌ای در گذارهای آلفا در ایزوتوپ‌های رادیوم. نتایج محاسبات حاضر به همراه داده‌های تجربی در شکل نشان داده شده است.

۴. نتیجه‌گیری

ما در این تحقیق ساختار ریز و پاشی آلفا را برای ایزوتوپ‌های $^{209,213,215,219}\text{Ra}$ مورد بررسی قرار دادیم. در این تحقیق گذارهای از حالت پایه هسته مادر به حالات برانگیخته هسته دختر مورد توجه قرار گرفته است. محاسبات نیمه‌عمرهای جزئی و نسبت شاخه‌ای در چارچوب تقریب WKB با توجه به اثرات تراکم ناپذیری ماده هسته‌ای اعمال شده است. در محاسبه پتانسیل‌های هسته آلفا-دختر هسته از مدل معروف واپیچش دوگانه با اندرکنش‌های مؤثر نوکلئون-نوکلئون استفاده شده است. این نسخه‌های مختلف اندرکنش نوکلئون-نوکلئون متناظر با مقادیر 176MeV الی 270MeV برای مقدار عبارت تراکم‌ناپذیری را در محاسبات لحاظ می‌کنند. در این تحقیق، برای محاسبه احتمال پیش تشکیل از مدل تشکیل خوشه استفاده کرده‌ایم. این مدل فاکتور پیش تشکیل واقعی را بر پایه تفاوت انرژی‌های بستگی ارائه می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که نیمه‌عمرهای جزئی و پاشی آلفا محاسبه شده در اغلب گذارهای آلفا توافق خوبی با داده‌های تجربی خود نشان می‌دهند. به‌طور مضاعف نسبت خوشه‌ای محاسبه شده در توافق قابل قبول با داده‌های تجربی قرار دارند. قابل ذکر است که نسبت‌های شاخه‌ای برای بعضی گذارهای آلفا به حالات برانگیخته از مقادیر گذار به حالت پایه بزرگ‌تر است. می‌تواند به این دلیل باشد که شباهت ساختاری بین حالت پایه هسته مادر و حالت برانگیخته هسته دختر مربوطه وجود دارد. همچنین نشان داده شده است که با افزایش مقدار تراکم ناپذیری در همه گذارهای از حالت پایه هسته مادر به حالات مختلف هسته دختر نیمه‌عمرهای مربوطه و نسبت شاخه‌ای در حالت گذار از حالت پایه به حالت پایه کاهش می‌یابد.

۶. مراجع

1. A. Dumitrescu, D. S. Delion, Atomic Data and Nuclear Data Tables 145 (2022) 101501.
2. N. Ashok, A. Joseph, Nucl. Phys. A 977, (2018) 101.
3. S. A. Seyyedi, Int. J Mod. Phys. E, 29, (2020) 2050025.
4. D. Ni, Z. Ren, Phys. Rev. C 81 (2010) 064318

5. D. Ni, Z. Ren, Phys. Rev. C 83 (2011) 067302.
6. V. Yu. Denisov, A.A. Khudenko, Phys. Rev. C 80 (2009) 034603
7. K.P. Santhosh, J. G. Joseph, B. Priyanka, Nucl. Phys. A 877 (2012) 01.
8. K.P. Santhosh, S. Sahadevan, J. G. Joseph, Nucl. Phys. A 850 (2011) 34.
9. K.P. Santhosh, J. G. Joseph, B. Priyanka, S. Sahadevan, J. Phys. G, 38 (2011) 075101.
10. Dao T. Khoa, W. von Oertzen, Phys. Lett. B 304 (1993) 8.
11. Dao T. Khoa, W. von Oertzen, H. G. Bohlen, Phys. Rev. C 49 (1994) 1652.
12. Dao T. Khoa, G. R. Satchler, and W. von Oertzen, Phys. Rev. C 59 (1997) 954.
13. I. I. Gontchar, D. J. Hinde, M. Dasgupta, J. O. Newton, Phys. Rev. C 69, (2004) 024610.
14. D.S. Delion, A. Dumitrescu, Atom. Data Nucl. Data Tab. 101 (2015) 1–40.
15. <http://nrv.jinr.ru/nrv/>.
16. <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>.