

محاسبه زمان گذار هسته مرکب در برخی از واکنش‌های شکافت القایی با یون سنگین

سعید، سهیلی*؛ سعیده، فیروزی؛ راضیه، صادقی؛ مرتضی، خلیل خلیلی

دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده علوم، گروه فیزیک

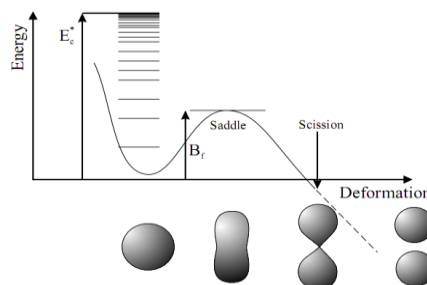
چکیده

تعداد نوترون‌های گسیلی قبل از نقطه زینی هسته مرکب (v_{gs}) و مدت زمان گذار هسته مرکب از حالت پایه تا نقطه زینی (τ_{gs}) برای چهار سیستم شکافت القایی با استفاده از مدل آماری نقطه زینی استاندارد بررسی شده است. با توجه به مقادیر کمیت‌های عدم تقارن جرمی (α) و عدم تقارن جرمی بحرانی (α_{BG}) در سیستم‌های بررسی‌شده انتظار رفتار عادی بین مقادیر تجربی ناهمسانگردی و پیش بینی مدل آماری نقطه زینی استاندارد را داریم. محاسبه τ_{gs} مربوط به سیستم $^{235}\text{Th} + ^{12}\text{C}$ نشان می‌دهد این سیستم دارای مقداری سهم شکافت هسته غیر مرکب است. افزایش انرژی برانگیختگی هسته مرکب باعث کاهش ارتفاع سد شکافت هسته مرکب و در نتیجه کاهش مدت زمان τ_{gs} می‌شود در این صورت انتظار کاهش تعداد v_{gs} را داریم.

کلید واژه: شکافت القایی با یون سنگین، نوترون‌های پیش نقطه زینی و توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت.

مقدمه

در سال ۱۹۳۸ گروه اشتراسمن، هان و میتنر بر روی هسته اورانیوم در حال تابش با باریکه نوترون آزمایشاتی انجام دادند و سرانجام نتیجه گرفتند هسته رادیواکتیو باریوم از اورانیوم تابشی به دست می‌آید. میتنر به همراه فریش با استفاده از مدل قطره مایعی نشان دادند که انرژی قابل توجهی هنگام تجزیه هسته سنگین به دو هسته تقریباً یکسان آزاد می‌شود و بنابراین آنها شکافت هسته‌ای را کشف کردند. شکافت هسته‌ای یک فرآیند پیچیده و دشوار است.



شکل ۱: تغییرات انرژی پتانسیل بر حسب تغییر شکل هسته مرکب در فرآیند شکافت.

فرآیند شکافت القایی با یونهای سنگین به ازای انرژیهای برانگیختگی که بر سد شکافت هسته مرکب غلبه می‌شود، به صورت شکل ۱ رفتار می‌کند. با توجه به شکل مدت زمان شکافت هسته مرکب (τ_{pre}) شامل مجموع مدت زمان گذار از حالت پایه هسته مرکب تا نقطه زینی استاندارد (τ_{gs}) و مدت زمان رسیدن هسته مرکب از نقطه زینی تا نقطه انقطاع (τ_{ss}) می‌باشد ($\tau_{pre} = \tau_{gs} + \tau_{ss}$). زمانهای τ_{gs} و τ_{ss} به ترتیب از مرتبه $10^{-21}s$ و $10^{-20}s$ پیش بینی شده است و از نظر تجربی اندازه‌گیری و تفکیک این زمانها کاری دشوار می‌باشد [۱-۲].

به مانند زمانهای τ_{gs} و τ_{ss} می‌توان تعداد نوترونهای گسیلی قبل از شکافت را تفکیک کرد بنابراین تعداد نوترونهای گسیلی در زمان τ_{gs} را با ν_{gs} و تعداد نوترونهای گسیلی در زمان τ_{ss} را با ν_{ss} نشان می‌دهیم و برای تعداد کل نوترونهای گسیلی قبل از شکافت (ν_{pre}) خواهیم داشت $\nu_{pre} = \nu_{gs} + \nu_{ss}$. انتظار می‌رود در هسته‌های مرکب سنگین با انرژی برانگیختگی بالا گسیل نوترونها با احتمال زیاد در نزدیکی نقطه انقطاع اتفاق افتد [۳]. در این کار ابتدا به بررسی تعداد ν_{gs} با استفاده از مقایسه پیش بینی مدل آماری نقطه زینی استاندارد و مقادیر تجربی ناهمسانگردی پاره‌های شکافت پرداخته شده است [۴]. با استفاده از مقدار این کمیت توانستیم τ_{gs} را با توجه به رابطه $\frac{\tau_{gs}}{\tau_{pre}} \approx \frac{\nu_{gs}}{\nu_{pre}}$ پیش بینی کنیم [۴] و با مقادیر به دست آمده توسط دیگران مقایسه کنیم.

روش کار

بررسی‌های اخیر نشان می‌دهند رفتار ناهمسانگردی پاره‌های شکافت در تعداد زیادی از سیستم‌های شکافت القایی با پرتابه‌های سبک و یونهای سنگین توسط SSPSM پیش بینی می‌شود. اصطلاحاً گفته می‌شود که توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت در چنین سیستم‌های شکافت القایی رفتار عادی دارند. از طرفی مشخص شده است که ناهمسانگردی زاویه‌ای پاره‌های شکافت تعداد زیادی از این واکنشها را نمی‌توان با مدل آماری نقطه زینی استاندارد پیش‌بینی کرد. این سیستمها را ناهم‌خوان با مدل می‌نامیم و علت این ناهم‌خوانی را به وجود سهم شکافت هسته غیر مرکب نسبت می‌دهند [۵]. برای سیستم‌های شکافت القایی متفاوت با توجه به مقایسه کمیت‌های عدم تقارن جرمی (α) و عدم تقارن جرمی بحرانی بوزینارو-گالن (α_{BG}) می‌توانیم حضور یا عدم حضور شکافت هسته غیر مرکب را پیش‌بینی کنیم [۵]. انتظار می‌رود با توجه به این مقایسه برای سیستم‌های $\alpha > \alpha_{BG}$ سهمی از شکافت هسته غیر مرکب نداشته باشیم و اینگونه سیستمها رفتار عادی را به نمایش بگذارند و سیستم‌های $\alpha < \alpha_{BG}$ دارای سهمی از شکافت هسته غیر مرکب بوده و رفتاری غیر عادی دارند [۵]. رابطه α و α_{BG} به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{A_T - A_P}{A_T + A_P} \text{ و } \alpha_{BG} = \begin{cases} 1.12 \sqrt{\frac{\chi - 0.396}{[(\chi - 0.396) + 0.24]\chi}} & \chi > 0.396 \\ 0 & \chi < 0.396 \end{cases} \quad (1)$$

در این روابط χ پارامتر شکافت پذیری نامیده می شود و برابر با $\chi = \frac{Z^2/A}{50.883\{1-1.7826[(N-Z)/A]^2\}}$ است. A_p و A_T هم به ترتیب اعداد جرمی هدف و پرتابه هستند. نظریه استاندارد ناهمسانگردی پاره های شکافت براساس مدل حالت گذار است. در این نظریه هسته شکافت پذیر دارای یک تقارن محوری می باشد. به علاوه فرض شده که پاره های شکافت، در امتداد محور تقارن هسته مرکب از همدیگر جدا می شوند. ناهمسانگردی پاره های شکافت به صورت نسبت تعداد پاره های شکافت در زاویه ۰ یا ۱۸۰ درجه به تعداد پاره های شکافت در زاویه ۹۰ درجه تعریف می شود. در پیش بینی SSPSM رابطه ناهمسانگردی پاره های شکافت به صورت زیر است:

$$A \equiv \frac{W(0 \text{ یا } 180)}{W(90)} \approx 1 + \frac{\langle I^2 \rangle}{\epsilon K^2} \quad (2)$$

در این رابطه I^2 مربع اسپین کل هسته مرکب است و به وسیله مدل های متفاوت بر حسب انرژی پرتابه محاسبه می شود. K^2 واریانس تابع توزیع K (مولفه اسپین کل هسته مرکب در راستای محور تقارن هسته) با توجه به رابطه $K^2 = I_{eff}^2 \frac{T}{\hbar^2}$ محاسبه می شود که I_{eff} و T به ترتیب گشتاور لختی موثر و دمای هسته مرکب در نقطه زینی می باشند. دمای هسته مرکب به صورت $T = \sqrt{\frac{E_{ex}}{a}}$ تعریف می شود که در این رابطه E_{ex} انرژی برانگیختگی هسته مرکب در نقطه زینی و a پارامتر چگالی تراز است و مقادیر آن از $\frac{A.C.N.}{8}$ تا $\frac{A.C.N.}{11}$ اختیار می شود ($A.C.N.$ عدد جرمی هسته مرکب می باشد). E_{ex} از رابطه زیر به دست می آید:

$$E_{ex} = E_{c.m.} + Q - B_f - E_R - v_{gs} E_n \quad (3)$$

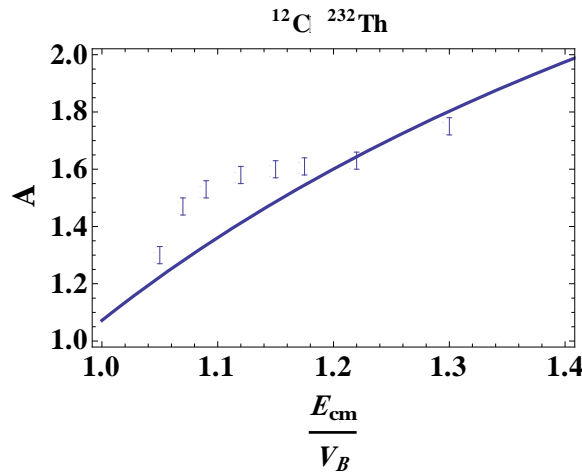
$E_{c.m.}$, Q , B_f , E_R و E_n به ترتیب انرژی پرتابه در چارچوب مرکز جرم، مقدار Q واکنش، ارتفاع سد شکافت هسته مرکب، انرژی چرخشی هسته مرکب، انرژی حمل شده توسط هر نوترون گسیلی و تعداد نوترون های گسیلی پیش از نقطه زینی هسته مرکب هستند.

نتایج

در این کار چهار سیستم شکافت القایی مورد بررسی قرار گرفته است. از مقایسه پیش بینی مدل SSPSM با مقادیر تجربی ناهمسانگردی تعداد v_{gs} را به دست آوردیم و با توجه به مقادیر اندازه گیری شده v_{pre} و τ_{pre} [۱] توانستیم τ_{gs} را برای این سیستم ها پیش بینی کنیم. $\langle I^2 \rangle$ با توجه به مقادیر تجربی اندازه گیری شده به دست آمده است [۶، ۷]. مقادیر مربوط به کمیت های E_{eff} , B_f و E_R با استفاده از مدل سیرک به دست آمده اند [۸]. مقادیر a و E_n به ترتیب برابر با $\frac{A.C.N.}{8}$ و 10 MeV فرض شده اند [۹]. همچنین سیستم های شکافت القایی بررسی شده دارای $\alpha > \alpha_{BG}$ هستند و انتظار داریم سهمی از شکافت هسته غیر مرکب نداشته باشند. ابتدا سیستم شکافت القایی $^{232}\text{Th} + ^{12}\text{C}$ را مورد بررسی قرار می دهیم تا به حال تعداد v_{gs} برای این سیستم محاسبه و یا اندازه گیری نشده است. در شکل زیر منحنی ناهمسانگردی پاره های شکافت (بدون تصحیح نوترون) به همراه

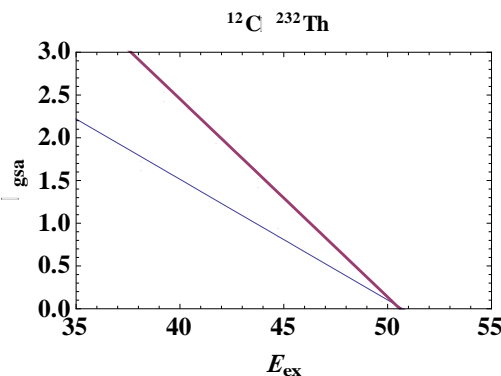


مقادیر تجربی ناهمسانگردی برای این سیستم رسم شده است. مطابق با شکل ۲ هر چه انرژی پرتابه بیشتر باشد آنگاه مقادیر اندازه گیری شده ناهمسانگردی به پیش بینی مدل نزدیک تر می شوند و این نتیجه نشان می دهد که تعداد v_{gs} با افزایش انرژی پرتابه کاهش می یابد.



شکل ۲: نمودار ناهمسانگردی پاره های شکافت برای سیستم شکافت القایی $^{12}\text{C} + ^{232}\text{Th}$ بر حسب $\frac{E_{c.m.}}{V_b}$ ارتفاع سد کولنی می باشد). منحنی، پیش بینی مدل را نشان می دهد. نقاط توپر و تو خالیبه ترتیب از مراجع [۱۰] و [۱۱] گرفته شده اند.

در شکل ۳، برازش مقادیر تجربی ناهمسانگردی پاره های شکافت و پیش بینی مدل نشان داده شده است. خط های مختلف نشان دهنده دو دسته مقادیر اندازه گیری شده توسط گروه های متفاوت می باشد. مدت زمان رسیدن هسته مرکب از حالت پایه تا نقطه زینی با توجه به رابطه $\tau_{gs} \approx 4Ln \frac{B_f}{T}$ از مرتبه 10^{-21} s به دست می آید [۱]. با افزایش E_{ex} هسته مرکب مقدار $\frac{B_f}{T}$ کاهش یافته (هر چقدر هسته مرکب سنگین تر باشد با افزایش E_{ex} مقدار $\frac{B_f}{T}$ با سرعت بیشتری کاهش می یابد)، بنابراین مقدار τ_{gs} کاهش می یابد و نوترون های گسیلی در این بازه زمانی فرصت کمتری برای گسیل پیدا می کنند.



شکل ۳: تعداد نوترون های گسیلی پیش از نقطه زینی (v_{gs}) مربوط به سیستم شکافت القایی $^{12}\text{C} + ^{232}\text{Th}$. خط های پُر و کم رنگ به ترتیب با استفاده از مراجع [۱۰] و [۱۱] محاسبه شده است.



با توجه به شکل ۳ و رابطه $\frac{\tau_{gs}}{\tau_{pre}} \approx \frac{v_{gs}}{v_{pre}}$ می‌توانیم τ_{gs} را برای این سیستم پیش بینی کنیم و با مقدار به دست آمده از رابطه $\tau_{gs} \approx 4Ln \frac{1.0B_f}{T}$ مقایسه کنیم. تعداد متوسط نوترون‌ها در بازه انرژی برانگیختگی محاسبه شده با توجه به مقادیر تجربی گرفته شده از مراجع [۱۰] و [۱۱] به ترتیب برابر با ۰.۵ و ۰.۹ است. مطابق با اندازه‌گیری‌های انجام شده، مقادیر تجربی برای v_{pre} و τ_{pre} به ازای انرژی برانگیختگی حدود ۴۴ MeV (انرژی برانگیختگی میانگین در بازه محاسبات سیستم $^{12}C + ^{232}Th$) به ترتیب برابر با ۱ و $2 \times 10^{-20} s$ است [۱]. بنابراین τ_{gs} با استفاده از مراجع [۱۰] و [۱۱] به ترتیب برابر با $30 \times 10^{-21} s$ و $18 \times 10^{-21} s$ پیش بینی می‌شود. مقدار τ_{gs} این سیستم حدود $12 \times 10^{-21} s$ پیشنهاد می‌شود [۱]. تعداد نوترون‌های گسیلی بیشتری نسبت به واقعیت به دست آمده است و علت آن وجود شکافت هسته غیر مرکب برای این سیستم است [۱۲]. اخیراً پیش بینی شده است برای سیستم $^{12}C + ^{232}Th$ ، مقدار شش درصد از کل فرآیندهای شکافت مربوط به شکافت هسته غیر مرکب است [۱۳]. در جدول شماره ۱، با استفاده از روش بالا τ_{gs} مربوط به سیستم‌های شکافت القایی $^{14}N + ^{209}Bi$ ، $^{16}O + ^{208}Pb$ و $^{19}F + ^{208}Pb$ محاسبه شده است و با مقادیر پیشنهاد شده مقایسه شده است.

جدول شماره ۱: مقادیر $\frac{B_f}{T}$ ، v_{gs} ، v_{pre} ، τ_{pre} و τ_{gs} مربوط به سیستم‌های شکافت القایی بررسی شده.

سیستم شکافت القایی	$\frac{B_f}{T}$	v_{gs} [ع]	v_{pre} [ع]	τ_{pre} [ع]	τ_{gs} [ع]	τ_{gs}
$^{14}N + ^{209}Bi$	۲.۵	۰.۸۴	۳	$2.5 \times 10^{-20} s$	$13 \times 10^{-21} s$	$7 \times 10^{-21} s$
$^{16}O + ^{208}Pb$	۱.۸	۰.۴۲	۳	$3 \times 10^{-20} s$	$12 \times 10^{-21} s$	$4 \times 10^{-21} s$
$^{16}O + ^{208}Pb$	۲.۶	۰.۶۶	۲.۸	$3 \times 10^{-20} s$	$12.6 \times 10^{-21} s$	$7 \times 10^{-21} s$
$^{19}F + ^{208}Pb$	۱.۳	۰.۶۶	۳.۲	$2.5 \times 10^{-20} s$	$12 \times 10^{-21} s$	$10 \times 10^{-21} s$

هسته‌های مرکب تشکیل شده مربوط به دو سیستم $^{14}N + ^{209}Bi$ و $^{16}O + ^{208}Pb$ فقط در یک نوترون با همدیگر تفاوت دارند بنابراین بسیار شبیه به همدیگر هستند و انتظار داریم که رفتاری تقریباً مشابه به هم داشته باشند. این موضوع در جدول شماره ۱ به وضوح مشخص است و دلیلی بر درستی محاسبات می‌باشد. نتایج به دست آمده در جدول شماره ۱ برای سیستم $^{16}O + ^{208}Pb$ نشان می‌دهد که با کاهش اندازه $\frac{B_f}{T}$ مقدار τ_{gs} کاهش می‌یابد.

بحث و نتیجه‌گیری

ابتدا تعداد نوترون‌های گسیلی قبل از نقطه زینی هسته مرکب (v_{gs}) را با استفاده از مدل برای سیستم $^{12}C + ^{232}Th$ به دست آوردیم و با محاسبه مدت زمان گذار هسته مرکب از حالت پایه تا نقطه زینی (τ_{gs}) نشان دادیم سیستم $^{12}C + ^{232}Th$ دارای سهم شکافت هسته غیر مرکب است. این نتیجه نشان می‌دهد شرط مقایسه‌ای α و α_{BG} برای پیش بینی رفتار توزیع زاویه‌ای پاره‌های شکافت این سیستم درست نمی‌باشد. در ادامه نشان داده شد دو سیستم $^{14}N + ^{209}Bi$ و $^{16}O + ^{208}Pb$ (که منجر به تشکیل هسته مرکب تقریباً یکسان می‌شوند) به ازای مقدار یکسان $\frac{B_f}{T}$ دارای τ_{gs} ‌های تقریباً مشابه هستند. این مورد نشان می‌دهد مدت زمان τ_{gs} مربوط به سیستم‌های شکافت القایی منجر به یک هسته مرکب (با پرتابه و هدف‌های مختلف)، یکسان می‌باشد علت آن است که



هسته مرکب به دست آمده خاطره تشکیل خود را فراموش می‌کند. برای سیستم شکافت القایی $^{16}O + ^{208}Pb$ با کاهش مقدار $\frac{B_f}{T}$ نشان دادیم مقدار τ_{gs} کاهش می‌یابد و این مورد نیز قابل انتظار بوده است.

مراجع

- ۱- A. Saxena, A. Chatterjee, S. Kapoor, and D. M. Nadkarni, "Entrance channel effects in the fusion-fission time scales from studies of prescission neutron multiplicities" Phys. Rev. C ۴۹, ۹۳۲-۹۴۰ (۱۹۹۴).
- ۲- J. P. Lestone, "Determination of the Time Evolution of Fission" Phys. Rev. Lett ۷۰, ۲۲۴۵-۲۲۴۸ (۱۹۹۳).
- ۳- A. Chatterjee, A. Navin, S. Kailas, P. Singh, D. C. Biswas, A. Kamik, and S. S. Kapoor, "Prescission charged particle emission in $^{19}F + ^{232}Th$ " Phys. Rev. C ۵۲, ۳۱۶۷-۳۱۷۳ (۱۹۹۵).
- ۴- S. Soheyli and M. K. Khalili, "Pre-saddle neutron multiplicity for fission reactions induced by heavy ions and light particles" Phys. Rev. C ۸۷, ۰۳۴۶۱۰-۰۳۴۶۱۶ (۲۰۱۳).
- ۵- S. Kailas, "Heavy-ion induced fission at near barrier energies" Phys. Rep. ۲۸۴, ۳۸۱-۴۱۶ (۱۹۹۷).
- ۶- B. B. Back, R. R. Betts, J. E. Gindler, M. B. Tsang, C. K. Gelbke, W. G. Lynch, M. A. McMahan, and P. A. Baisden, "Angular distributions in heavy-ion-induced fission" Phys. Rev. C ۳۲, ۱۹۵-۲۱۳ (۱۹۸۵).
- ۷- V. E. Viola, J. T. D. Thomas, and G. T. Seaborg, "Angular Distribution of Fragments from Fission Induced by Heavy Ions in Gold and Bismuth" Phys. Rev. ۱۲۹, ۲۷۱۰-۲۷۱۷ (۱۹۶۳).
- ۸- ۱۵- A. J. Sierk, "Macroscopic model of rotating nuclei" Phys. Rev. C ۳۳, ۲۰۳۹-۲۰۵۳ (۱۹۸۶).
- ۹- R. Vandenbosch, J. D. Bierman, J. P. Lestone, J. F. Liang, D. J. Prindle, A. A. Sonzogni, S. Kailas, D. M. Nadkarni, and S. S. Kapoor, "Disappearance of entrance channel dependence of fission fragment anisotropies at well-above-barrier energies" Phys. Rev. C ۵۴, R۹۷۷-R۹۸۰ (۱۹۹۶).
- ۱۰- J. C. Mein, D. J. Hinde, M. Dasgupta, J. R. Leigh, J. O. Newton, and H. Timmers, "Precise fission fragment anisotropies for the $^{12}C + ^{232}Th$ reaction: Supporting the nuclear orientation dependence of quasifission" Phys. Rev. C ۵۵, R۹۹۵-R۹۹۸ (۱۹۹۷).
- ۱۱- Bivash R. Behera, M. Satpathy, and S. Jena, S. Kailas, R. G. Thomas, K. Mahata, and A. Chatterjee, Subinit Roy, P. Basu, and M. K. Sharan, S. K. Datta, "Fission fragment angular distributions for the systems $^{14}N + ^{232}Th$ and $^{11}B + ^{235}U$ at near and sub-barrier energies" Phys. Rev. C ۶۹, ۰۶۴۶۰۳-۹ (۲۰۰۴).
- ۱۲- R. G. Thomas, R. K. Choudhury, A. K. Mohanty, A. Saxena, and S. S. Kapoor, "Fission fragment angular distributions: A probe to study heavy-ion fusion dynamics" Phys. Rev. C ۶۷, ۰۴۱۶۰۱R-۵ (۲۰۰۳).
- ۱۳- S. Soheyli and M. K. Khalili, "Non-compound-nucleus fission events and standard saddle-point statistical model" Phys. Rev. C ۸۵, ۰۳۴۶۱۰-۶ (۲۰۱۲).